

Механическая КИБЕРНЕТИКА

Механическая
КИБЕРНЕТИКА

А.Т. ИВАХНЕНКО

А.Г. ИВАХНЕНКО

Техническая
КИБЕРНЕТИКА

*Системы
автоматического управления
с приспособлением характеристик*

Второе издание

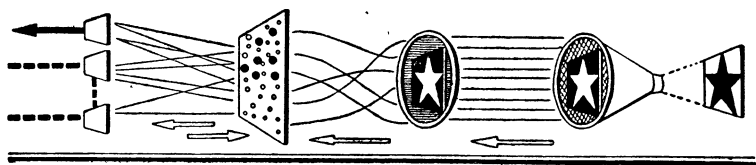


ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
технической литературы УССР
Киев—1962

В книге рассмотрены новые системы автоматического управления производственными процессами, отличающиеся приспособлением характеристик к непрерывному изменению условий работы для достижения максимума производительности, к.п.д., быстродействия и других показателей качества. Эти системы получили свое развитие в связи с появлением нового направления автоматике, называемого технической кибернетикой.

Рассмотрены основные схемы кибернетических упорядоченных и статистических систем и даны элементы их общей теории. Показано, что теория комбинированных систем стабилизации (включая условия инвариантности) применима с небольшими изменениями и к кибернетическим экстремальным системам.

Книга рассчитана на инженерно-технических и научных работников, работающих в области автоматизации производственных процессов.



ВВЕДЕНИЕ

Дальнейший технический прогресс не мыслим без автоматизации производственных процессов в широких масштабах. Научная организация производства и его автоматизация являются двумя основными средствами повышения производительности труда. В. И. Ленин неоднократно указывал на то, что производительность труда является решающим фактором в мирном соревновании социалистической и капиталистической систем.

Вот почему в Программе Коммунистической партии Советского Союза предусматривается в течение двадцати лет осуществить в массовом масштабе комплексную автоматизацию производства, ускорить внедрение высокосовершенных систем автоматического управления.

В вопросах комплексной автоматизации большое значение имеет организация широкого применения кибернетики и электронных счетно-решающих и управляющих устройств.

Кибернетика есть наука об общих законах управления. Одной из основных идей кибернетики является мысль о сходстве принципов управления живых организмов и некоторых автоматических систем. Те и другие обладают удивительным свойством быстрой реакции на изменение

внутреннего состояния или факторов внешней среды с целью наилучшего приспособления к новым условиям существования. Кибернетика интересуется только одной стороной процессов в окружающем нас мире, а именно: вопросами генерирования, преобразования и использования сигналов управления для целенаправленных действий. Вопросы распределения энергии или мощности, стоимости или размеров и т. п. кибернетика не рассматривает.

Кибернетика, признающая общность процессов управления и связи в технических устройствах и живых организмах, имеет большую познавательную ценность. Она позволяет одной отрасли науки заимствовать полезные сведения о способах управления из другой отрасли и, таким образом, служит взаимному их обогащению.

Техническая кибернетика, как и следует из ее названия, изучает только технические системы с точки зрения законов управления. Она включает в себя: а) теорию информации; б) теорию логических элементов и вычислительных машин, преобразующих информацию; в) теорию систем автоматического регулирования, изучающую методы использования информации.

В данной книге освещаются вопросы, главным образом, последней, третьей, части технической кибернетики.

Со времени выхода в свет широкоизвестной книги выдающегося китайского ученого Цянь Сюэ-Сеня [66], посвященной технической кибернетике, получившей первую национальную премию Китайской Народной Республики за 1955 год, прошло более пяти лет. За это время техническая кибернетика быстро развивалась и получила ряд новых направлений.

В отличие от книги Цянь Сюэ-Сеня, посвященной технической кибернетике в широком смысле слова, в настоящей книге более глубоко рассматривается сравнительно узкий круг вопросов теории и техники так называемых кибернетических систем автоматического управления, отличающихся от обычных систем автоматизации наличием автоматического самоизменения различных характеристик при изменении внутренних и внешних возмущений.

Особенностью изложения материала книги является определенный взгляд на роль вычислительных машин при создании систем автоматизации производственных процессов.

Оценка значения вычислительной техники для автоматизации производственных процессов зависит от ответа на вопрос, какая часть автоматической системы является основной и наиболее сложной для разработки. Утверждение о том, что вычислительная техника имеет основное значение для автоматизации; равносильно утверждению, что главные проблемы автоматического регулирования сводятся к разработке измерительных элементов (датчиков). Действительно, вычислительные устройства (как наиболее простые, так и сложные, например большие электронные цифровые машины) применяются только в измерительной части системы для выработки напряжения (или другой физической величины), пропорционального общему показателю качества процесса или системы таких показателей, а также для расчетов и осуществления нелинейных компаундирующих связей по основным возмущениям. Сумма напряжений измерительных связей поступает на усилители и сервомоторы, приводящие в движение исполнительные элементы, регулирующие процесс. Здесь, *при замыкании систем*, собственно, и возникают основные проблемы автоматического управления, проблемы, к решению которых специалисты по вычислительным машинам совсем не подготовлены. Они не встречаются в своей практике ни с законом компромиссной настройки, ни с условиями инвариантности, являющимися двумя основными законами замкнутых автоматических систем. Проблема помехоустойчивости в том виде, как она существует при автоматизации производственных процессов, их не интересует, так как большие вычислительные машины работают в специальных залах, где даже температура и напряжение сети поддерживаются постоянными. Специалист по вычислительным машинам беспомощен при решении задач автоматизации производственных процессов. Вот почему не следует преувеличивать роль вычислительной техники в автоматике. Вычислительные машины играют вспомогательную, служебную, роль в автоматизации производственных процессов.

Много недоразумений в оценке значения вычислительной техники для автоматизации производственных процессов возникает из-за неправильного по смыслу перевода иностранных слов. Английское слово «computer» (или немецкое «rechner») в большинстве случаев отвечает тому, что мы понимаем под термином «система управления»

или «система регулирования». Значительно реже его следует переводить как «управляющая машина» и еще реже как «вычислительная машина».

Несмотря на то, что кибернетика возникла в результате опытов на больших цифровых вычислительных машинах (машины, играющие в шахматы, машины-переводчики и т. п.), все же по принципу своего действия эти вычислительные машины относятся к старой, докибернетической, технике, к тому классу систем, которые мы называем обычными. Это можно сказать и о системе цифрового программного управления металлорежущими станками, почти обо всех автоматических линиях и многих автоматических заводах, так как они имеют определенную жесткую программу (или алгоритм¹) действий. Это вовсе не умаляет значения таких систем. Несомненно, что бурное их развитие совершенно необходимо и будет продолжаться. Но сейчас уже ясно, что системы обычного типа с постоянным заданием, жесткой программой, или алгоритмом, *не обеспечивают автоматизации большинства узлов производственных процессов*. Поэтому техническая кибернетика все дальше уходит от них, открывая перспективы разработки более гибких и более универсальных систем автоматизации с автоматическим приспособлением характеристик. Задача создания полностью автоматизированных производств может быть решена только с использованием как обычных, так и новых систем управления, называемых в данной книге кибернетическими.

Принципы осуществления гибких кибернетических систем разнообразны, и это разнообразие с развитием техники будет увеличиваться. В книге обращено внимание на разделение систем на системы с упорядоченным (детерминированным) и на системы со статистическим и статистически-вероятностным поиском оптимальных показателей процесса.

Преимуществом упорядоченных систем является определенность и быстрота действий. Преимуществом статистических систем является их универсальность, пригодность к решению ряда разнообразных задач. Статистические вероятностные системы в наибольшей степени обладают спо-

¹ Алгоритмом называется последовательность действий арифметического или логического порядка, производимых в соответствии с какой-либо системой правил (подробнее см. ниже). Простыми примерами алгоритмов могут служить формулы.

способностью к «обучению», т. е. легко могут учесть опыт предыдущей работы. Эти машины могут применяться для игры в шахматы, чтения и перевода книг, причем они основаны на совсем других принципах, чем машины-переводчики с постоянным алгоритмом, созданные в первые годы развития кибернетики. Прежде чем, например, машина начнет играть в шахматы, ее нужно научить этому, зато она будет действовать не путем просчета многих вариантов игры вперед, а с учетом опыта предыдущих игр. Машину можно научить и ряду различных игр.

При дальнейшем развитии структуры статистически-вероятностные системы кибернетики будут все более однородными, «биологическими», напоминающими строение мозга живых существ. В них не будет ни специальных измерительных элементов, ни вычислительных устройств, ни блоков памяти. При своем «рождении» они, по-видимому, ничего не будут уметь делать и их нужно будет обучать.

Параллельно будут развиваться и упорядоченные, или детерминированные, системы, создаваемые для вполне определенной задачи. Среди последних наибольшее развитие получают так называемые экстремальные системы, отыскивающие максимум какого-либо показателя качества. Излагаемая в книге теория относится к этому типу кибернетических систем.

В книге показана общность классификации кибернетических систем с самоизменением уставки, программы, параметров, нелинейных характеристик или структуры и возможность распространения этой классификации на кибернетические системы с самоизменением алгоритмов, вероятностных характеристик или области действия системы.

При классификации систем, проведении аналогий и анализов показано, что системы, использующие принцип комбинированного управления, являются наиболее совершенными упорядоченными системами, обладающими наибольшей точностью и быстродействием. При комбинированном управлении в системе используется одновременно как управление по возмущениям, так и управление по регулируемой величине.

В книге установлено, что основные два принципа управления, используемые при построении обычных систем автоматического регулирования (принцип управления по возмущениям и принцип управления по регулируемой величине), остаются главными принципами управления и для

кибернетических систем, а следовательно, основные методы повышения качества (точности, быстродействия) являются общими как для обычных, так и для кибернетических систем управления.

Первая экстремальная система разомкнутого типа (т.е. использующая принцип управления по возмущениям) — регулятор угла поворота лопастей гидротурбин — была осуществлена В. А. Богомоловым и В. Л. Бениным в Институте электротехники АН УССР. Экстремальная система с замкнутой обратной связью впервые описана в книге Г. Штейна «Регулирование и выравнивание в паросиловых установках» (1929 г.). Одной из первых систем этого типа является и регулятор, разработанный Насленом [2]. Первые значительные исследования экстремальных систем с обратной связью были выполнены В. В. Казакевичем (1948 г.), а затем Драпером, Ли и Лайнингом (1953 г.). Первая экстремальная система *комбинированного* типа — система регулирования котла на максимум отношения $\frac{\text{пар}}{\text{топливо}}$ — осуществлена в Институте электротехники АН УССР (1958 г.) под руководством автора этой книги.

В книге показано, что математический аппарат, необходимый для исследования комбинированных кибернетических экстремальных систем, сравнительно прост, часто сводится к исследованию линейных уравнений и что трудности исследования почти не превышают трудностей исследования обычных систем регулирования, не обладающих свойством приспособления к изменению условий работы. Таким образом, новая теория и техника кибернетических систем разрабатывается на основе систематического обобщения и развития уже известных положений теории и техники комбинированных систем автоматического регулирования.

Большое внимание обращено на изучение способов повышения помехоустойчивости экстремальных кибернетических систем. Показано, что все основные способы повышения помехоустойчивости систем связи непосредственно применимы для решения задачи повышения помехоустойчивости. Наиболее перспективным методом повышения помехоустойчивости кибернетических систем является взаимокорреляционный метод.

Таким образом, в книге изложены *принципы построения схем, методы исследования и способы повышения поме-*

хостойчивости экстремальных кибернетических систем с одним показателем качества.

С целью использования, главным образом, познавательной стороны кибернетики автор не стремился к детальному рассмотрению всех описанных в книге систем. Основное внимание в первой части книги обращено на классификацию систем и на проведение весьма полезных взаимных аналогий, открывающих новые принципиальные схемы построения систем.

Среди большого количества различных схем, безусловно, найдутся и такие, которые, как уже сейчас видно, не получат большого практического применения, например, ввиду их сложности или энергетической нецелесообразности. Тем не менее для объективного выбора принципиальной схемы полезно знать о возможности построения таких систем.

Кибернетика является новой отраслью науки и находится в стадии быстрого развития. Разумеется, что предлагаемая монография не может претендовать на полноту рассмотрения всех затронутых вопросов. В ней только систематизирован большой материал, собранный автором в процессе разработки различных кибернетических систем. Вопросы, имеющие хотя и большое значение, но не связанные с разработкой определенных систем, в книге не рассматриваются.

Все замечания по книге просим направлять по адресу: Киев, Пушкинская, 28, Гостехиздат УССР.



Глава I

АВТОМАТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ КИБЕРНЕТИКА

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ

Определение автоматике

Еще сравнительно недавно в ряде книг автоматика определялась как отрасль техники, разрабатывающая методы и средства высвобождения физического труда человека при контроле и управлении техническими процессами.

Приблизительно до 1943 г. (год появления больших электронных вычислительных машин) такое определение автоматике было достаточно удовлетворительным. Идея создания автоматических устройств, служащих для облегчения (автоматизации) умственного труда человека, казалась тогда нереальной и даже фантастической.

С развитием автоматизации изменился и взгляд на назначение и область применения автоматических устройств.

Теперь автоматике можно определить как отрасль науки и техники, занимающуюся разработкой устройств, действующих без непосредственного участия человека, причем эти устройства могут частично или полностью высвободить человека как от физического, так и взять на себя выполнение некоторых видов его умственного труда.

Первые автоматические регуляторы

Идея возникновения первых автоматических устройств уходит в далекое прошлое. Эти устройства весьма разнообразны по назначению. Значительная часть систем имела своей целью стабилизацию той или иной величины.

Рамелли (1588 г.) описал автоматическое устройство (регулятор), служащее для поддержания постоянства скорости вращения мельничного жернова. И. И. Ползунов (1760 г.) изобрел регулятор, поддерживающий постоянный уровень воды в паровом котле, дающем пар для изобретенной им паровой машины. Большое значение для развития техники имело изобретение Джемсом Уаттом (1779 г.) центробежного регулятора скорости вращения паровых машин.

Во всех этих системах регулирования (Рамелли, Ползунова, Уатта) использовался один и тот же принцип действия — компенсационный принцип регулирования по отклонению регулируемой величины.

Основным признаком компенсационных систем по отклонению является наличие в системе, по крайней мере, одного замкнутого цикла передачи воздействий (обратной связи), включающего следующие элементы: измерительный элемент — усилитель — исполнительный элемент — объект регулирования. Поэтому системы регулирования по отклонению регулируемой величины часто называют автоматическими системами замкнутого цикла, или системами с обратной связью.

Еще раньше появились автоматические системы с принципом регулирования по возмущению. Разработка этих систем связана с именами Понселе, В. Н. Чиколева, М. О. Доливо-Добровольского, акад. В. С. Кулебакина и др. Суть этого принципа состоит в том, что для уменьшения влияния изменения нагрузки на объект регулирования в системе предусматривается устройство (компаундирующая связь по нагрузке), изменяющее подачу регулирующего воздействия (топлива, пара, тока возбуждения и др.) пропорционально изменению нагрузки. Применяются и нелинейные связи по нагрузке.

Системы, использующие принцип регулирования по возмущению, работают по разомкнутому циклу (если не учитывать влияния свойств нагрузки), т. е. не имеют обратной связи.

Система компаундирования генераторов по току нагрузки является наиболее характерным примером системы с принципом регулирования по основному возмущению.

Сравнение указанных выше двух принципов регулирования не является сейчас нашей целью, напомним все же,

что системы с обратными связями требуют применения более сложной аппаратуры и склонны к возбуждению автоколебаний (неустойчивости).

Системы разомкнутые (без обратных связей) недостаточно стабильны, нелинейны и имеют ряд других недостатков. В частности, они решают задачу регулирования только в отношении основного возмущения, по которому осуществлена компаундирующая связь.

Наиболее совершенными являются комбинированные системы регулирования [16], в которых осуществляется одновременно как принцип управления по отклонению регулируемой величины, так и принцип управления по возмущениям. Автоматические системы последних лет все чаще строятся как системы комбинированные.

Многие авторы (в том числе Норберт Винер) относят к кибернетическим все системы автоматического регулирования на том основании, что в них используются управляющие сигналы. Нам кажется более целесообразным назвать кибернетическими более специфичный круг систем.

Сейчас уже довольно отчетливо можно различить системы автоматического регулирования докибернетического периода и системы кибернетические, появившиеся после 1943 г. Изучение тех и других показывает, что в смысле принципов управления появление кибернетики не внесло ничего нового. Как старые, так и новейшие кибернетические системы используют указанные выше два основных принципа управления. В кибернетических системах мы также находим обратные связи по регулируемой величине (или по другим внутренним координатам) либо разомкнутые компаундирующие связи по основным возмущениям. Идея комбинированного управления в технической кибернетике так же плодотворна, как и в системах регулирования докибернетического периода. Это положение является одним из основных в данной работе.

Естественно задать вопрос: если принципы построения обычных и кибернетических систем автоматического регулирования одни и те же, то в чем состоит их различие?

Различие заключается, главным образом, в задачах регулирования, решаемых теми и другими системами, и в способе осуществления обратных связей.

Кибернетической системой автоматического регулирования можно назвать систему, предназначенную для ре-

шения новых, более сложных задач регулирования, чем классические задачи стабилизации, программного и следящего регулирования. Обратные связи в кибернетических системах широко используют элементы логического действия и часто работают в режиме непрерывного поиска (колебаний). В кибернетических системах вопросы, связанные с управлением, генерированием, преобразованием, передачей и приемом управляющих сигналов, занимают главное место. Другие вопросы (например, вопросы передачи энергии) имеют второстепенное значение. Вот почему кибернетику называют также *наукой об общих законах управления*.

Рассмотрим вопрос о задачах регулирования более подробно.

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ДО ПОЯВЛЕНИЯ КИБЕРНЕТИКИ

Со времени изобретения первых регуляторов теория и техника автоматического регулирования развивались как в направлении расширения области применения регуляторов, так и в направлении повышения точности решения разнообразных задач регулирования.

Перечислим основные задачи регулирования.

Упомянутые выше регуляторы Рамелли, Ползунова и Уатта относятся к наиболее важному и распространенному классу систем регулирования, решающих *задачу стабилизации* регулируемой величины на постоянном значении. Еще в прошлом столетии были решены задачи стабилизации расстояния между электродами дуговых ламп, стабилизации температуры, напряжения генераторов постоянного тока, напряжения и частоты генераторов переменного тока и некоторые другие.

Кроме задачи стабилизации, широко известны также *задачи программного изменения* регулируемой величины в функции времени или пути и *задача следящих систем* [16]. Эти задачи регулирования находят свое решение в системах авторулевых, автопилотах, в автоматических радиолокационных установках, системах управления шлюзами, прокатными станами и во многих других системах.

Для автоматического регулирования докибернетического периода характерно то, что задачи, решаемые системами, не выходили за пределы указанных здесь трех задач регулирования. Это приводило к тому, что автоматическое

регулирование прошлых лет было предназначено только для автоматизации отдельных агрегатов и машин — узлов технологического процесса.

Ясно, например, что если на тепловой электростанции установлены всевозможные стабилизирующие регуляторы, следящие и программные системы, то эту станцию все же нельзя оставить без наблюдения оперативного обслуживающего персонала, т. е., как говорят, «закрыть на замок». Тем более это нельзя сделать с энергосистемой, объединяющей ряд электрических станций. Дело в том, что в технологическом процессе станции или завода всегда имеется много звеньев, где требуются *логические действия*, которые не могут быть выполнены только решением трех указанных выше задач регулирования.

В энергосистеме нужен диспетчер — человек, управляющий энергосистемой. Согласование работы отдельных автоматизированных участков, выбор оптимальной настройки (уставки регуляторов), выбор программы их включения с учетом многочисленных данных и опыта работы и другие важные вопросы логического порядка по-прежнему должен был выполнять человек — диспетчер предприятия или системы.

Как бы хорошо ни были решены перечисленные три задачи (стабилизация, программное и следящее регулирование), все же этого недостаточно, чтобы объединить отдельные автоматизированные участки производства в единый автоматизированный комплекс.

ТЕХНИЧЕСКАЯ КИБЕРНЕТИКА — ОСНОВА КОМПЛЕКСНОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА

Использование элементов логического действия в кибернетике дало возможность резко расширить круг задач, решаемых системами автоматического регулирования.

Докибернетические системы автоматического регулирования имели постоянную уставку (для системы стабилизации), постоянную программу действия (для программных систем), одни и те же нелинейные зависимости, постоянный закон следования¹ (для следящих систем), постоянные ча-

¹ Законом следования следящей системы называется функциональная зависимость выходной величины от задания в установленном режиме. В кибернетических системах может автоматически изменяться как наклон характеристики, так и сама функциональная зависимость выходной величины от входной.

стотные характеристики и, наконец, постоянную структуру (схему) — все это до сих пор устанавливалось человеком при наладке, т. е. до пуска системы регулирования в действие. Идеи кибернетики дали новые решения задач регулирования, при которых системы сами находят оптимальную настройку, программу действия, закон следования, динамические качества или структуру и т. п. Впервые были поставлены и решены задачи самоизменения уставки, программы, параметров, нелинейностей, структуры и других характеристик системы. Эти задачи регулирования мы будем называть кибернетическими. Общим для всех решений этих задач явилось применение элементов логического действия с целью наилучшего *приспособления* системы к изменению внешних условий и внутреннего состояния системы.

Прежде чем продолжать рассмотрение вопроса о связи кибернетики и техники регулирования, выясним, что такое кибернетика в более широком смысле этого слова.

Слово «кибернетика» взято из греческого языка (кибернетес — рулевой). В классификации всевозможных наук, выполненной Ампером еще сто лет назад, квадрат с надписью «кибернетика» соответствовал «науке об административном управлении».

Современная кибернетика — наука о логическом управлении — возникла недавно, почти вместе с возникновением больших вычислительных машин и особенно в первое время была тесно связана с их применением.

Во время второй мировой войны известный американский ученый Норберт Винер [87] совместно с группой видных ученых работал в области военной автоматике. У него возникла мысль о сходстве целеустремленного действия многих автоматических установок и человека. Одним из примеров такой автоматической установки явился автоматический комплекс, состоящий из радиолокационной станции орудийной наводки (СОН), прибора управления артиллерийским зенитным огнем (ПУАЗО) и батареи зенитных орудий. В этом комплексе СОН производит поиск цели, а затем автоматически сопровождает ее. При автоматическом сопровождении цели станция сравнивает направление электрической оси антенны радиолокатора с направлением на цель и получающуюся при этом ошибку сопровождения использует для управления приводом вращения антенны. Текущие координаты цели с радиолокатора поступают на

ПУАЗО, который решает «задачу встречи снаряда с самолетом» и выдает упрежденные координаты на зенитные орудия.

Таким образом, было замечено, что удивительное свойство *целестремленного действия*, которое еще недавно приписывалось только живым существам, характерно также и для некоторых автоматических систем.

Всякое целестремленное действие связано с применением указанных выше двух принципов автоматического регулирования (управление по замкнутому и разомкнутому циклам или комбинированное управление). Никаких других принципов для целестремленного действия системы не требуется.

Целестремленность живых организмов приводит к разумным реакциям на внешние и внутренние возмущения.

Некоторые современные системы автоматического регулирования, называемые кибернетическими, благодаря наличию элементов логического действия часто обладают *свойством приспособления* к изменениям условий внешней среды и внутреннего состояния, сходным со свойством, которым обладают живые существа. Наличие такой общности свойств позволило провести известную аналогию между машинами и живыми существами. Наиболее сильную аналогию (сходство) можно установить между умственной деятельностью человека и действием сложных автоматических многоконтурных систем, способных к универсальному обучению (гомеостаты, перцептроны, системы «биологического» типа и др.).

Прогрессивное значение кибернетики состоит в том, что она позволяет связать многие разнообразные науки в единое целое и передать методы одной из них другим. Биологам кибернетика позволяет глубже понять процессы жизни, экономистам, технологам, плановикам и руководителям предприятий — лучше организовать производство и т. д.

Для техники кибернетика дает возможность создания более совершенных систем автоматического управления и регулирования. Эта часть кибернетики называется технической кибернетикой.

Советский ученый проф. В. В. Солодовников определяет техническую кибернетику как раздел кибернетики, занимающийся разработкой принципов построения и теорией машин, реализующих алгоритмы.

Ниже рассматриваются только устройства технической

кибернетики. В этой области *кибернетической системой мы будем называть всякую автоматическую систему регулирования и управления*, направленную на решение новых задач регулирования, более сложных, чем простые задачи стабилизации, программного и следящего регулирования.

Для решения кибернетических задач обычно требуется применение в системе элементов логического действия (ЭЛД), поэтому термины «кибернетическое управление» и «логическое управление» являются терминами, выражающими одно и то же понятие. При этом не обязательно связывать применение элементов логического действия с применением цифровых вычислительных машин, как это было в первое время после возникновения кибернетики. Ниже мы увидим, что элементы логического действия могут быть часто более простыми, надежными и дешевыми по сравнению с вычислительными машинами.

Между системами кибернетическими и некибернетическими невозможно провести четкую грань. Действительно, любой стабилизирующий регулятор также имеет простейшую логику действий: он включается в одну или другую сторону в зависимости от знака отклонения регулируемой величины (точнее от знака величины на входе усилителя Σ). Это дало основание некоторым авторам [66], [87] отнести все системы автоматического регулирования к кибернетическим.

Однако очевидно, что систему тем скорее можно назвать кибернетической, чем сильнее в ней развита функция логических действий, чем шире в ней применяются ЭЛД и чем сложнее задача, решаемая системой.

Поэтому следует назвать кибернетическими системы, выполняющие более сложные логические операции, чем простое реагирование на знак отклонения величины на входе усилителя, отличающиеся приспособлением своих характеристик к условиям работы системы.

Только в последние годы, с появлением технической кибернетики, решение вопроса о полной и комплексной автоматизации предприятий, систем, комбинатов и даже целых отраслей промышленности стало вполне реальным.

Техническая кибернетика дает наилучшее, а часто и единственно возможное решение задачи автоматического управления, при котором ряд автоматизированных участков объединяется в единую систему. В такой системе без элементов логического управления обойтись нельзя, а следовательно, нельзя обойтись без кибернетики.

Комплексная автоматизация включает в себя автоматизацию отдельных участков производственного процесса и соединение их между собой кибернетическими устройствами с ЭЛД.

Для того чтобы автоматизация была эффективной, она должна быть действительно комплексной, т. е. всеобщей и полной. Достаточно оставить хотя бы один участок производственного процесса неавтоматизированным, и эффективность автоматизации в целом резко снизится. Техническая кибернетика позволяет автоматизировать наиболее трудные участки. Поэтому она резко увеличивает эффективность старой докибернетической автоматики.

ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИИ БОЛЬШИХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Современная большая вычислительная машина выполняет три основные функции: а) записи очень большого числа команд и чисел (память машины); б) логических действий; в) счета [28].

Память вычислительных машин (осуществляемая при помощи электростатических трубок, магнитных лент и барабанов или при помощи конденсаторов и ферритовых элементов) очень велика. Машина легко может «запомнить» таблицу тригонометрических функций, таблицу логарифмов или большой ряд команд для осуществления определенной программы действий. Никакое другое устройство не обладает такой большой гибкостью и объемом записи программы. Только книга или даже целая библиотека, пожалуй, может сравниться по объему «памяти» с электронной машиной.

Логические действия машины занимают наиболее важное место при использовании вычислительной машины для цели автоматизации. Машина может сравнивать между собой большое число цифр, выбирать из них наибольшее или наименьшее число или число, менее всего отличающееся от заданной величины. Главное состоит в том, что в зависимости от задания (программы) при одних обстоятельствах машина действует определенным образом, а при других — иначе. Число обстоятельств, которые машина может учитывать при выборе своего действия, весьма велико.

Вычислительная функция машин очень развита. Быстродействие машин чрезвычайно высокое,

Новая машина «Стрейдж» (полет) рассчитана почти на два миллиона сложений в секунду (частота следования до 10^7 импульсов/сек). Под одной операцией понимается, например, сложение двух десятизначных чисел. Вполне реальным является создание машин со скоростью счета до четырех-пяти миллионов операций в секунду и выше.

Благодаря такому высокому быстродействию вычислительные машины способны сравнительно быстро выполнять расчеты, требующие огромной затраты труда вычислителей. Например, специализированная машина «Погода» решает большое число уравнений, необходимых для точного предсказания погоды, за два часа. Группа вычислителей из пяти — семи человек должна была бы затратить около 14 суток для решения той же задачи. Вычислительная машина может вычислить траекторию полета снаряда быстрее, чем сам снаряд совершит полет по этой траектории и т. д.

Несмотря на это, электронные машины работают почти круглосуточно и с большим запасом нагрузки, так как задачи, которые требуется решать, велики по объему.

Для задач автоматизации вычислительная функция машин имеет часто второстепенное значение. В связи с этим и сами машины, применяемые для автоматического управления, могут быть сильно упрощены, что, несомненно, уменьшает их стоимость и повышает надежность. Машины, в которых преобладают функции записи команд и логического действия, а функция вычисления используется мало, получили название *управляющих машин*.

Цифровые вычислительные машины с жесткой программой все же нельзя называть «электронным мозгом». Мозг приобретает свойство понимания обстановки только в результате обучения, к которому данные машины не способны.

АВТОМАТИЗАЦИЯ НЕКОТОРЫХ ФОРМАЛЬНЫХ ВИДОВ УМСТВЕННОГО ТРУДА ЧЕЛОВЕКА

Вычислительные устройства являются первыми устройствами, предназначенными для автоматизации некоторых видов умственного труда человека.

Наблюдая логическое действие различных автоматических установок и особенно больших вычислительных машин, Норберт Винер и его сотрудники поставили вопрос: нельзя ли поручить цифровым вычислительным машинам некоторые формальные виды умственного труда человека?

Чтобы ответить на этот вопрос, был сначала создан ряд весьма любопытных установок — машин-игрушек. Следует отметить, что создание таких игрушек позволило сделать далеко идущие и весьма серьезные выводы.

Машины, сравнивающие большое число возможных вариантов и выбирающие один из них

Примером таких машин является машина, играющая в шашки и шахматы. Конечно, при создании этой машины никто не собирался заменить ею шахматистов. Важность эксперимента состояла именно в выяснении возможностей области автоматизации умственного труда человека.

Как выглядит и как действует машина, играющая в шахматы?

Возьмем для примера машину Манчестерского университета (МУК). Как всякая вычислительная машина, МУК представляет собой зал, заполненный шкапами с электронной аппаратурой. В центре зала находится пульт управления, за которым работает оператор-человек. Шахматист, играющий с машиной, сообщает ход оператору (например, e2—e4). Оператор нажимает соответствующие кнопки на устройстве ввода машины. Через некоторое время машина сообщает свой ответный ход, печатая его на бумажной ленте.

Если шахматист сделал грубую ошибку, машина делает ему замечание (также печатает на бумаге). При повторении ряда ошибок машина отказывается дальше играть с неумелым партнером. В случае выигрыша МУК играет гимн.

Действует машина сравнительно просто. Каждая потеря и каждое приобретение фигуры оценивается определенной цифрой. Например, потеря пешки принимается за единицу, сдвоенная пешка — за половину, потеря слона — за пять единиц и т. п. Машина просчитывает большое число вариантов игры (в самом начале игры таких вариантов 400, а дальше их число весьма быстро возрастает). При наличии большого быстрогодействия машина успевает подсчитать сумму потерь и сумму приобретений на пять-шесть ходов вперед для всевозможных комбинаций, сравнивает между собой полученные числа, выбирает ход, дающий наибольшее превышение суммы приобретений над суммой потерь и печатает его на ленте.

Так как при всех своих возможностях машина все же не может просчитать всех комбинаций в начале и середине игры, то здесь она может сделать ошибку, зато в конце игры машина играет безукоризненно. Здесь, если выигрыш возможен, машина обязательно выигрывает. Нет такой шахматной задачи (имеющей решение), которую МУК не могла бы решить. Однако на решение некоторых задач уходит до 15 мин. времени, так много вариантов приходится просчитывать машине.

На популярных лекциях о кибернетике часто задают вопрос: кто выиграет, если будут играть между собой две одинаковые машины? Такой опыт, по-видимому, еще не проводился. Скорее всего в результате игры будет ничья, так как силы противников равны. Если играют машины разных типов, то выигрывает та, у которой объем памяти больше.

Практическое применение машин с отбором наилучшего варианта

Опыт с машиной, играющей в шахматы, показал, что вычислительные машины с успехом могут решать *логическую задачу выбора наилучшего решения из большего числа возможных решений.*

Машина, играющая в шашки и шахматы, является машиной-игрушкой. Посмотрим, какие важные применения может найти такая машина в промышленности.

Мы уже говорили о работе диспетчера энергосистемы. Он на основании точных данных и часто на основании интуиции решает важные вопросы: какие генераторы и в каком объеме должны покрыть потребность потребителей в электроэнергии, какие линии связи системы должны быть включены и т. д. Машина-диспетчер значительно точнее, чем человек, может просчитать сумму потерь и сумму приобретений для многочисленных вариантов включения и выбрать оптимальное решение. Система, управляемая автоматическим оператором, относится к разряду систем, автоматически отыскивающих оптимальную структуру. К этим системам мы вернемся ниже.

Как известно, расчет профиля крыла самолета представляет сложную задачу. Конструкторское бюро практически может просчитать и сравнить между собой несколько десятков вариантов профиля. Машина, обладающая большой

производительностью, просчитывает несколько десятков тысяч вариантов профиля и выбирает наилучший.

Чрезвычайно важной является перспектива применения управляющих машин для планирования, оргтехники, выбора технологических циклов, решения задач экономики и других сложных задач, требующих просчета большого числа возможных вариантов. В Бостоне имеется автоматизированный банк, в котором вычислительная машина заменила собой 1600 служащих.

Целая армия плановиков, экономистов, технологов, бухгалтеров, счетоводов, контролеров и других служащих занята однообразной и кропотливой работой. Увеличение числа людей, занятых на такой работе, не улучшает дело, так как аппарат планирования становится слишком инерционным, недостаточно гибким. Существует такая дилемма: если расчеты нужно производить в срок, быстро, придется снижать точность расчета, пользуясь средними данными.

Вычислительные машины должны резко повысить эффективность работы, сократить аппарат, увеличить скорость и точность. Особенно эффективным будет применение машин для планирования в новых экономических районах.

Ограничимся только указанными тремя примерами (диспетчер, расчет крыла самолета, планирование). Но и этих примеров достаточно, чтобы показать разнообразие задач и практическое значение машин, позволяющих просчитать большое число вариантов и выбрать наилучшее решение.

Уместно отметить первое важное отличие действий машин, играющей в шахматы, от человека. Машина с жесткой программой действует только на основании определенных точных данных, просчитывая огромное число вариантов. Человек продумывает небольшое число наиболее перспективных вариантов, часто действует по интуиции и нередко ограничивается приближенной оценкой. На основании интуиции человек отбрасывает большое число малоперспективных вариантов.

Рассмотренная выше машина вовсе не имеет интуиции, она имеет только точные данные. Можно ли придать машине интуицию, чтобы она сразу отбросила малоперспективные варианты и производила сравнение только небольшого их числа? Придание элементов интуиции сразу увеличило бы быстродействие машины, хотя, может быть, и снизило точность выбора наилучшего хода. Оказывается,

что в этом направлении можно сделать многое. Этот вопрос обсудим ниже, при рассмотрении так называемых самоулучшающихся вероятностных систем.

Машины, действующие по программе

Весьма интересно применение устройств электронной и других типов памяти в системах программного управления станками.

В Институте физики АН УССР канд. техн. наук Г. А. Спыну разработал аппарат для управления металлообрабатывающим станком, точно повторяющий много раз все команды опытного рабочего.

Рабочий обрабатывает только первую деталь, последующие обрабатывает автомат. Так как команды записываются на магнитный барабан, то очень легко стереть запись и нанести новую серию команд, если это требуется.

Серьезное промышленное значение получают системы цифрового управления металлообрабатывающими станками. В них программа записывается на бумаге или магнитной ленте в виде двоичных чисел. Станок в целом представляет собой систему программного управления, в которой движение резцов точно воспроизводит программу (ошибка не превышает 0,01 мм).

Разработка одной из таких систем производится в лаборатории автоматического регулирования Института электротехники АН УССР.

Машины, подбирающие слова и звуки по определенным, заранее заданным правилам (алгоритмам) или критериям

Наряду с машинами с отбором наилучшего варианта были созданы машины-игрушки, служащие для подбора слов, звуков и других элементов по определенным правилам (алгоритмам).

Известна машина для перевода технических текстов с одного языка на другой. Такой перевод был осуществлен и на советской машине БЭСМ [47]. Машина выиграла соревнование с тремя опытными переводчиками, т. е. она перевела текст лучше и быстрее. Возможно создание машины — литературного редактора. Были осуществлены опыты по созданию автоматов для сочинения простых однообразных

текстов (60 писем в час), простых стихов и, наконец, машины, сочиняющей простые однообразные мотивы (фирмы Барроу, 1000 танцевальных пластинок в час).

Качество и сложность таких сочинений во многом зависят от таланта и знаний людей, конструирующих машину.

Для нас важно отметить, что при конструировании машин, подбирающих элементы (например, слова, звуки и т. д.), можно использовать два принципа, как и при создании других автоматических систем. По первому из них элементы подбираются в соответствии с заранее заданным правилом (аналог регулирования по возмущению), по второму — элементы подбираются наугад (или в определенном порядке) и оценивается эффект, даваемый каждым из них в сочетании с соседними элементами (аналог регулирования по отклонению).

По первому принципу работает рабочий исполнитель, собирающий, например, мозаику по номерам ее квадратов. По второму — работает художник, подбирающий и непрерывно сравнивающий сочетание цветов. Возможно создание комбинированных автоматов, объединяющих оба принципа одновременно. Разработка теории таких автоматов только начата.

МОЖЕТ ЛИ МАШИНА ДОСТИЧЬ ИЛИ ПРЕВЫСИТЬ ВОЗМОЖНОСТИ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО МОЗГА?

Высокое развитие современной науки и техники в области автоматизации позволили создать машины, заменяющие диспетчера энергосистемы, опытного сталевара, бухгалтера, переводчика и т. д.

Смогут ли машины¹ взять на себя более творческий труд, например, труд писателя или композитора?

В книге П. Косса² возможность создания самовоспроизводящихся и обучающихся систем, подобных живым существам, отрицается. Человек будто бы *принципиально* не может искусственно создать условия для возникновения самоуправяемого процесса, в результате которого образуется система-аналог мозга человека.

¹ Здесь машина рассматривается в широком смысле слова, с включением в это понятие кибернетических машин, способных к «обучению» (например, перцептрон).

² «Кибернетика», Изд-во И. Л., М., 1958,

По нашему мнению, такого принципиального ограничения возможностей человека нет. Однако может оказаться, что подобная задача никогда не будет решаться человеком, если, например, будет выяснено, что для ее решения требуется слишком много элементов или слишком длительное время, измеряемое, например, тысячами лет. Такой опыт может оказаться нерациональным даже для будущего общества. На поставленный вопрос так же трудно ответить, как и на вопрос о том, сможет ли человек искусственно создать живое вещество и, более того, выращивать из него искусственные растения или разумных животных. Принципиально такая фантазия осуществима.

Ученым уже удалось осуществить синтез наиболее простых белков, например, синтезировать окситоцин, простой белок из девяти аминокислот. Установлена молекулярная структура инсулина — белкового гормона. Сейчас ученые усиленно работают над выяснением структуры нуклеиновых кислот, многочисленные особенности которых определяют законы наследственности. Зная последовательности соединения молекул нуклеиновых кислот, ученые смогут выбирать носителей определенных наследственных признаков, т. е. по своему усмотрению управлять развитием организмов, создавать не только новые их качества, но и совершенно небывалые растения и животных. Эволюция видов может быть ускорена. При выборе требуемых структур из огромного числа возможных большую пользу окажет кибернетика: специализированные вычислительные машины помогут решить задачу оптимального выбора¹.

Действие мозга человека и действие вычислительных машин основаны на одном и том же дискретном принципе работы «да» — «нет». Нервная клеточка может быть только возбуждена или не возбуждена. Триггерная ячейка может быть только открыта или закрыта.

Современные вычислительные машины имеют слишком грубое устройство.

Мозг человека содержит около 10^{10} нервных клеток, в то время как современная вычислительная машина содержит всего несколько тысяч триггерных ячеек. По своим возможностям в смысле передачи большого числа понятий современная машина стоит на уровне нервной системы

¹ См. Сборник «Проблемы кибернетики», под ред. А. А. Ляпунова, 1958.

майского жука, ибо имеет столько дискретных элементов, сколько нервных клеток в среднем имеет насекомое [52].

В будущем человек научится значительно расширять число элементов и тем самым возможности машин возрастут. Уже сейчас обсуждаются проекты выращивания триггерных ячеек в растворах, подобно кристаллам. Структура будущих машин будет такой же однородной, как и структура мозга (см. раздел о «биологических» системах).

Успех современных машин в области автоматизации умственного труда объясняется тем, что рядом с ней находится управляющий ею человек и она направлена человеком на решение узкой задачи (например, машина, играющая в шахматы, не может без существенной перестройки переводить тексты и наоборот). Нетрудно доказать, что в некоторых узких задачах машина уже сейчас может достичь и далеко превзойти возможности умственного труда человека. Например, машина может значительно быстрее, точнее и без ошибок просчитать большое число вариантов и выбрать лучший из них. В дальнейшем число таких специализированных применений машин будет возрастать. Все же аналогия между устройством и действием машины и мозга не может перейти в полное тождество. Элементы сходства, несомненно, с развитием техники будут увеличиваться, но одновременно будут развиваться и специфические особенности (отличия) машин. Машина и мозг всегда будут иметь различие, так же как и искусственные живые организмы, которые создаст человек в будущем из искусственного белка, будут во многом отличаться от животных, созданных природой.

Развитие техники уже не раз сметало всякие ограничения, которые будто бы кибернетика не может преодолеть.

Сначала многие недооценивали возможности кибернетики, говорили, что нельзя создать машину, действующую вне определенного правила (алгоритма). В дальнейшем оказалось, что машины могут решать задачи, не имеющие алгоритма. Утверждали также, что нельзя создать систем, способных обобщать сведения, способных «обучаться». Однако благодаря развитию техники появились самоулучшающиеся вероятностные машины, способные «обучаться», т. е. изменяющие свое поведение в зависимости от обстоятельств. Наконец, стали утверждать, что в соответствии с теоремой Геделя (из математической логики) [30], [49], [58] и [63] машина не может сама расширять круг исходных положений.

ний (аксиом), на которых основано ее действие, поэтому в ряде логических задач машины будто бы никогда не смогут заменить человека. Создание вероятностных машин с беспорядочным статистическим подбором требуемого результата опровергает и это утверждение (см. описание системы «перцептрон»).

Последнее ограничение (еще не снятое развитием техники машин) состоит в том, что будто бы машины принципиально не могут решать задачи, которые нельзя *формализовать*, т. е. условия которых нельзя записать в виде каких-либо цифр, букв или знаков. Человек же, пользуясь как знаниями (точными данными), так и интуицией, может решать такие задачи, как, например, выбор специальности, друга, выработка мнения, предпочтения и т. п. (хотя возможность ошибок при отсутствии точных данных возрастает). Будущее покажет, смогут ли машины решать задачи, не поддающиеся формализации, так как работа в этом направлении проводится.

НЕКОТОРЫЕ ОСНОВНЫЕ ИДЕИ КИБЕРНЕТИКИ

Из примеров практического применения кибернетических устройств, приведенных выше, следует, что кибернетика имеет огромное значение в развитии техники.

В результате экспериментов с машинами-игрушками (такими, как машины, играющие в шахматы и др.) было установлено, что машины могут заменить человека при выполнении им некоторых видов умственного труда.

В ближайшем будущем, по-видимому, мы будем свидетелями серьезного изменения средств и организации производственных процессов, вызванного широким применением все более и более развитых машин, автоматизирующих труд человека и выполняющих эту работу точнее и быстрее, чем человек.

Многочисленные и разнообразные опыты и математический анализ позволили установить основную идею кибернетики о сходстве (но не тождестве!) между понятием энтропии и понятием информации.

Понятие *энтропии* знакомо нам из термодинамики. Однако в кибернетике это понятие значительно расширяется, принимает более широкий смысл и значение.

Энтропия понимается как мера вероятности состояния, усреднения, мера дезориентации элементов, мера хаоса.

Математическую оценку энтропии кибернетика берет из термодинамики, а именно из второго ее начала, установленного Больцманом,

$$H = \left(n_1 \ln \frac{n_1}{N} + n_2 \ln \frac{n_2}{N} + n_3 \ln \frac{n_3}{N} + \dots \right) \frac{1}{N},$$

где H — энтропия, вероятность заданного распределения скоростей молекул в замкнутом объеме;

N — общее число молекул;

n_1 — число молекул, имеющих скорость $v_1 + \Delta v$;

n_2 — число молекул, имеющих скорость $v_2 + \Delta v$;

n_3 — число молекул, имеющих скорость $v_3 + \Delta v$ и т. д.

Информации в кибернетике придается также более широкий смысл. Информация понимается как мера особенности состояния, мера упорядочения, порядка.

Кибернетика обращает наше внимание на одно из диалектических противоречий, существующих в окружающем нас мире, — на противоречие между энтропией и информацией, между хаосом и порядком. Кибернетика вполне согласуется с материалистической диалектикой.

Увеличение энтропии связано со снижением информации и наоборот. Прирост информации измеряется величиной снижения энтропии. По Н. Винеру, хаос непрерывно борется с порядком, причем человек стремится увеличить информацию, а природа пассивно сопротивляется этому¹.

Давно уже установлено, что второй закон термодинамики (все процессы в окружающей нас природе происходят так, что энтропия непрерывно увеличивается) действителен только в среднем, т. е. имеет статистический характер. Вполне возможны местные отклонения от второго закона, возможно местное снижение энтропии и, следовательно, увеличение информации. Винер [87] пишет, что кибернетика имеет целью открыть общие законы, по которым в некоторых местах Вселенной происходит местное убывание энтропии.

Интересно отметить, что весьма сходные мысли высказывались также проф. С. И. Тетельбаумом [60], [61].

Там, где действует человек, вполне зримо происходит убывание энтропии (в широком кибернетическом смысле слова). Кристаллы, растения, живые существа, человек

¹ См. Н. В и н е р, Кибернетика и общество, Изд-во И. Л., 1958.

и созданные им машины-автоматы являются центрами увеличения порядка, информации, т. е. убывания энтропии. Автомат, как и человек, участвует в создании информации. Это обстоятельство дало возможность Винеру убедительно показать аналогию действия человека и машины-автомата.

В дальнейшем оказалось, что эта аналогия еще глубже: структура нервных цепей человека, как и структура связей автоматике, зиждется на одних и тех же двух принципах управления по разомкнутому и замкнутому циклам.

Кроме того, оказалось, что и процессы в этих цепях и связях сходны: накопление и переработка информации имеет дискретный характер (принцип «да—нет»). Нервные клетки, как и триггеры вычислительных машин, могут иметь только два состояния — могут быть возбуждены или нет.

Доказано, что при помощи большого числа таких дискретных элементов можно передать самые тонкие понятия.

Например, для передачи оттенка краски в виде условного числа достаточно указать при помощи этого числа место, которое занимает данный оттенок в солнечном спектре (радуге) или «цветовом круге». Другие более убедительные примеры можно найти в популярных статьях по кибернетике [49], [30], [58], [63].

Теория информации и автоматическое регулирование

Одним из разделов технической кибернетики является общая теория связи, называемая также теорией информации.

Не имея возможности излагать здесь подробно теорию информации, рассмотрим наиболее важные положения применительно к задачам автоматического регулирования.

Теория информации изучает вопросы передачи воздействий (сигналов) от одного элемента системы к другому по имеющимся в системе связям. Как известно, большинство систем автоматического регулирования обладает так называемым направленным действием: воздействия передаются в системе только в одном направлении. При этом один из элементов системы является *датчиком воздействия* по отношению к последующему элементу, который таким образом служит приемником воздействия. Между датчиком и приемником может находиться ряд элементов, образующих *связь* (канал или линию связи).

Эффективность и помехоустойчивость (точность) связи

Важной характеристикой связи является ее эффективность, под которой понимается количество информации в виде определенных сигналов, которое можно передать по данной связи в единицу времени. Чем уже полоса частот, используемая для передачи сигнала, чем скорее передается сигнал и чем меньше затрат энергии, тем выше эффективность связи. Эффективность связи зависит от принципа действия системы, аппаратуры и типа кода сигналов.

Другой важной характеристикой связи является ее помехоустойчивость, определяющая собой точность передачи воздействий при наличии помех.

Эффективность связи и ее помехоустойчивость находятся в противоречии: чем больше помехоустойчивость, тем меньше эффективность связи.

Некоторой обобщенной средней характеристикой связи является ее пропускная способность, определяющая собой эффективность при заданной точности передачи сигнала.

Объем сигнала и пропускная способность связи

Все практические каналы связи подвержены действию различного рода помех. Поэтому среди основных показателей воздействия (сигнала) обязательно следует учитывать относительный средний уровень сигнала

$$H_c = \log_2 \frac{P_c}{P_{\text{пом}}},$$

где P_c — мощность сигнала, $P_{\text{пом}}$ — мощность помехи на выходе связи.

Кроме того, сигнал характеризуется длительностью T_c и полосой частот Δf_c .

Обобщенной характеристикой сигнала является произведение

$$V_c = H_c T_c \Delta f_c,$$

называемое объемом сигнала.

Канал связи, в свою очередь, характеризуется произведением, определяющим пропускную способность связи

$$V_k = H_k T_k \Delta f_v$$

где H_k — логарифм допустимого диапазона изменений мощности;

T_k — время действия канала связи;

Δf_k — полоса пропускаемых частот.

Для того чтобы канал связи мог пропускать данный сигнал без искажений, необходимо, чтобы

$$V_k \geq V_c.$$

Так как величины Δf_c и Δf_k могут быть определены только приближенно (имеются «хвосты» характеристик), то каждый канал связи вносит искажения. Чем больше отношение $\frac{V_k}{V_c}$, тем выше точность передачи и помехоустойчивость, но тем ниже эффективность использования данного канала связи.

Помехоустойчивость (определяемая в большинстве случаев отношением сигнал/помеха на выходе системы) повышается с увеличением величины, называемой избыточностью,

$$i = \left(1 - \frac{1}{\frac{V_k}{V_c}} \right)$$

по экспоненциальному закону. При достаточно большом $\frac{V_k}{V_c}$ помехоустойчивость пропорциональна избыточности.

Сохраняя постоянство $\frac{V_k}{V_c}$, можно «обменять» уменьшение диапазона частот на увеличение диапазона мощности или удлинение времени передачи и т. д. Например, если линия пропускает только частоты до 3000 гц, а нужно передать запись на магнитной ленте, содержащей частоты до 12 000 гц, то достаточно снизить скорость передачи в четыре раза с тем, чтобы при воспроизведении снова увеличить скорость также в четыре раза. Таким способом можно почти без искажений при заданном отношении $\frac{V_k}{V_c}$ передать высококачественную запись по узкополосной линии.

Одной из основных задач, решаемых в теории информации, есть задача компромиссного выбора наилучшего соотношения помехоустойчивости (точности) и эффективности связи, т. е. задача выбора отношения $\frac{V_k}{V_c} = \text{const}$.

В. А. Котельниковым создана теория потенциальной (предельно достижимой) помехоустойчивости [31]. Ока-

зывается, что для каждого вида аппаратуры связи (для каждого вида модуляции) существует определенная предельно достижимая помехоустойчивость. Лучше тот вид модуляции, при котором этот предел больше.

Измерение количества информации

В качестве единицы информации обычно принимают так называемую *двоичную единицу информации*.

Эта единица представляет собой количество информации, получаемой в результате однократного выбора из двух равновероятных возможностей.

Количество информации, получаемое в результате определения одного из двух равновероятных результатов, равно единице информации. Количество информации, получаемое в результате определения одного из четырех равновероятных результатов, равно двум единицам информации. Количество информации, получаемое в результате определения одного из восьми равновероятных результатов, равно трем и т. д.

Предположим, нам нужно при помощи двоичного числа выразить красный цвет. Расположим все цвета радуги по кругу и разделим его пополам. Нахождение красного цвета сверху и снизу черты равновероятно. Первая цифра 1, допустим, показывает, что красный цвет расположен сверху от делящей черты. Это дает нам единицу информации. Разделим верхний полукруг еще пополам. Цифра 0 покажет нам, что красный цвет слева (в левом верхнем квадранте). Разделим этот квадрант еще пополам: цифра 1 показывает, что красный цвет снова справа и т. д. Итак, цифра 10110... дает нам информацию о том, где находится красный цвет, т. е., другими словами, выражает красный цвет при помощи некоторого числа единиц двоичной информации. Чем больше мы будем делить круг, тем более точной будет информация. Число единиц информации равно числу разрядов (знаков) двоичного числа, которым может быть передана данная информация. В общем виде число двоичных единиц информации можно определить по формуле

$$I = \log_2 N,$$

где N — число равновероятных событий (в данном примере — число делений цветового круга);

I — число единиц информации.

Реально при передаче информации мы часто имеем дело с событиями неравновероятными. Например, буква «а» встречается в русском языке значительно чаще буквы «ю». В случае неравновероятных событий число единиц информации подсчитывается по формуле

$$I = -(p_1 \log_2 p_1 + p_2 \log_2 p_2 + \dots + p_n \log_2 p_n) \approx \\ \approx -\left(n_1 \log_2 \frac{n_1}{N} + n_2 \log_2 \frac{n_2}{N} + \dots + n_n \log_2 \frac{n_n}{N}\right) \frac{1}{N},$$

где p_1, p_2, \dots, p_n — вероятности¹ событий 1, 2, ..., N ;

I — информация (в двоичных единицах);

N — общее число сообщений (событий);

n_1 — число сообщений с характеристикой v_1 ;

n_2 — число сообщений с характеристикой v_2 ;

n_3 — число сообщений с характеристикой v_3 и т. д.

Аналогия структур формул для подсчета энтропии и информации очевидна.

Зависимость количества информации от вероятности сообщения

Пользуясь формулами, подсчитываем количество информации в следующих трех случаях:

а) сообщение, вероятность которого равна единице («зимой холодно», «дважды два четыре» и др.), не содержит информации

$$I = -p_1 \log_2 p_1 = -1 \log_2 1 = 0;$$

б) сообщение, вероятность которого равна нулю («дважды два не пять» и др.), также не содержит информации

$$I = -p_2 \log_2 p_2 = -0 \log_2 0 = 0;$$

в) сообщение, вероятность которого равна $p = 0,5$, содержит наибольшее количество информации, равное единице.

¹ Вероятностью p события называется отношение числа данных событий (например, появление буквы «а» в сообщении) к общему числу событий (букв) при достаточно большом числе событий:

$$p_1 = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{n_1}{N}, \quad p_2 = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{n_2}{N} \quad \text{и т. д.}$$

В данном случае.

$$p_1 = p_2 = 0,5, \quad p_1 + p_2 = 1, \\ I = -[0,5 \log_2 0,5 + 0,5 \log_2 0,5] = 1.$$

Кривая зависимости количества информации от вероятности данного сообщения имеет максимум в точке $p = 0,5$.

Теорема В. А. Котельникова

Можно ли при помощи одиночных импульсов точно передать непрерывную функцию времени? Оказывается, можно при определенном выборе частоты следования импульсов.

Пусть, например, известно, что функция состоит из постоянной составляющей и синусоиды с частотой f , причем амплитуда синусоиды достаточно медленно изменяется. Нетрудно убедиться, что для точной передачи такой функции достаточно измерить ее значения через интервалы времени $\Delta t = \frac{1}{2f}$ (один раз за полпериода). Любые две точки синусоиды дают возможность определить ее амплитуду и фазу (период считаем известным).

Рассмотрим еще пример. Пусть известно, что непрерывная функция времени состоит из постоянной составляющей, первой и второй гармоник с медленно изменяющимися амплитудами или фазами

$$f(t) = a + a_1(t) \sin [2\pi ft + \beta_1(t)] + a_2(t) \sin [2\pi 2ft + \beta_2(t)].$$

В этом случае для точной передачи такой непрерывной функции при помощи одиночных импульсов достаточно сделать измерения через $\Delta t = \frac{1}{4f}$. Любые четыре точки дают возможность определить амплитуды и фазы a_1 и β_1 , a_2 и β_2 .

Теорема В. А. Котельникова и устанавливает, что непрерывная функция с частотным спектром, ограниченным высшей частотой $f_{\text{макс}}$, может быть точно представлена конечным числом ее значений, отсчитанных через интервал времени

$$\Delta t = \frac{1}{2f_{\text{макс}}}.$$

Эта теорема позволяет непрерывную информацию сводить к дискретной и определять число двоичных единиц информации в непрерывной функции.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

Помехи, действующие на каналы связи (а часто и сами входные сигналы), имеют случайный характер. Предсказать точно их изменение во времени невозможно, зато статистические (средние) изменения этих величин поддаются точному вычислению.

Это определяет необходимость применения математического аппарата теории случайных статистических функций, тесно связанной с теорией вероятностей.

Эта теория имеет два раздела: теорию случайных величин и теорию случайных процессов.

Краткие сведения из теории случайных величин

Числа на верхней грани кубика лото, интервалы времени между приходами машин такси на стоянку, номер выигравшего билета лотереи могут служить примерами случайных величин. Допустим, что мы наблюдаем изменение какой-либо величины, например, величины тока в электрической цепи, происходящее независимо от нас по случайной причине (например, из-за наличия плохого контакта в цепи). Допустим также, что ток может принимать только два определенных (дискретных) значения $i_1 = 0$; $i_2 = 5a$. Значения тока записываются нами через одну секунду. В таких условиях значение тока является случайной величиной. В результате наблюдения в течение некоторого времени, равного, например, 10 сек., мы зарегистрировали, что ток принимал значение i_1 четыре раза ($n_1 = 4$), а значение i_2 — шесть раз ($n_2 = 6$). Общее число наблюдений $N = 10$. Отсюда мы можем определить величину, называемую частотой повторения.

Частота повторения первого значения $f_1 = \frac{n_1}{N} = \frac{4}{10} = 0,4$.

Частота повторения второго значения $f_2 = \frac{n_2}{N} = \frac{6}{10} = 0,6$.

Если мы будем продолжать опыт очень долго, то при $N \rightarrow \infty$ определим другую важную величину, называемую *вероятностью событий*.

Вероятность первого значения

$$p_1 = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{n_1}{N}.$$

Вероятность второго значения

$$p_2 = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{n_2}{N}.$$

Если $p_1 = 0$, то это означает, что первое событие невозможно. Наоборот, $p_1 = 1$ означает, что имеет место всегда только первое событие.

Случайные величины, конечно, могут принимать не два, а множество (m) значений. Сумма вероятностей всевозможных событий равна единице

$$p_1 + p_2 + \dots + p_m = 1.$$

Если мы наблюдаем изменение случайной величины в течение сравнительно короткого времени, то можем определить *среднее значение* за это время

$i_{\text{средн}} = (f_1 i_1 + f_2 i_2 + \dots + f_m i_m) = (0,4 \cdot 0 + 0,6 \cdot 5) = 3a$.
Переходя к пределу (что означает длительное время наблюдения), находим величину, называемую *математическим ожиданием*,

$$M(i) = \lim_{N \rightarrow \infty} (f_1 i_1 + f_2 i_2 + \dots + f_m i_m) = p_1 i_1 + p_2 i_2 + \dots + p_m i_m = \sum_1^m p_i i_i.$$

При достаточно длительном наблюдении математическое ожидание равно среднему значению.

Рассмотрим теперь результаты другого опыта. Пусть, например, ток принимает не два, а несколько значений соответственно табл. 1.

Среднее (арифметическое) значение тока (или его постоянная составляющая) равно

$$M(i) \approx i_{\text{средн}} = \frac{2 + 10 + 0 - 2 + 3 + 9 + 10 + 5 + 0 + 1}{10} = 4,0a.$$

Действующее значение переменной составляющей, называемое также среднеквадратичным отклонением, равно

$$\begin{aligned} \varepsilon(i) = i_{\text{действ}} \sim &= \sqrt{M(i^2) - M^2(i)} = \\ &= \sqrt{\frac{4 + 100 + 0 + 4 + 9 + 81 + 100 + 25 + 0 + 1}{10} - 16} = \\ &= 4,05 a. \end{aligned}$$

Квадрат среднеквадратичного отклонения (т. е. квадрат действующего значения переменной составляющей) носит название *дисперсии*

$$D = \varepsilon^2 = 4,05^2 = 16,4 \text{ а}^2.$$

Дисперсия показывает, насколько сильно отличается случайная величина от своего среднего значения (от математического ожидания).

Изменение случайной величины называется стационарным, если математическое ожидание $M(i)$ и среднеквадратичное отклонение $\varepsilon(i)$ остаются постоянными и не изменяются во времени. Кроме того, при этом постоянно и так называемое распределение вероятностей по значениям случайной величины.

Рассмотрим еще *распределение вероятностей* случайной величины (отклонения тока), которая принимает определенные дискретные значения. Подсчитаем сначала частоту повторения.

В нашем опыте отклонения тока принимали значения, приведенные в табл. 1.

Таблица 1
Значения отклонений тока

№ измерения	Время (в сек.)	Ток (в а)	Отклонение от среднего значения (в а)	Квадрат тока (в а ²)
1	1	2	-2	4
2	2	10	+6	100
3	3	0	-4	0
4	4	-2	-6	4
5	5	3	-1	9
6	6	9	+5	81
7	7	10	+6	100
8	8	5	+1	25
9	9	0	-4	0
10	10	1	-3	1

Таблица 2

Частота повторений результатов измерения тока

Отклонение тока от среднего значения (в а)	Число отклонений	Частота повторения
$i_1 = -2$	$n_1 = 1$ раз	$f_1 = 0,1$
$i_2 = +6$	$n_2 = 2$ »	$f_2 = 0,2$
$i_3 = -4$	$n_3 = 2$ »	$f_3 = 0,2$
$i_4 = -6$	$n_4 = 1$ »	$f_4 = 0,1$ и т. д.

Данные табл. 2 характеризуют распределение частоты повторения. Если продолжать опыт очень долго, то таким же способом найдем *распределение вероятностей* по значениям отклонения тока. Это распределение можно записать следующим образом:

$$i_1 = -2 \text{ имеет вероятность } p_1 = 0,1;$$
$$i_2 = +6 \text{ имеет вероятность } p_2 = 0,2 \text{ и т. д.}$$

Основные теоремы теории вероятностей¹

Два события называются несовместимыми, если они не могут произойти оба одновременно.

Если достоверно известно, что происходит каждый раз одно из n взаимно несовместимых событий, то эта группа событий называется *полной группой*.

Появление одного из этих событий обязательно.

Теорема сложения. Если заданы вероятности появления некоторых несовместимых событий, то вероятность того, что произойдет хотя бы одно из них, равна сумме вероятностей этих событий.

Теорема умножения. События называются независимыми, если появление одного из них не изменяет распределения вероятностей других событий. Если заданы вероятности появления некоторых независимых событий, то вероятность того, что эти события произойдут одновременно, равна произведению вероятностей этих событий.

Закон больших чисел. Если случайные величины взаимно независимы, имеют одинаковые средние значения и конечные дисперсии, то вероятность отклонения их средних значений от математического ожидания на величину, большую $\varepsilon > 0$, стремится к нулю при $N \rightarrow \infty$ (N — число испытаний) как бы мало ни было ε .

Краткие сведения из теории случайных процессов

В рассмотренном в предыдущем разделе опыте ток принимал отдельные (дискретные) случайные значения в равноотстоящие моменты времени. Чаше мы имеем дело с непрерывным плавным изменением случайной величины во времени. Такое изменение носит название *случайного процесса*.

Понятия среднего значения и математического ожидания, среднеквадратичного отклонения и дисперсии в

¹ Е. С. Венцель, Теория вероятностей, 1958.

каждый заданный момент времени сохраняют свой смысл и для случайного процесса.

Среднее значение и математическое ожидание $f(t) = i(t)$ выражается такими формулами:

$$i_0 = \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} i(t) dt,$$

$$M(i) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} i(t) dt.$$

Переменная составляющая $\Delta f(t) = \Delta i(t)$ характеризуется выражениями:

$$\varepsilon(i) = \sqrt{M(i^2) - M^2(i)} = \sqrt{\frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} \Delta i^2 dt}, \text{ где } \Delta i = i - i_0,$$

$$D(i) = \varepsilon^2(i) = M(i^2) - M^2(i) = \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} \Delta i^2 dt.$$

Случайный процесс называется стационарным, если $M(i) = \text{const}$ и $\varepsilon(i) = \text{const}$, кроме того, распределение вероятностей не зависит от времени.

Обратим внимание на то, что понятия среднего значения i_0 и математического ожидания $M(f)$ выражают собой постоянную составляющую функции. Понятия среднеквадратичной ошибки ε и дисперсии D связаны только с переменной составляющей $\Delta f(t)$. Кривая распределения (плотности) вероятности $W(f)$ связана со всей функцией.

Вместо распределения вероятности по значениям случайной величины, состоящего из отдельных точек, получим плавную непрерывную кривую

$$p = W(i),$$

называемую кривой плотности распределения вероятностей.

Очень часто кривая плотности распределения вероятностей выражается при помощи закона Гаусса, называемого также законом нормального распределения,

$$p = W(i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\varepsilon}} e^{-\frac{(i-i_0)^2}{2\varepsilon^2}},$$

где $e \approx 2,71$ — основание натуральных логарифмов.

Кривая плотности распределения вероятностей случайной величины, распределенной по нормальному закону, показана на рис. 1.

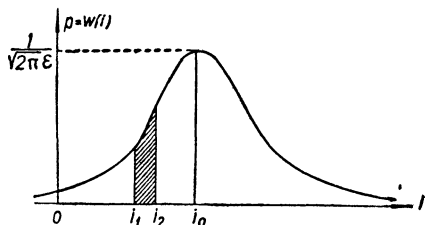


Рис. 1. Кривая плотности распределения вероятностей случайной величины по нормальному закону.

Для этого нужно найти площадь, лежащую под кривой нормального распределения между соответствующими ординатами (см. заштрихованный участок на рис. 1). Вся площадь под кривой (сумма всех вероятностей) равна единице.

Вероятность того, что переменная примет среднее значение i_0 с небольшим отклонением Δi , равна $p = \frac{2\Delta i}{\sqrt{2\pi \cdot \epsilon}}$.

Допустим, нам требуется определить, какова вероятность того, что переменная i принимает значения от i_1 до i_2

$$i_1 < i < i_2.$$

Для этого нужно найти площадь, лежащую под кривой нормального распределения между соответствующими ординатами (см. заштрихованный участок на рис. 1).

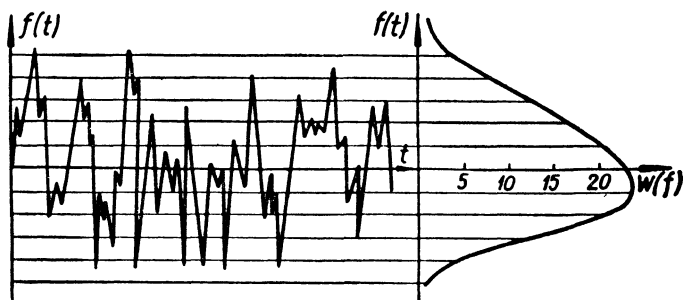


Рис. 2. Построение кривой плотности распределения вероятностей по графику случайной функции.

Для того чтобы можно было лучше уяснить, что представляет собой плотность распределения вероятностей, полезно построить кривую $W(f)$ для участка графически заданной статистической функции (рис. 2). Подсчитывая число пересечений горизонтальных прямых с графиком функции, легко построить искомую кривую. Чем больше

участок исследуемой осциллограммы, тем точнее определение кривой распределения вероятностей.

Если предположить, что каждый прохожий стирает ступень на одну и ту же величину, то форма стертой ступени какого-либо древнего сооружения представляет собой кривую плотности распределения вероятностей прохождения людей по ширине ступени.

Рассмотрим теперь понятия автокорреляционной функции $A(\tau)$ и спектральной плотности $S(\omega)$.

В случайном процессе значение функции в данный момент имеет влияние (корреляцию) на значения ее в соседние моменты времени. Это влияние зависит от интервала времени τ между данными и любым другим моментом времени. Чем больше τ , тем корреляция меньше.

Математически свойство корреляции выражает так называемая *автокорреляционная функция*, равная

$$A(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} f(t) \cdot f(t + \tau) dt.$$

Автокорреляционную функцию можно найти как для всей функции $f(t)$, так и для ее переменной составляющей $\Delta f(t)$

$$A_{\Delta}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} \Delta f(t) \cdot \Delta f(t + \tau) dt.$$

Автокорреляционные функции и функции взаимной корреляции учитывают линейные зависимости значений случайной величины, т. е., строго говоря, применимы для систем, описываемых линейными уравнениями. В последние годы разработан ряд методов приближенного применения этих функций и в нелинейных системах.

Автокорреляционная функция равна среднему значению произведения данной статистической функции (или ее отклонения) на точную ее копию, сдвинутую на время τ .

Для того чтобы построить одну точку функции $A(\tau)$, нужно перемножить ординаты функции $f(t)$ на ординаты функции $f(t + \tau_1)$ и найти среднее значение этого произведения. Для нахождения второй точки нужно перемножить ординаты $f(t)$ на ординаты $f(t + \tau_2)$ и снова найти среднее значение произведения. Так, точка за точкой можно

построить автокорреляционную функцию $A(\tau)$. Очевидно, что эта функция может быть только четной.

В настоящее время имеется ряд вычислительных машин (коррелографов), автоматически выполняющих построение функции $A(\tau)$ по заданной $f(t)$ [79].

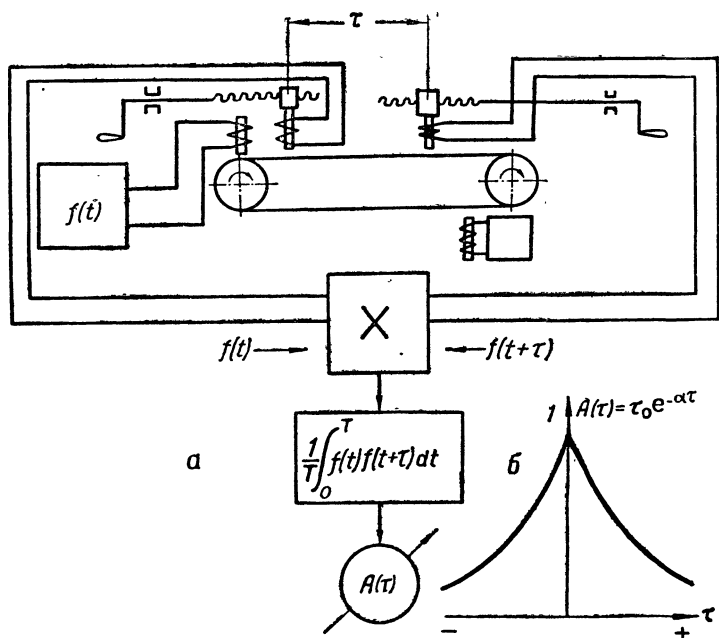


Рис. 3. Коррелограф:

а — схема коррелографа с элементом смещения времени отсчета функции в виде магнитной ленты; б — пример нормированной автокорреляционной функции.

В качестве примера на рис. 3 показана схема коррелографа, использующего для создания времени смещения τ магнитную ленту. Принцип работы схемы понятен из самого рисунка.

Рассмотрим пример определения автокорреляционной функции. Гармоническая функция

$$f(t) = A_{\text{макс}} \sin(\omega t + \varphi)$$

также будет случайной, если фаза φ является случайной величиной (имеется разброс начальных значений фазы).

Найдем автокорреляционную функцию для гармонической случайной функции

$$A(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} A_{\max} \sin(\omega t + \varphi) A_{\max} \sin[\omega(t + \tau) + \varphi] dt = \\ = \frac{A_{\max}^2}{2} \cos \omega \tau.$$

Автокорреляционной функцией синусоиды является косинусоида. Важно отметить, что автокорреляционная функция зависит от квадрата ординат исходной функции, но не учитывает фазу. Она является обобщенной статистической характеристикой, не учитывающей положение точки начала отсчета времени.

При $\tau = 0$ автокорреляционная функция равна

$$A(0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} f^2(t) dt = M(i^2),$$

т. е. квадрату среднеквадратичного (действующего) значения функции $f(t)$.

В примере, рассмотренном выше, действующее значение равно $\frac{A_{\max}}{\sqrt{2}}$.

При $\tau = 0$ автокорреляционная функция отклонения (переменной составляющей) $\Delta f(t)$ равна квадрату действующего значения этой составляющей (т. е. дисперсии)

$$D = A_{\Delta}(0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} \Delta f^2(t) dt = \epsilon^2 = \frac{A_{\max}^2}{2}.$$

При $\tau = 0$ автокорреляционная функция имеет свое наибольшее значение. Чем выше частоты, содержащиеся в функции $f(t)$, чем менее плавной является она, тем быстрее убывает ее автокорреляционная функция. В предельном случае, когда спектр $f(t)$ имеет все частоты одной и той же амплитуды (так называемый белый шум), автокорреляционная функция представляет собой импульсную δ -функцию в начале координат. В другом предельном случае при

$$\Delta f = 0 \quad \text{и} \quad A_{\Delta}(\tau) = 0.$$

Автокорреляционная функция является четной и раскладывается в ряд по косинусам.

Важной характеристикой случайного процесса является график (или аналитическое выражение) его *спектральной плотности* $S(\omega)$. Эта характеристика является также обобщенной и не содержит сведений о начале отсчета времени (фазе сигнала). Спектральная плотность показывает содержание составляющих данной частоты в исходной статистической функции. Между автокорреляционной функцией и функцией спектральной плотности существует определенная связь, которую мы укажем ниже.

Рассмотрим еще понятие *взаимокорреляционной функции* $K_{f_1, f_2}(\tau)$.

Если две статистические функции $f_1(t)$ и $f_2(t)$ влияют друг на друга (имеют корреляцию), то можно найти функцию

$$K_{f_1, f_2}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} f_1(t) f_2(t + \tau) dt,$$

называемую *взаимокорреляционной функцией*. Если взаимного влияния нет, взаимокорреляционная функция равна нулю. Методы вычисления этой функции по точкам те же, что и для автокорреляционной. Для нахождения одной точки функции нужно перемножить ординаты $f_1(t)$ на ординаты $f_2(t + \tau)$ и найти среднее значение произведения и т. д.

Функция взаимной корреляции двух статистических процессов так же не содержит никаких сведений об их фазах (начале отсчета времени), как и автокорреляционная функция и функция спектральной плотности.

Заметим, что обычно $K_{f_1 f_2}(\tau) \neq K_{f_2 f_1}(\tau)$. Корреляционные функции, как уже указывалось выше, могут быть составлены как для абсолютных значений функций f_1 и f_2 (измеряемых от нуля), так и для их отклонений Δf_1 и Δf_2 от постоянного среднего значения за время интегрирования $2T$. Если функции f_1 и f_2 не имеют постоянной составляющей, то $\bar{f}_1 = \Delta f_1$ и $\bar{f}_2 = \Delta f_2$ и оба вида записи корреляционных функций не отличаются друг от друга.

Практическое применение получили корреляционные функции, составленные для отклонений. *Ниже мы будем рассматривать только корреляционные функции, составленные для отклонений*, а для упрощения записи формул знаки Δ опустим, под обозначениями f_1 и f_2 будем понимать ординаты переменной составляющей функции.

Релейные корреляционные функции Релейной автокорреляционной функцией мы называем знакопеременную функцию

$$A_f(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} f(t) A \operatorname{sign}[f(t - \tau)] dt.$$

Аналогично релейная взаимокорреляционная функция

$$K_{f_1 f_2}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} f_1(t) A \operatorname{sign}[f_2(t - \tau)] dt.$$

Релейные корреляционные функции учитывают только знак $f_2(t - \tau)$, а не величину ее. Они имеют свойства, аналогичные свойствам обычных корреляционных функций и, в частности, совпадают с ними по знаку. Преимущество релейных функций состоит в простоте аппаратуры, используемой для получения этих функций. При изменении фазы функции f_1 на 180° знак взаимокорреляционной функции изменится на обратный. Это означает, что *в системах экстремального регулирования (рассматриваемых ниже) взаимокорреляционные функции (как обычная, так и релейная) могут быть использованы для определения: с какой стороны от экстремума находится система. Этот вопрос мы подробно рассмотрим ниже.*

Стационарные случайные процессы

Выше мы указывали, что случайная функция может быть названа стационарной, если ее математическое ожидание, дисперсия и плотность распределения вероятностей постоянны. Кроме того, автокорреляционная функция и спектральная плотность остаются одними и теми же для каждого достаточно большого участка осциллограммы.

Для стационарных процессов верна эргодическая теорема:

«Среднее значение функции по времени равно среднему ее значению по совокупности». Среднее значение по времени есть математическое ожидание. Среднее значение по совокупности определяется выражением

$$\int_{-\infty}^{+\infty} iW(i) di,$$

т. е. равно среднему значению ординаты ненормированной кривой распределения вероятности.

Статистические характеристики и операторные изображения

Если известна функция $f(t)$, то при определенных условиях может быть определено ее операторное изображение Фурье (прямое преобразование)

$$F_f(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt.$$

Другая запись этого преобразования

$$F_f(\omega) \doteq f(t).$$

В свою очередь (обратное преобразование)

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F_f(\omega) e^{j\omega t} d\omega.$$

Спектральная плотность является операторным изображением Фурье автокорреляционной функции (теорема Винера)

$$S_f(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} A_f(\tau) e^{-j\omega \tau} d\tau,$$

или

$$S_f(\omega) \doteq A_f(\tau).$$

В свою очередь, автокорреляционная функция определяется через обратное преобразование Фурье

$$A_f(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_f(\omega) e^{j\omega \tau} d\omega.$$

Таким образом, если найдена экспериментально автокорреляционная функция сигнала, то сравнительно легко (например, по таблицам или по теореме разложения) найти его спектральную плотность и, наоборот, по спектральной плотности легко найти автокорреляционную функцию.

В практике исследования систем регулирования обычно используется не преобразование Фурье, а более общее пре-

образование Лапласа. Если известна операторная функция (проводимость) системы $Y_3(p)$ (где $p = -\delta + j\omega$), то легко найти выражение для ее амплитудно-фазовой характеристики $Y_3(j\omega)$. Спектральные плотности сигналов на входе и выходе системы связаны через модуль амплитудно-фазовой характеристики системы

$$S_{f_{\text{вых}}}(\omega) = |Y_3(j\omega)|^2 S_{f_{\text{вх}}}(\omega).$$



Глава II

ЭЛЕМЕНТЫ ЛОГИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ (ЭЛД) ДЛЯ ПРОСТЫХ РЕЛЕЙНЫХ КИБЕРНЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

ОСНОВНЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ СВЯЗИ

Прежде чем перейти к рассмотрению различных кибернетических систем, познакомимся с основными их элементами, разработанными специально для решения задач логического управления.

Мы не имеем возможности рассмотреть все элементы такого назначения, потому что они очень разнообразны как по схеме, так и по используемой в них аппаратуре. Вопрос настолько новый и во многих деталях еще не разработан, что даже некоторые примеры простых элементов логического действия могут помочь в выявлении направления, в котором нужно работать, а это сейчас самое главное.

В данной главе мы будем приводить примеры только наиболее простых, главным образом, релейных элементов, так как принципы, используемые в них, можно распространить и на более сложные схемы.

Напомним, прежде всего, что каждое понятие формальной логики можно записать в виде двоичного кода, состоящего из двух знаков:

да = 1,
нет = 0.

Еще Хартли (1928 г.), а затем Шеннон (1948 г.) доказали, что двоичный код является универсальным и оптимальным кодом (с точки зрения его краткости) для передачи мыслей, понятий и состояний. Любой другой код можно преобразовать в двоичный код.

Основными элементами, употребляемыми в кибернети-

ческих системах, являются простейшие элементы логического действия, осуществляющие четыре логических связи: отрицание, логическое умножение, логическое сложение и равнозначность двух высказываний.

Элементарные виды схем логического действия, работающие на двоичном коде («да—нет»), можно в связи с этим разделить на четыре основные группы: а) инверторы, б) схемы совпадения, в) собирательные схемы, г) схемы равнозначности.

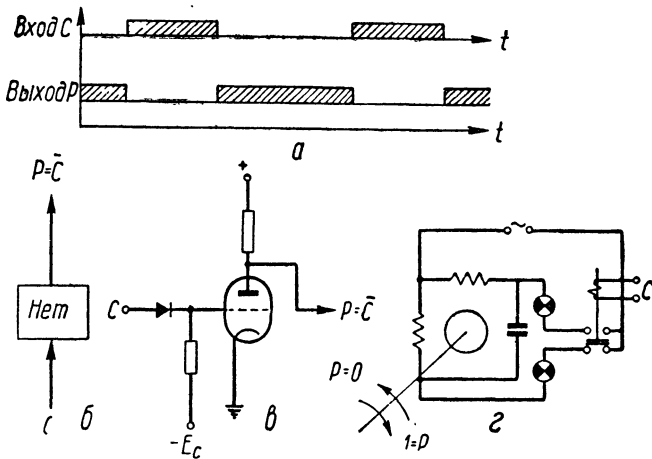


Рис. 4. Схемы инверторов:

а — пример работы; б — функциональная; в — с электронным усилителем; г — релейная.

Мы ограничимся только очень кратким описанием этих элементарных схем, так как они уже достаточно хорошо известны [28].

Инверторы выполняют логическую операцию отрицания. Символом операции отрицания служит слово «нет». Отрицание состояния C обозначается через \bar{C} . Поэтому действие инвертора описывается такими логическими формулами:

$$\bar{1} = 0$$

$$\bar{0} = 1$$

(читается так: не «да», значит «нет», не «нет», значит «да»). Физически это значит, что если на вход инвертора подать единичное напряжение $C = 1$, то на выходе мы получим величину напряжения, которую можно условно обозначить через $P = 0$. Если $C = 1$, то $P = 0$ и, наоборот, если $C = 0$, то $P = 1$.

На рис. 4 изображены схемы электронного и релейного инверторов. Напряжение на выходе P электронного инвертора существует только тогда, когда на входе C напряжение отсутствует.

В релейном инверторе вращение двигателя по часовой стрелке принято за $P = 1$, а против — за $P = 0$. Если на вход подано напряжение $C = 1$, то $P = 0$. В этом и состоит действие инвертора.

Схемы совпадения предназначены для осуществления операции логического умножения (конъюнкции). Символом операций является слово «и», а обозначением служит значок \wedge .

Схемы совпадения, имеющие два входа, действуют таким образом, что:

$$\begin{aligned}1 \wedge 0 &= 0, \\0 \wedge 1 &= 0, \\0 \wedge 0 &= 0, \\1 \wedge 1 &= 1.\end{aligned}$$

Это значит, что на выходе P схемы совпадения только тогда появляется напряжение или требуемое направление вращения двигателя, отвечающее 1, когда на все входы системы будут поданы напряжения, которые мы также условно принимаем за 1. Отсутствие напряжения (или вращение двигателя в противоположную сторону) обозначается через 0.

На рис. 5 показаны примеры осуществления схем совпадения трех величин A , B и C при помощи электронных ламп, выпрямителей, импульсного трансформатора и реле. Схемы настолько просты, что не требуют особых пояснений, за исключением схемы с импульсным трансформатором (рис. 5, д). В этой схеме воздействия A и C представляют собой напряжения постоянного тока, подаваемые на вторичную обмотку трансформатора, равные по величине и противоположные по знаку. В результате такого дифференциального действия ток не проходит. Если в эту же цепь подать отрицательный импульс напряжения B (со стороны C), то он вызовет протекание тока, т. е. пройдет через трансформатор. Ясно, что импульс может пройти только при наличии напряжения A , так как без него выпрямитель помешает прохождению тока. Таким образом, импульс B проходит только тогда, когда он *совпадает* по времени с подачей напряжений A и C при $C = \text{const}$, т. е. $A \wedge B = 1$.

Собирательные схемы предназначены для выполнения операции логического сложения (дизъюнкции). Символом операции является слово «или», а обозначением служит знак \vee . Схема с двумя входами действует так, что:

$$\begin{aligned} 0 \vee 0 &= 0, \\ 0 \vee 1 &= 1, \\ 1 \vee 0 &= 1, \\ 1 \vee 1 &= 1. \end{aligned}$$

Чтобы на выходе схемы появилось напряжение (или направление вращения), принимаемое за 1, необходимо иметь хотя бы на одном входе схемы напряжение, отвечающее 1.

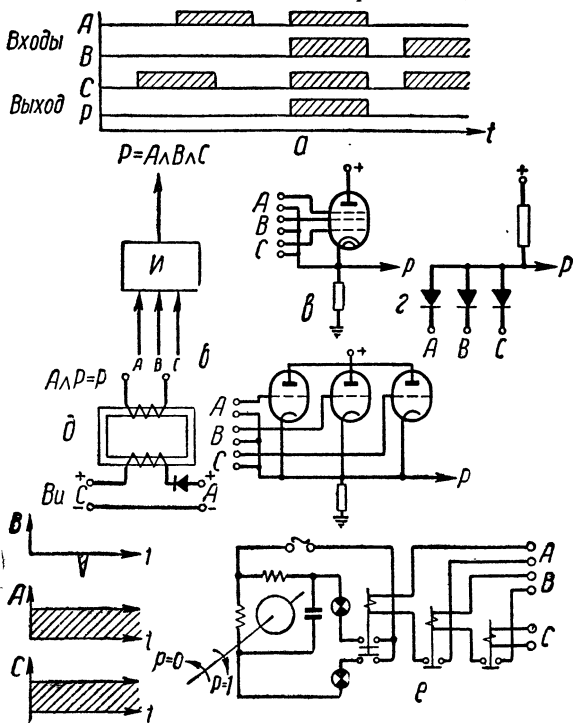


Рис. 5. Схемы совпадения:

a — пример работы; *б* — функциональная; *в* — на электронных лампах; *г* — с выпрямителями, или диодами; *д* — с импульсным трансформатором; *е* — релейная.

Собирательные схемы так же, как и предыдущие, могут быть осуществлены на электронных лампах, выпрямителях, импульсном трансформаторе, реле и т. д. (рис. 6).

Схемы равнозначности реагируют на равнозначность входных величин.

Символом равнозначности является слово «равнозначно», а обозначением служит знак \sim .

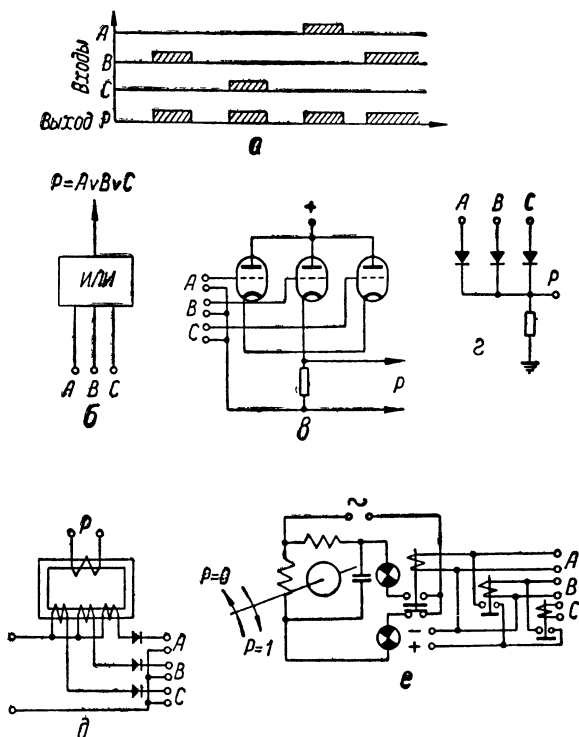


Рис. 6. Собирательные схемы:

а — пример работы; б — функциональная; в — на электронных лампах; г — с выпрямителями, или диодами; д — на импульсном трансформаторе; е — релейная.

Действие схемы в простейшем случае, когда она имеет только два входа, поясняется такими зависимостями:

$$\begin{aligned} 1 \sim 1 &= 1, \\ 0 \sim 1 &= 0, \\ 0 \sim 0 &= 1, \\ 1 \sim 0 &= 0. \end{aligned}$$

(Читается так: 1 равнозначно 1, дает 1; 0 равнозначно 1, дает 0 и т. д.).

Для того чтобы получить указанные выше зависимости, например между A и B , необходимо произвести логическое сложение величины, противоположной A , с величиной B , и величины A с величиной, противоположной B , а затем произвести логическое умножение

$$A \sim B = (\bar{A} \vee B) \wedge (A \vee \bar{B}).$$

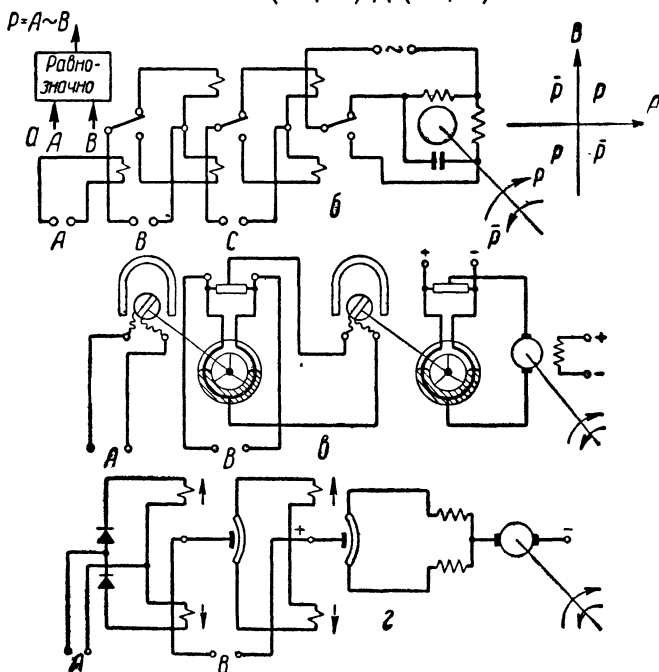


Рис. 7. Схемы равнозначности:
 а — функциональная; б — релейная;
 в и г — пропорциональные.

Схема равнозначности состоит из инверторов, схем совпадения «и» и собирательной схемы «или».

На рис. 7, б приводится пример схемы равнозначности, в которой используются поляризованные двух- или трехпозиционные реле.

Положительное напряжение на входе принимаем за 1, а отрицательное за 0. Момент исполнительного двигателя, управляемого при помощи схемы, является ее выходом. Положительный момент, направленный по ходу часовой

стрелки, обозначим через 1, а отрицательный момент, направленный против хода часовой стрелки, примем за 0.

Легко установить, что в случае наличия только двух входов схема действует так, как показано на рис. 7:

в первом квадранте	$A = 1$ и $B = 1$, что дает выход $P = 1$;
во втором	» $A = 0$ и $B = 1$, т. е. $P = 0$;
в третьем	» $A = 0$ и $B = 0$, но $P = 1$;
в четвертом	» $A = 1$ и $B = 0$, что дает $P = 0$.

На рис. 7, *в* и *г* приведены примеры схем равнозначности пропорционального действия с переменными активными сопротивлениями. Аналогичные схемы могут быть также выполнены с применением магнитных усилителей и твердых выпрямителей, эффекта Гаусса и других средств.

Схемы равнозначности мы будем встречать в различных кибернетических системах, рассматриваемых ниже, особенно часто в схемах экстремального регулирования.

Так как поляризованные реле не идеальны, то схема, изображенная на рис. 7, *б*, имеет зону нечувствительности. Ширина этой зоны зависит от конструкции и настройки реле, применяемых в схеме. Обычно зона настолько мала, что ею можно пренебречь.

Рассмотрим другие более сложные элементы логического действия, часто необходимые для устройства систем технической кибернетики.

ИНДИКАТОРЫ ИСТОЧНИКА ТОКА, ИМЕЮЩЕГО НАИБОЛЬШЕЕ ЗНАЧЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ (ИБН)

В кибернетических системах часто приходится решать логическую задачу выбора источника тока, который имеет в данный момент времени наибольшее напряжение. Для решения этой задачи нами разработаны следующие схемы (рис. 8).

Первый пример такой схемы для четырех источников показан на рис. 8, *а*. Действие индикатора проще всего объяснить, пользуясь схемой рис. 8, *в*, где изображен наиболее простой индикатор для двух источников. Схема состоит из двух германиевых или других выпрямителей (в качестве примера на рисунке показаны диоды 6Х6), двух реле тока и катодного сопротивления. Каждое реле тока имеет сигнальную лампу. Если внутреннее сопротив-

ление выпрямителя R_B и обмотки реле R_P во много раз меньше катодного сопротивления R_K , т. е.

$$R_B + R_P \ll R_K,$$

то ток идет только в обмотке того реле, которое присоединено к источнику тока с наибольшим напряжением.

В цепи обмотки второго реле ток не проходит, потому что падение напряжения на катодном сопротивлении больше напряжения второго источника тока. Иногда в таких случаях говорят, что напряжение на сопротивлении R_D «под-

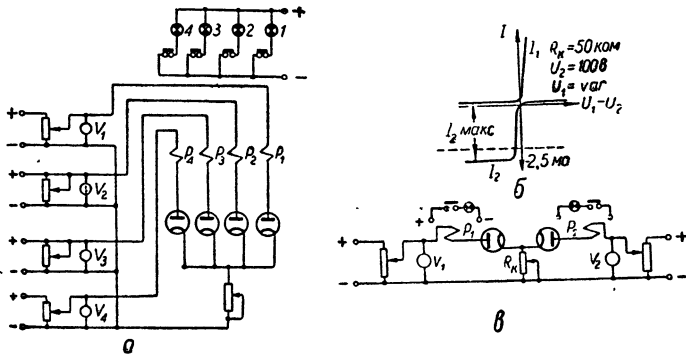


Рис. 8. Индикаторы источника тока, имеющего наибольшее напряжение:

a — индикатор на четыре источника; *б* — характеристика работы индикатора; *в* — индикатор на два источника.

пирает» другие источники тока. Это подтверждается экспериментальными характеристиками рис. 8, б.

Для четкой работы схемы необходимо, чтобы выполнялось указанное выше соотношение сопротивлений. Однако величина катодного сопротивления не должна быть больше значения, определяемого по формуле

$$I_{сраб} \leq \frac{U_{мин}}{R_B + R_P + R_K},$$

где

$I_{сраб}$ — ток срабатывания реле;

$U_{мин}$ — наименьшее значение напряжения для всех источников, которые сравниваются между собой.

Физически это неравенство выражает требование, чтобы наименьшее напряжение (выбираемое из напряжений всех

источников) было достаточным для срабатывания реле. Отсюда получим:

$$(R_B + R_P) \ll R_K \ll \left[\frac{U_{\text{мин}}}{I_{\text{сраб}}} - (R_B + R_P) \right]$$

или

$$2(R_B + R_P) \ll R_K \ll \frac{U_{\text{мин}}}{I_{\text{сраб}}}.$$

Настройка производится изменением величины катодного сопротивления R_K .

Если настройка схемы произведена правильно в соответствии с этими формулами, то номер горящей сигнальной лампы указывает номер источника, который имеет в данный момент времени наибольшее напряжение.

Работа схемы (рис. 8, а) аналогична работе рассмотренной схемы.

Как и другие релейные устройства, описываемые схемы имеют небольшую зону нечувствительности. Величина и характер зоны нечувствительности (отвечающей переходу через нуль, т. е. через равенство хотя бы двух из сравниваемых напряжений) зависят от настройки.

Если катодное сопротивление достаточно велико, то при точном равновесии напряжений всех источников ни одно реле не включено, т. е. не горит ни одна лампа.

Наоборот, если уменьшить немного катодное сопротивление, то при точном равенстве двух напряжений будут гореть две соответствующие лампы, но при равенстве большего числа напряжений снова не горит ни одна лампа. При дальнейшем уменьшении катодного сопротивления в зоне нечувствительности горят три лампы и т. д.

Ясно, что настройка системы (величина $\frac{R_K}{R_B + R_P}$) должна выбираться в соответствии с требуемыми свойствами индикатора большего напряжения (ИБН) в данном его применении.

В табл. 3 приведены экспериментальные значения токов I_1 , I_2 и I_3 для схемы с тремя источниками напряжения

$$U_1, U_2 \text{ и } U_3 \text{ и } R_K = 32\,000 \text{ ом.}$$

Из таблицы видно, что больший ток всегда отвечает источнику с большим напряжением.

Таблица 3
Экспериментальные данные

U_1 (в е)	U_2 (в е)	I (в мА)	U_2 (в е)			
			70	140	210	280
70	70	I_1	0,6	0,0	0,0	0,0
		I_2	0,6	4,1	6,0	8,0
		I_3	0,6	0,0	0,0	0,0
	140	I_1	4,2	2,05	0,0	0,0
I_2		0,0	2,05	6,0	8,0	
I_3		0,0	0,0	0,0	0,0	
140	210	I_1	6,3	6,25	3,0	0,0
		I_2	0,0	0,0	3,0	8,0
		I_3	0,0	0,0	0,0	0,0
	280	I_1	8,25	8,2	8,2	4,0
I_2		0,0	0,0	0,0	4,1	
I_3		0,0	0,0	0,0	0,0	
210	70	I_1	0,0	0,0	0,0	0,0
		I_2	0,0	1,6	6,0	8,0
		I_3	4,3	1,6	0,0	0,0
	140	I_1	2,1	1,0	0,0	0,0
I_2		0,0	1,1	6,0	8,0	
I_3		2,2	1,1	0,0	0,0	
210	210	I_1	6,25	6,25	3,0	0,0
		I_2	0,0	0,0	3,1	8,0
		I_3	0,0	0,0	0,0	0,0
	280	I_1	8,2	8,2	8,2	4,2
I_2		0,0	0,0	0,0	4,0	
I_3		0,0	0,0	0,0	0,0	
70	70	I_1	0,0	0,0	0,0	0,0
		I_2	0,0	0,0	3,0	8,0
		I_3	6,2	6,2	3,1	0,0
	140	I_1	0,0	0,0	0,0	0,0
I_2		0,0	0,0	3,0	8,0	
I_3		6,2	6,2	3,1	0,0	

Продолжение табл. 3

U_1 (в в)	U_1 (в в)	I (в мА)	U_2 (в в)			
			70	140	210	280
210	210	I_1	3,2	3,0	1,0	0,0
		I_2	0,0	0,0	1,0	8,0
		I_3	3,0	3,0	1,1	0,0
	280	I_1	8,2	8,2	8,2	4,0
		I_2	0,0	0,0	0,0	4,1
		I_3	0,0	0,0	0,0	0,0
280	70	I_1	0,0	0,0	0,0	0,0
		I_2	0,0	0,0	0,0	4,5
		I_3	8,0	8,2	8,2	3,5
	140	I_1	0,0	0,0	0,0	0,0
		I_2	0,0	0,0	0,0	3,9
		I_3	8,0	8,2	8,1	3,9
	210	I_1	0,0	0,0	0,0	0,0
		I_2	0,0	0,0	0,0	3,9
		I_3	8,0	8,1	8,1	3,9
	280	I_1	4,0	4,1	4,0	2,6
		I_2	0,0	0,0	0,0	2,7
		I_3	3,9	4,2	4,0	2,5

Второй пример схемы индикатора источника тока, имеющего наибольшее напряжение, дан на рис. 9. Здесь так же, как и в предыдущей схеме, суммируются токи нескольких выпрямителей. Напряжение на выходе схемы суммирования равно напряжению выпрямителя, присоединенного к источнику тока с наибольшим напряжением. Это обстоятельство используется для выявления требуемого источника. В отличие от предыдущей схемы в схеме рис. 9 используются реле напряжения, включенные на разность выходного напряжения, и напряжения каждого из сравниваемых источников.

По своей точности схемы рис. 8 и 9 приблизительно равноценны.

Третий пример схемы индикатора наибольшего напряжения, работающей по другому принципу, дан на

рис. 10. Здесь используются поляризованные реле $РП$ и сигнальные реле $Р$. Сравнение напряжений производится

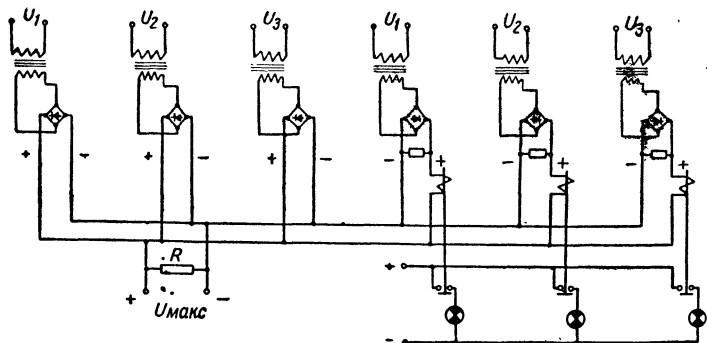


Рис. 9. Индикатор источника тока, имеющего наибольшее напряжение.

по очереди, по два. Первое реле $РП_1$ выбирает большее по величине напряжение из двух (U_1 и U_2) и «выдает» его на выходные зажимы. Второе реле $РП_2$ сравнивает полученное таким образом напряжение с напряжением третьего источника. И, наконец, третье реле $РП_3$ выбирает наибольшее напряжение из всех четырех сравниваемых напряжений. Сигнальное реле с нормально замкнутыми контактами зажигает лампу, номер которой отвечает номеру источника, дающего наибольшее напряжение.

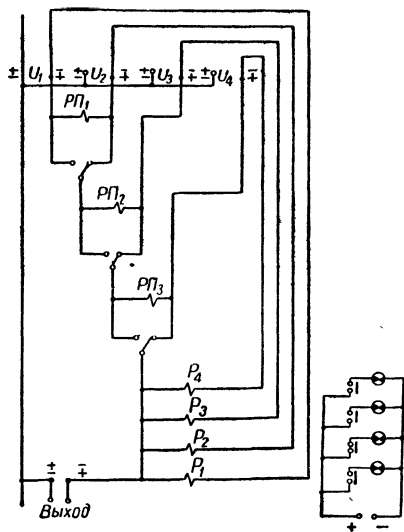


Рис. 10. Индикатор источника тока, имеющего наибольшее напряжение.

Схема обладает некоторой инерцией — временем срабатывания реле. Она менее надежна, чем предыдущий вариант схемы.

Для точной работы схемы необходимо, чтобы напряжени срабатывания всех реле, участвующих в схеме, было во много раз меньше каждого из сравниваемых напряжений. В противном случае все реле нужно включить через усилители. Ошибка в определении источника не превышает величины напряжения срабатывания одного реле, умноженной на число поляризованных реле, плюс напряжение срабатывания сигнального реле

$$\delta = (\Delta U_{\text{сраб}} \cdot n + \Delta U_{\text{сигн}}),$$

где δ — абсолютная ошибка схемы, равная разности действительно наибольшего напряжения и напряжения на выходе схемы;

$\Delta U_{\text{сраб}}$ — напряжение срабатывания поляризованных реле;

n — число поляризованных реле;

$\Delta U_{\text{сигн}}$ — напряжение срабатывания сигнального реле.

Сравнивая между собой описанные выше схемы, можно прийти к выводу, что каждая из них имеет свою область применения. Для напряжений, изменяющихся в широком диапазоне (более чем 1 : 30), лучше использовать схему рис. 8.

Для малых диапазонов изменения напряжений можно применить схему с поляризованными реле (рис. 10), так как при этом нет опасности, что реле не выдержит очень большого увеличения напряжения на его обмотке.

ИНДИКАТОРЫ ИСТОЧНИКА ТОКА, ИМЕЮЩЕГО НАИМЕНЬШЕЕ ЗНАЧЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ (ИМН)

Пользуясь *принципом двойственности* схем, схему суммирования токов с параллельным соединением элементов можно заменить эквивалентной схемой суммирования напряжений с последовательным соединением элементов. В соответствии с этим принципом колебания тока в последовательном контуре L , R и C описываются таким же дифференциальным уравнением, как и колебания напряжения в параллельном контуре [44] и [17].

Пользуясь этим принципом, можно, например, составить схему индикатора, изображенную на рис. 11. Здесь в отличие от схемы рис. 8 выпрямители и реле тока включены параллельно источникам напряжения. Через обмотку реле, подключенного к источнику с наименьшим напряжением,

ток не проходит, что можно использовать для выявления номера этого источника.

Для точной работы схемы необходимо, чтобы величины внутреннего сопротивления выпрямителей R_v и реле R_p были во много раз меньше балластных сопротивлений R_6

$$R_v + R_p \ll R_6.$$

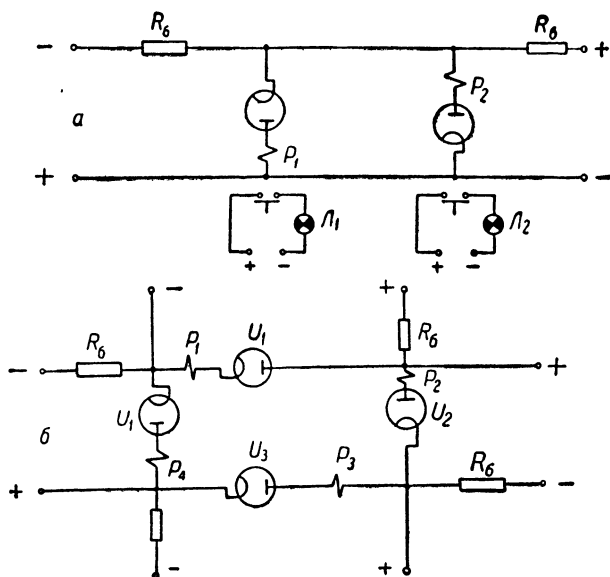


Рис. 11. Индикатор источника тока, имеющего наименьшее напряжение:

а — индикатор на два источника; *б* — индикатор на четыре источника.

Зона нечувствительности индикатора (рис. 11) зависит от настройки схемы, т. е. от выбора величины R_6 .

Экспериментальные данные для схемы сравнения напряжений трех источников для случая $R_6 = 32\ 000\ \text{ом}$ приведены в табл. 4, которая объясняет работу такого рода схем. Из таблицы видно, что отсутствие тока в реле соответствует источнику с наименьшим напряжением.

Пользуясь принципом двойственности, можно найти аналог из схемы рис. 9, отыскивающий наименьшее напряжение.

Таблица 4
Экспериментальные данные

U_1 (в е)	U_1 (в е)	I (в мА)	U_2 (в е)			
			70	140	210	280
70	70	I_1	0,2	0,1	0,0	0,0
		I_2	0,2	2,1	3,9	5,9
		I_3	0,2	0,0	0,0	0,0
	140	I_1	2,0	1,9	2,2	1,9
		I_2	0,0	1,9	4,1	5,8
		I_3	0,0	0,0	0,0	0,0
	210	I_1	2,4	4,2	4,25	3,9
		I_2	0,0	1,75	3,8	5,8
		I_3	0,1	0,0	0,0	0,0
	280	I_1	3,5	6,25	6,2	5,9
		I_2	0,0	1,8	3,8	5,8
		I_3	2,5	0,0	0,0	0,0
140	70	I_1	0,1	0,0	0,0	0,0
		I_2	0,0	1,75	3,9	5,8
		I_3	2,25	1,8	2,0	1,9
	140	I_1	2,25	0,25	0,2	0,2
		I_2	0,0	0,0	2,3	3,9
		I_3	2,25	0,0	0,0	0,0
	210	I_1	4,3	2,25	2,2	2,1
		I_2	0,0	0,0	1,9	3,8
		I_3	2,25	0,25	0,0	0,0
	280	I_1	6,25	4,1	4,0	3,8
		I_2	0,0	0,0	1,8	3,75
		I_3	1,8	0,1	0,0	0,0
210	70	I_1	0,1	0,0	0,0	0,0
		I_2	0,0	1,75	3,8	5,8
		I_3	4,2	4,0	4,0	4,0
	140	I_1	2,2	0,4	0,0	0,0
		I_2	0,0	0,0	1,75	3,7
		I_3	4,2	2,25	2,0	1,8

Продолжение табл. 4

U_1 (в в)	U_1 (в в)	I (в мА)	U_2 (в в)			
			70	140	210	280
210	210	I_1	4,2	2,25	0,5	0,25
		I_2	0,0	0,0	0,0	2,25
		I_3	4,2	2,2	0,1	0,0
	280	I_1	6,2	4,1	2,2	2,0
		I_2	0,0	0,0	0,0	2,2
		I_3	4,2	2,2	0,1	0,0
280	70	I_1	0,1	0,0	0,0	0,0
		I_2	0,0	1,7	3,7	5,8
		I_3	6,5	6,1	6,	6,0
	140	I_1	2,25	0,1	0,0	0,0
		I_2	0,0	0,0	1,7	3,6
		I_3	6,25	4,3	4,0	3,8
	210	I_1	4,0	2,25	0,1	0,0
		I_2	0,0	0,0	0,0	1,5
		I_3	6,2	4,25	4,25	1,8
	280	I_1	6,1	4,2	2,1	0,15
		I_2	0,0	0,0	0,0	0,15
		I_3	6,1	4,2	2,15	0,15

Следует иметь в виду, что схема рис. 10 с поляризованными реле может быть использована как для выявления источника с наибольшим напряжением, так и для выявления источника с наименьшим напряжением. Это зависит только от полярности входных напряжений. Для того чтобы перейти от одной задачи к другой, достаточно изменить полярность напряжения на входе схемы.

Точность работы релейной схемы при выявлении источника с наименьшим напряжением такая же, как и при выявлении источника с наибольшим напряжением. Ее можно оценить по приведенной выше формуле (стр. 60).

ИНДИКАТОР ИСТОЧНИКА ТОКА, НАПРЯЖЕНИЕ КОТОРОГО ОТЛИЧАЕТСЯ ОТ ЗАДАННОГО ЗНАЧЕНИЯ НА НАИМЕНЬШУЮ ВЕЛИЧИНУ (ИЗН)

В некоторых кибернетических системах применяется устройство, указывающее номер источника тока, напряжение которого ближе всего по величине к заданному значению напряжения.

Пример схемы такого индикатора дан на рис. 12. Эта схема не намного сложнее схемы индикатора наименьшего напряжения.

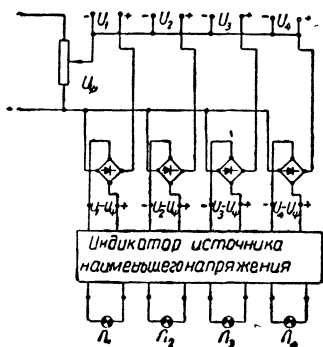


Рис. 12. Индикатор источника тока, напряжение которого отличается от заданного значения на наименьшую величину.

Для решения поставленной задачи на вход того или иного индикатора наименьшего напряжения подаются разности напряжений всех источников и заданного напряжения U_ϕ . Схема указывает источник, для которого разность наименьшая, и тем самым решает задачу определения искомого источника.

Применение в данной схеме индикатора наибольшего напряжения позволяет создать схему, решающую задачу определения номера источника тока, напряжение которого наиболее отличается от заданной величины.

Стремясь к простоте и краткости изложения, мы приводили только схемы индикаторов, предназначенных для непереворсивных источников напряжения постоянного тока, т. е. для таких источников, у которых полярность напряжения не изменяется и, кроме того, напряжения которых никогда не падают до нуля. Это не относится к схеме рис. 9, которая составлена применительно к источникам переменного тока.

ОГРАНИЧИТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЯ

Задача ограничения напряжения может быть решена так же, как и предыдущая задача, разнообразными способами. Примеры схем ограничителей показаны на рис. 13.

Ограничитель с лампой тлеющего разряда (стабиловольтом) приведен на рис. 13,а. Действие его основано на том, что напряжение на зажимах такой лампы почти постоянно. Чем больше балластные сопротивления $R_б$, тем лучше действие ограничителя.

Ограничитель с «подпертыми» (внешним напряжением) выпрямителями (рис. 13,б) применяется для малых зна-

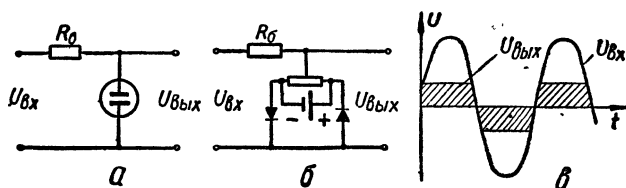


Рис. 13. Ограничители напряжения:
а, б — схемы ограничителей; в — осциллограмма их работы.

чений напряжений, ниже 20 в, когда стабилизаторы тлеющего разряда применять затруднительно.

ЗАПОМИНАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА (ЗУ) ЕМКОСТНО-ТРИОДНОГО ТИПА

Для записи перемещений можно рекомендовать механические устройства, в которых величины записываются в виде перемещения или изменения углов поворота. Для записи напряжений постоянного тока удобно применять запоминающие устройства емкостно-диодного и емкостно-триодного типов.

Три варианта схемы катодных повторителей с емкостью на входе показаны на рис. 14. Основные параметры этих схем:

$$R_k = 20\,000 \text{ ом}, \quad C = 0,5 \text{ мкф}, \quad U_c = 600 \text{ в},$$

а в качестве лампы используется триод 6Н8С. В схемах следует применять конденсатор, имеющий хорошую изоляцию. Рассмотрим свойства трех основных вариантов схемы.

Схема 1 действует только при условии подачи на сетку лампы отрицательного напряжения. Схема «запоминает» напряжение только на несколько минут (рис. 14, характеристика внизу).

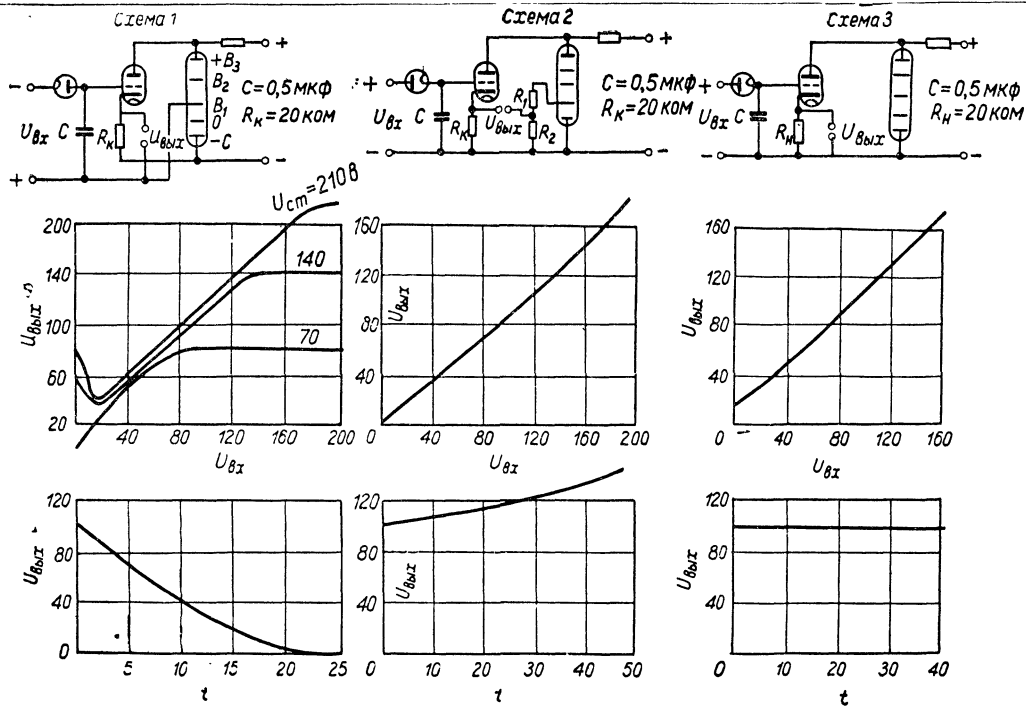


Рис. 14. Запоминающие устройства и их характеристики.

Схема 2. В этой схеме на сетку лампы нужно подать положительное напряжение. Схема работает лучше, чем предыдущая.

Подбирая сопротивление R_1 и R_2 , можно установить нуль напряжения на выходе при нуле напряжения на входе. Работает схема не очень устойчиво; «запоминает» напряжение только на несколько минут, а потом напряжение на выходе начинает немного увеличиваться.

Схема 3. Здесь на сетку подается также положительное напряжение. Схема работает очень устойчиво, долго сохраняет записанное напряжение. Слишком малое напряжение записать не удастся.

Сравнивая свойства двух последних вариантов схемы, можно прийти к выводу, что, объединяя схемы 2 и 3, можно получить такую схему, в которой напряжение остается постоянным неограниченное время, т. е. запись сохраняется очень долго. Практически дело сводится к соответствующему выбору соотношений сопротивлений R_1 и R_2 .

При выборе схемы следует учитывать, что та из них лучше, в которой время разряда больше, а диапазон записываемых напряжений шире. Чем больше диапазон записываемых напряжений, тем точнее можно определить их изменение.

Исходя из этих соображений, следует рекомендовать схему 3, в которой можно обойтись без применения стабилизатора.

Диоды во входных цепях запоминающих устройств нужны только в том случае, когда требуется записать амплитудные (пиковые) значения входных напряжений. Без них схемы записывают последнее во времени (перед отключением датчика) значение напряжения.

На рис. 14 под каждой из трех схем даны экспериментальные характеристики, которые показывают:

а) зависимость напряжения выхода от напряжения входа

$$U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}});$$

б) изменение напряжения выхода во времени (кривые разряда)

$$U_{\text{вых}} = f(t).$$

Расчет характеристики катодного повторителя можно выполнить по методу, изложенному в работе [24].

Выше в качестве примера были рассмотрены схемы индикаторов и запоминающих устройств, оперирующих с напряжениями.

Разработка аналогичных устройств, оперирующих с воздействиями, имеющими другие размерности, с токами, частотой, давлениями, моментами и другим, еще не производилась.

Аналогичные устройства, оперирующие с воздействиями в виде цифр двоичного кода (импульсами), широко используются в больших вычислительных машинах.



Глава III

КИБЕРНЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С САМОИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ УСТАВКОЙ (НАСТРОЙКОЙ)

ОБ АНАЛОГИИ ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ СХЕМ РАЗЛИЧНЫХ ПО НАЗНАЧЕНИЮ КИБЕРНЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Одной из основных идей, проводимых в данной книге, является мысль об аналогии принципиальных схем большого круга различных кибернетических систем, а следовательно, *о возможности создания для них общих методов расчета и исследования, общей теории.*

Чтобы показать эту аналогию, необходимо сравнить между собой принципиальные схемы и законы движения кибернетических систем с самоизменяющимися уставкой (режимом работы), программой, законом следования, динамическими и частотными характеристиками или структурой. Объем такого сравнения весьма велик.

В данной главе мы сможем только подойти к решению такой задачи. Для этого рассмотрим классификацию и примеры систем с самоизменяющейся уставкой, чтобы в последующих главах сравнить их с классификацией и примерами других кибернетических систем регулирования и сделать общий вывод об указанной выше важной аналогии.

ЗАДАЧИ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Режим работы объекта регулирования определяется соотношением величин возмущающих и регулирующих воздействий.

Наиболее изученными системами с самоизменяющейся уставкой являются *системы экстремального регулирования*, в которых режим работы выбирается так, что регулируемая

величина φ поддерживается на экстремальном (т. е. на возможно более высоком или на наиболее низком) уровне.

В данной главе мы ограничимся рассмотрением, главным образом, систем экстремального регулирования, так как другие варианты задачи самонастройки (например, самонастройка на неэкстремальные режимы) еще не разработаны.

Как уже говорилось в первой главе, в теории автоматического регулирования обыкновенно различают следующие три задачи:

а) стабилизации регулируемой величины при постоянном значении управляющего воздействия;

б) программного регулирования при изменении управляющего воздействия в функции времени или пространства;

в) следящих систем, изменяющих регулируемую величину в зависимости от каких-либо внешних переменных факторов, изменение которых нельзя заранее предусмотреть [16].

Задача программных и следящих систем является дополнительной, так как раньше должен быть решен вопрос стабилизации регулируемой величины на заданном уровне, и только после этого изменением уставки регуляторов можно превратить систему стабилизации в программную или следящую.

Экстремальные системы регулирования наиболее близки к следящим системам. Некоторые из них ничем не отличаются от обычных нелинейных следящих систем со специально выбранным законом следования, другие имеют некоторые особенности при осуществлении требуемой зависимости регулируемой величины от внешних или внутренних факторов. Например, систему регулирования курса корабля при его движении по заданной прямой можно отнести к системам стабилизации. Отклонение направления движения от заданного курса поддерживается постоянным, равным нулю.

При наличии часового механизма, изменяющего курс (уставку) в определенные моменты времени, та же система может быть названа программной (программа задана во времени). К программным можно отнести и систему, осуществляющую движение корабля по заданной кривой, точные сведения о которой заранее известны (программа задана в пространстве).

Систему регулирования курса корабля, заставляющую корабль двигаться по кривой, воспроизводящей очертание

берега (на определенном постоянном расстоянии от него), можно отнести к следящим системам в случае, если изгибы берега нельзя заранее точно предусмотреть. Следящая система может заставить корабль двигаться точно на траверзе подвижного предмета, произвольно перемещающегося по берегу или воде.

Следящая система может также осуществить движение корабля на определенной постоянной глубине (при пологом характере берега) по изобате.

Наконец, следящую систему, заставляющую корабль двигаться по самому глубокому месту реки или канала, уже следует отнести к экстремальным системам.

Задачей системы экстремального регулирования является поддержание одного или ряда показателей процесса на наиболее высоком или наиболее низком практически достижимом уровне при непрерывном изменении различных возмущающих воздействий, влияющих на условия работы системы.

Ниже мы ограничимся рассмотрением систем, обладающих только *одним* таким показателем экстремума φ (в приведенном выше примере φ — глубина реки).

По-видимому, первой системой экстремального регулирования была система, автоматически изменяющая угол поворота лопастей ветродвигателя при изменении силы ветра и нагрузки. Как следует из теории воздушного винта, созданной Н. Е. Жуковским, для каждого значения скорости ветра и для каждой нагрузки двигателя существует определенный угол поворота лопастей вокруг продольной оси, при котором ветряной двигатель обладает наиболее высоким к. п. д. и развивает максимальную (при данной скорости ветра) мощность. Непрерывное автоматическое регулирование угла поворота лопастей ветродвигателя в зависимости от скорости ветра и нагрузки является типичной задачей экстремального регулирования.

Относительная мощность двигателя или его к. п. д. является в данном случае *показателем экстремума* φ , а угол поворота лопастей — *регулирующим воздействием* μ . Скорость ветра и нагрузка двигателя являются *возмущающими воздействиями* λ_1, λ_2 .

Принцип экстремального регулирования нашел свое применение и в системах регулирования скорости вращения винта самолетов. Здесь система измеряет отношение скорости полета самолетов относительно воздуха к расходу топлива и регулирует уставку регулятора скорости

двигателя так, чтобы это отношение в каждый момент полета было наибольшим. Самолет, снабженный такой системой, пролетит дальше других самолетов при одном и том же запасе горючего. Как бы ни был опытен пилот, он не всегда может точно указать режим работы двигателя, обеспечивающий наименьший удельный расход топлива, или, что одно и то же, наибольшее расстояние перелета без заправки горючим.

В данном примере удельный расход топлива является показателем экстремума φ . Регулирующим воздействием μ служит скорость вращения двигателя. Возмущающими воздействиями $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$ являются величины, влияющие на скорость самолета, как-то: качество топлива, ветер, изменения условий полета и т. д.

Другие примеры экстремального регулирования, отыскивающие оптимальный режим работы объекта путем изменения уставок систем стабилизации, рассмотрены нами в предыдущих работах [16], [18] и [19].

Эти примеры показывают, что задача экстремального регулирования возникает только тогда, когда характеристика установившегося состояния объекта регулирования (статическая характеристика)

$$\varphi = f(\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_n)$$

имеет экстремум (минимум или максимум), который отвечает наиболее желательному режиму работы системы или находится достаточно близко к желательным режимам.

В связи с этим можно, очевидно, произвести следующую классификацию характеристик объектов регулирования.

1. По числу показателей экстремума ($\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots$). Рассмотренные примеры систем относятся к таким, которые имеют только один показатель экстремума φ .

2. По числу возмущающих и регулирующих воздействий. Как известно [16], воздействия на объект регулирования могут быть разделены на основные внешние возмущающие воздействия ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$), не зависящие от нас, и на регулирующие воздействия ($\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots$), изменяемые регулятором.

3. По числу экстремальных характеристик. Очевидно, что не все зависимости $\varphi = f(\mu_n)$, где $n = 1, 2, 3, \dots$, могут иметь экстремальный характер в области рабочих режимов. Некоторые из них могут не иметь экстремума. Для примера на рис. 15 пред-

ставлены статические зависимости $\varphi = f(\mu_1, \mu_2)$ для случаев, когда характеристика имеет экстремум для одного (рис. 15, а) и для двух (рис. 15, б) регулирующих воздействий. В первом случае приходится осуществлять экстремальное регулирование только по одному регулируемому воздействию (μ_1), а другое воздействие (μ_2) регулировать по первому, осуществляя (при помощи специальной следящей системы) определенный закон следования $\mu_2 = f(\mu_1)$,

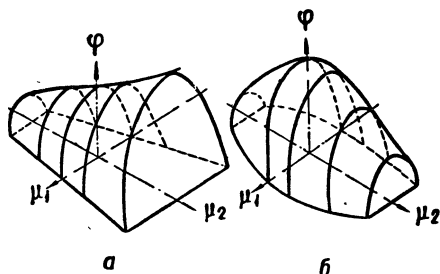


Рис. 15. Случай, когда функция $\varphi = f(\mu_1, \mu_2)$ имеет максимум для одного (а) и для двух (б) регулирующих воздействий.

выбираемый из практических соображений. При этом прежде всего должна быть решена задача стабилизации μ_2 на постоянном уровне, а затем — изменение $\mu_2 = f(\mu_1)$ путем изменения уставки стабилизирующей системы.

Во втором случае можно осуществить экстремальное регулирование по двум воздействиям, т. е. применить два взаимосвязанных через объект экстремальных регулятора.

Если в области рабочих режимов характеристика не везде имеет экстремум, то она не является экстремальной.

В наиболее совершенных системах регулирующие воздействия $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_n$ стабилизируются при помощи отдельных регуляторов. В таких системах экстремальный регулятор можно представить себе как *дополнительное* устройство, служащее для непрерывного или периодического изменения уставки (настройки) систем стабилизации регулирующих воздействий с целью поиска оптимального режима, дающего экстремальное значение регулируемой величины.

Термины: «уставка», «настройка», «режим системы» являются равнозначущими, так как каждой уставке

(настройке) системы стабилизации регулирующего воздействия μ при однозначности характеристики $\varphi = f(\mu)$ отвечает вполне определенный режим работы объекта регулирования и всей системы в целом¹.

Кроме наиболее простого (но и наиболее длительного) метода поиска экстремума «по очереди», в системах с несколькими регулирующими воздействиями применяются методы «градиента», «наискорейшего спуска» (в шаговых системах) или метод одновременной модуляции кратными частотами (в системах с модулирующим воздействием). Так как эти методы (образующие так называемую стратегию поиска) еще только разрабатываются (см. работы Р. И. Стаховского, Е. К. Круг и др.), то мы их здесь не рассматриваем.

Задача экстремального регулирования решается автоматическим изменением уставок систем стабилизации регулирующих воздействий $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_n$.

В одном случае уставка системы стабилизации, имеющей измерительный элемент разностного типа, определяется напряжением или током, подаваемым от задатчика. В других системах, где измерительным элементом является нелинейный мост, уставка зависит от соотношения сопротивлений его плеч, например, как в регуляторе напряжения системы ВЭИ. В третьем случае уставка определяется соотношением коэффициентов измерительных связей (например, в дифференциальном регуляторе В. Н. Чиколева) [16]. Во всех трех случаях для изменения уставки в рассматриваемой задаче вместо человека может быть использован экстремальный регулятор. Процессы, возникающие при этом, являются хорошо известными процессами перенастройки систем стабилизации.

Благодаря действию экстремального регулятора уставки систем стабилизации регулирующих воздействий как бы следят за изменением внешних возмущений и характеристик оборудования и поэтому системы экстремального регулирования можно рассматривать как особую разновидность

¹ Под термином «настройка» в радиотехнике, например, понимают процесс изменения параметров устройства (емкости, самоиндукции и т. п.). В отличие от этого в автоматическом регулировании настройкой называют либо изменение напряжения задатчика, либо изменение параметров нелинейных измерительных элементов (чаще всего мостового типа) или, наконец, изменение соотношения коэффициентов измерительных связей.

следящих систем. Системы экстремального регулирования, как мы увидим ниже, во многом подобны и системам стабилизации. Такие аналогии весьма полезны, так как позволяют использовать хорошо разработанную теорию известных систем для исследования новых видов систем регулирования.

ПРИМЕРЫ ОБЪЕКТОВ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Рассматриваемые ниже примеры систем экстремального регулирования мы будем иллюстрировать, пользуясь следующими объектами, имеющими экстремальную характеристику:

- а) гидравлическая турбина с поворотными лопастями;
- б) печь или, точнее, топка;
- в) магнитный усилитель.

Все три объекта имеют только одну регулируемую величину (показатель экстремума) φ , одно регулирующее воздействие μ и несколько возмущающих $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$. Задача регулирования угла поворота лопастей гидротурбин описана нами ранее [18] и [19]. Регулируемой величиной φ , которую нужно поддерживать на возможно более высоком уровне, является к. п. д. турбины, а регулирующим воздействием μ — угол поворота лопастей вокруг продольных осей. Возмущающими воздействиями λ_1 и λ_2 , непрерывно нарушающими работу системы в режиме наиболее высокого к. п. д., является нагрузка турбины и напор воды.

Задача экстремального регулирования топки рассматривалась Я. З. Цыпкиным [65]. Она состоит в том, чтобы поддерживать температуру свода печи φ на максимально высоком уровне. Регулирующим воздействием μ является количество воздуха, подаваемого в топку (точнее, коэффициент избытка воздуха). Возмущающими воздействиями $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \dots$ служат изменения количества и качества топлива, подаваемого в топку, тепловой нагрузки печи и подсоса воздуха из различного рода отверстий, имеющихся в топке, и др.

Магнитный усилитель рассматривается нами только в качестве удобной модели реальных объектов регулирования [19]. В нем регулируемой величиной φ является ток или падение напряжения на нагрузочном сопротивлении. Задача экстремального регулирования состоит в поддержании минимума тока и напряжения. Регулирующим воздействием

μ служит ток в одной из обмоток управления. Возмущающими воздействиями $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \dots$ являются токи в других обмотках управления, ток подпитки сопротивления нагрузки от внешнего стабилизированного источника тока, изменение напряжения сети и другие величины.

Во всех трех перечисленных примерах зависимость $\varphi = f(\mu)$ при постоянстве возмущающих воздействий $\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 0, \lambda_3 = 0 \dots$ имеет экстремум (рис. 16).

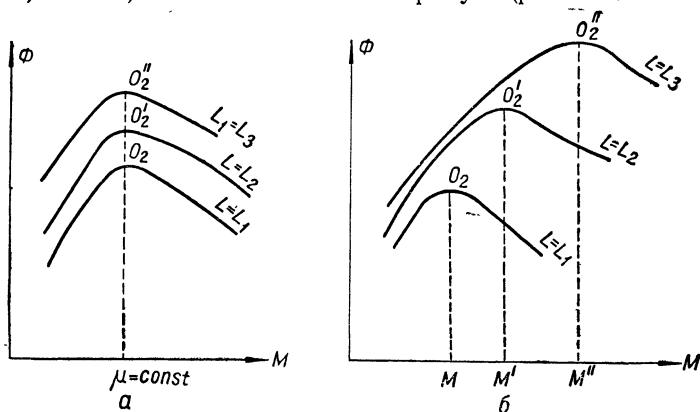


Рис. 16. Экстремальные характеристики объекта регулирования:
 а — случай, когда экстремальный регулятор не нужен; б — случай, когда требуется экстремальное регулирование.

В рассматриваемых примерах регулирующие воздействия представляют собой непрерывные величины, которые могут принимать бесконечное множество значений

$$\mu_{\min} < \mu < \mu_{\max}$$

Действие объектов существенно не изменится, если мы будем также рассматривать системы, обеспечивающие дискретные значения регулирующих воздействий

$$\mu < \mu' < \mu'' < \mu''' < \dots \mu^n.$$

Для этого достаточно, чтобы число таких значений было велико, т. е. $n \gg 1$.

Ниже будут рассмотрены как случаи непрерывного, плавного изменения регулирующих воздействий, так и случаи ступенчатого изменения при достаточно большом числе таких ступеней.

ОБЯЗАТЕЛЬНОЕ УСЛОВИЕ, ПРИ КОТОРОМ ПРИМЕНЕНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНО

Поиск экстремума имеет смысл только в том случае, если оптимальный режим системы не остается одним и тем же, а непрерывно изменяется в результате изменений внешних возмущений или характеристик внутреннего состояния системы.

Как уже указывалось, система экстремального регулирования является эффективной только при наличии экстремальной характеристики объекта и в условиях непрерывного изменения возмущающих воздействий или характеристик оборудования.

Более точно: экстремальное регулирование имеет смысл только в том случае, когда внешние и внутренние возмущения вызывают перемещение экстремальной точки характеристики O_2 в горизонтальном направлении (на плоскости $\varphi - \mu^1$ (рис. 16, б). В противном случае, когда экстремум все время отвечает одному и тому же значению регулирующего воздействия $\mu = \text{const}$ (экстремум остается на месте или перемещается на плоскости $\varphi - \mu$ по вертикали) (рис. 16, а), достаточно применить систему стабилизации регулирующего воздействия. Здесь экстремальное регулирование не требуется, несмотря на наличие характеристики объекта экстремального типа.

АСТАТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМЫ И ОПТИМАЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КОМПАУНДИРОВАНИЯ

Здесь уместно обратить внимание читателя на два важных термина, которые мы будем часто употреблять ниже.

Геометрическое место точек экстремальной работы системы O_2, O_2', O_2'' на плоскости $\varphi - \mu$ (рис. 16) мы будем называть *астатической характеристикой системы* (в отличие от действительной, статической, характеристики, которая в общем случае может не совпадать с астатической). Эта характеристика представляет собой зависимость экстремальных значений регулируемой величины φ от регулирующего воздействия, снятую при различных, но постоянных значениях возмущающего воздействия.

¹ Абсолютные значения переменных обозначены через Φ, M и L , а их отклонения — через φ, μ и λ . Плоскости $\Phi - M$ и $\varphi - \mu$ отличаются расположением начала координат.

В каждой точке астатической характеристики определенному значению возмущающего воздействия λ отвечает определенное значение регулирующего воздействия μ .

Зависимость

$$\mu = f(\lambda),$$

отвечающую астатической характеристике, мы условимся называть *оптимальной характеристикой компаундирования*.

Ясно, что если теми или другими средствами будет обеспечено выполнение характеристики компаундирования, то регулируемая величина будет иметь одно из экстремальных значений.

КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Общая схема классификации систем с *одним* показателем экстремума дана на рис. 17.

Экстремальные системы, как и все другие системы, могут быть осуществлены по двум основным принципам [16]:

а) системы разомкнутого типа с заранее заданной характеристикой компаундирования $\mu = f(\lambda)$, т. е. системы с управлением *по возмущениям* (принцип Понселе);

б) системы замкнутого типа с обратными связями с управлением по регулируемой величине или другим внутренним координатам (принцип Ползунова — Уатта).

Наиболее совершенными являются комбинированные системы, объединяющие в себе оба принципа [16].

Системы управления по возмущениям (без обратных связей), в свою очередь, могут иметь ряд разновидностей:

а) с двумя режимами $\mu = \mu_1$ или $\mu = \mu_2$;

б) с несколькими режимами $\mu = \mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_n$;

в) с плавной, в общем случае нелинейной, заранее заданной характеристикой компаундирования $\mu = f(\lambda)$.

Примеры систем, соответствующих такой классификации, даны на рис. 18, где показаны три варианта системы регулирования угла поворота лопастей гидротурбины по одному из возмущений — по напору воды. Схемы настолько просты, что пояснений не требуется.

Схема (рис. 18,а) имеет релейную двухпозиционную характеристику, схема (рис. 18,б) — более сложную, много-

ступенчатую, и, наконец, схема (рис. 18,б) — плавную характеристику компаундирования $\mu = f(\lambda)$.

Методику выбора нелинейности мы рассмотрим ниже.

Для стабильности работы систем (рис. 18) применяют два способа [24]:

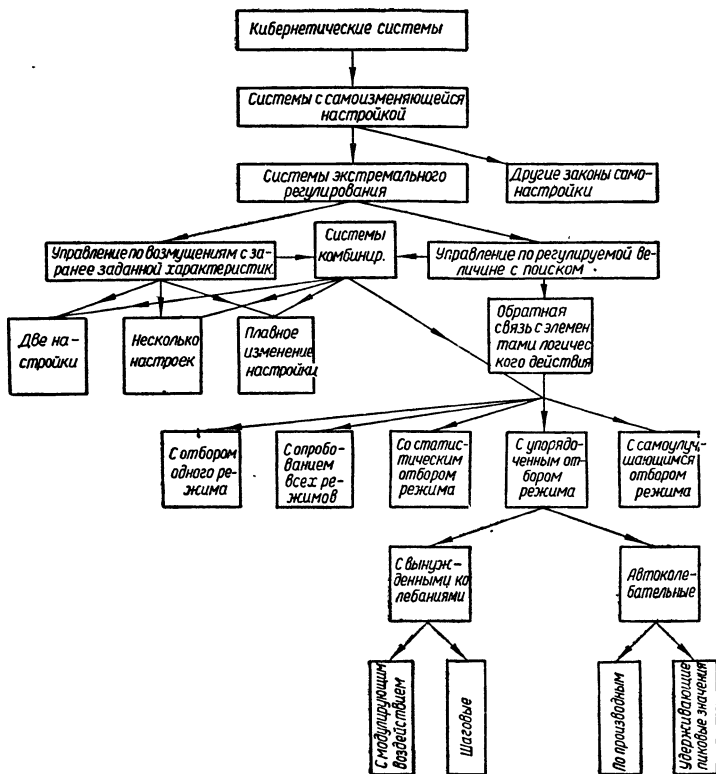


Рис. 17. Классификация систем экстремального регулирования с одним показателем экстремума φ .

а) искусственно увеличивают ширину зон неоднозначности характеристик;

б) включают реле времени (см. пример на рис. 18,а), замедляющее включение и отключение исполнительного реле.

Вторым примером системы управления по возмущению с плавным самоизменением уставки может быть система

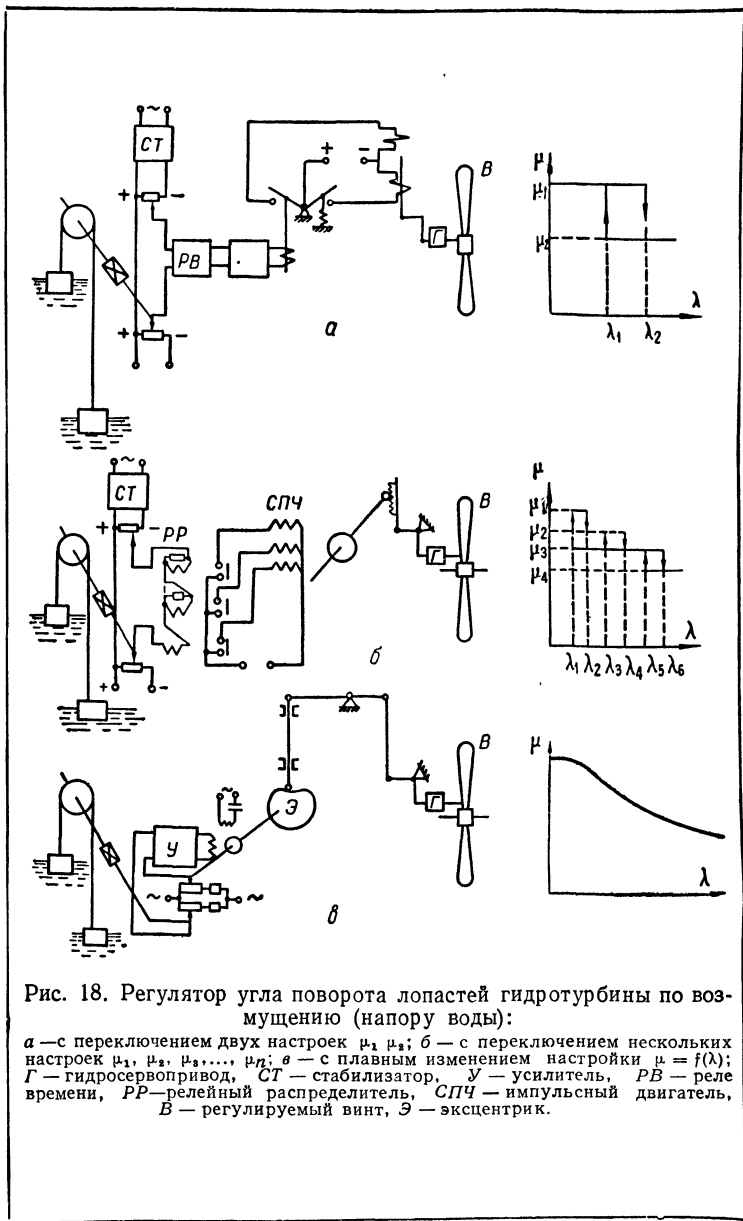


Рис. 18. Регулятор угла поворота лопастей гидротурбины по возмущению (напору воды):

a — с переключением двух настроек μ_1, μ_2 ; *б* — с переключением нескольких настроек $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_n$; *в* — с плавным изменением настройки $\mu = f(\lambda)$; Г — гидросервопривод, СТ — стабилизатор, У — усилитель, РВ — реле времени, РР — релейный распределитель, СПЧ — импульсный двигатель, В — регулируемый винт, Э — эксцентрик.

регулирования теплового режима трехзонной методической печи, применяемой на металлургических заводах. Через эту печь непрерывно двигаются заготовки для прокатных станов. В одной зоне печи они нагреваются, в другой «томятся», в третьей охлаждаются и т. д.

В каждой из зон имеется свой регулятор температуры. Уставки этих регуляторов до сих пор задавались человеком. При переходе к кибернетическому управлению уставки регуляторов изменяются при помощи нелинейных компандирующих связей по скорости продвижения заготовок (основное возмущение). Мерой темпа выдачи заготовок является либо напряжение специального датчика, подсчитывающего производительность печи, либо изменение температуры в зоне предварительного нагрева заготовок (упрощенный вариант). Эта температура находится в обратной зависимости от производительности печи. Автоматический компенсатор измеряет температуру в указанной зоне и при помощи нелинейных эксцентриков производит изменение уставок регуляторов температуры остальных зон печи [51].

Системы управления по регулируемой величине (с обратной связью) также имеют ряд разновидностей, которые мы рассмотрим более подробно. Общей особенностью экстремальных систем с обратной связью является наличие в цепи этой связи тех или иных элементов логического действия (ЭЛД), рассмотренных в предыдущей главе. Исходя из принятого нами определения кибернетических систем, экстремальные системы можно назвать кибернетическими только благодаря этой особенности. Классификация систем с обратной связью показана на рис. 17. Рассмотрим эти системы.

Экстремальный регулятор с отбором одного объекта (из нескольких одновременно существующих). Задача логического элемента в такого рода системах состоит в отборе одного из нескольких объектов, имеющего в данный момент времени максимальное (или минимальное) значение регулируемой величины.

В качестве примера можно назвать систему питания радиоприемника на германиевых триодах от ряда электродинамических микрофонов. Микрофоны устанавливаются в разных, наиболее шумных местах помещения и обращены в сторону возможных источников звука. В каждый момент времени один из них развивает наибольшее напряжение.

Напряжение всех микрофонов подается на схему индикатора максимального напряжения, примеры которого нами уже рассмотрены. Индикатор выбирает микрофон, развивающий в данный момент времени максимальное напряжение, и включает его на питание радиоприемника.

Напряжение на нагрузке поддерживается на максимальном высоком (экстремальном) уровне.

При этом мы предполагаем, что число микрофонов и соотношение сопротивления нагрузки и внутреннего сопротивления микрофонов таково, что простое последовательное соединение источников тока не решает задачи питания приемника.

В данной схеме используется логическое управление, но еще нет явно выраженного контура обратной связи, а следовательно, нет и опасности возникновения автоколебаний (потери устойчивости).

Экстремальный регулятор с опробованием дискретного ряда режимов работы одного и того же объекта (последовательно во времени). Задача логического элемента в данной системе состоит в том, чтобы в сравнительно короткий отрезок времени перепробовать (в произвольном порядке) дискретный ряд значений регулирующего воздействия (случай ступенчатого изменения регулирующего воздействия)

$$\mu, \mu', \mu'', \dots, \mu^n,$$

запомнить установившиеся значения регулируемой величины, получающиеся при этих настройках $\varphi, \varphi', \varphi'', \dots, \varphi^n$ сравнить их между собой, выбрать наибольшее значение регулируемой величины $\varphi_{\text{макс}}$ и установить в системе соответствующее ему регулирующее воздействие $\mu_{\text{макс}}$. Система отбора должна включаться периодически или только при значительных отклонениях регулируемой величины от экстремального значения.

На рис. 19 дан пример такой системы. В той системе, служащей для поддержания температуры свода печи φ на максимально высоком уровне, регулируется коэффициент избытка воздуха μ [65].

Действие системы состоит в следующем: генератор импульсов *ГИ*, периодически включаемый от часового механизма *ЧМ*, приводит в медленное вращение шаговый распределитель *ШР*. Первый контакт распределителя включает

реле P_1 , чем изменяет уставку (настройку) автоматизированного электропривода PC и устанавливает определенное значение скорости вращения вентилятора, подающего в топку воздух. Одновременно производится запись полученной при этом температуры (или ее среднего значения) на запоминающем устройстве $ЗУ_1$. Тахогенератор $ТГ$ в системе регулятора скорости осуществляет обратную связь.

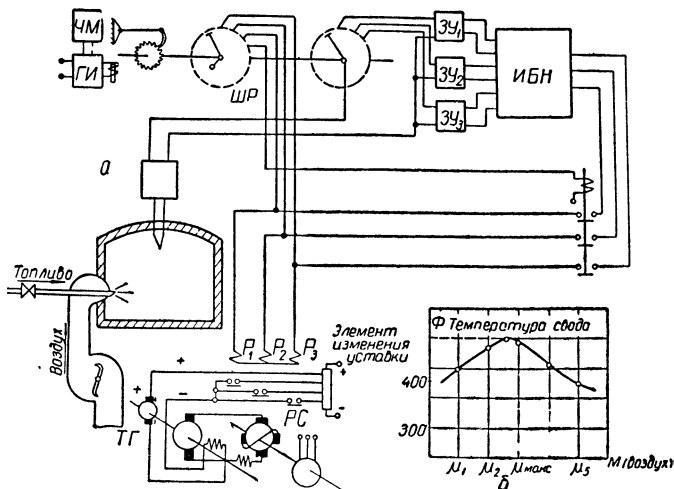


Рис. 19. Экстремальный регулятор с опробованием дискретного ряда режимов (настроек):

a — схема; b — экстремальная характеристика.

Вторым контактом распределителя включается реле P_2 и $ЗУ_2$. Наконец, третьим контактом включается реле P_3 и $ЗУ_3$. Для простоты на схеме рис. 19 показаны только три ступени (три уставки) регулирования скорости подачи воздуха в печь. В действительности ступеней может быть значительно больше. Индикатор наибольшего напряжения $ИБН$ производит сравнение всех значений температуры и выбирает ступень, дающую наибольшую температуру.

После опробования всего дискретного ряда значений регулирующего воздействия (подачи воздуха) шаговый распределитель своим последним (в данном примере четвертым) контактом устанавливает в системе такую скорость подачи воздуха, которая дает максимальную температуру. Через некоторое время цикл поиска экстремального режима повторяется.

Данная система применима только там, где технологический процесс допускает периодическое кратковременное пробное изменение режима в широком диапазоне. Если число сравниваемых настроек велико, то система сравнительно долго ищет оптимальный режим, что является также ее

недостатком. В системах, рассматриваемых ниже, эти недостатки проявляются в меньшей степени.

Регулятор со статистическим, беспорядочным, отбором режима. Задача логического элемента в данной системе состоит в отборе первого попавшегося режима (уставки) системы стабилизации $\mu = \text{const}$, при котором регулируемая величина φ_1 превышает определенное значение $\varphi_1 > \varphi_2$. Отбор режима прекращается сразу после того, как регулируемая величина достигла требуемого значения. Нет необходимости сравнивать между собой все уставки, все режимы. Это сокращает время отбора. Так как система

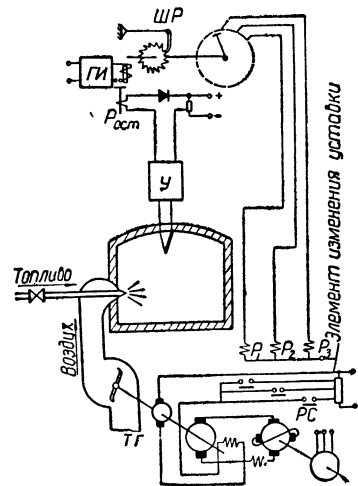


Рис. 20. Регулятор со статистическим (беспорядочным) отбором режима.

не допускает снижения регулируемой величины ниже определенного значения, то ее скорее всего можно отнести к стабилизирующим системам. Система не является экстремальной в полном смысле этого слова, но по идее тесно связана с рассматриваемыми нами системами.

Пример схемы регулятора со статистическим отбором приведен на рис. 20. Пусковое реле (на схеме не показано) включает шаговый распределитель ШР, который в произвольном порядке осуществляет ряд уставок регулятора скорости РС до тех пор, пока одна из них не даст температуру свода, при которой сработает реле остановки Рост и процесс отбора режима на этом закончится¹.

¹ Для ускорения процесса поиска статистический отбор может происходить не только последовательно, но и параллельно по нескольким группам.

Пуск системы поиска режима происходит время от времени, периодически или как только разомкнутся контакты реле останковки. В последнем случае пуск устройства отбора происходит автоматически, как только регулируемая величина примет недопустимо низкое значение. Это и обуславливается наличием замкнутой обратной связи в данной системе. Статистический характер отбора режима определяется тем, что исходное положение шагового распределителя не фиксируется, т. е. устанавливается случайно. Статистический отбор уставки целесообразно применять только в системах, где показатель качества φ может принимать только два значения (например, «устойчива» или «неустойчива»), как в гомеостате Эшби [66]), а также в самоулучшающихся системах, обладающих способностью к «обучению», которым статистический принцип придает свойства универсальности (см. раздел «Обучающиеся системы»).

Экстремальные регуляторы с упорядоченным, или детерминированным, отбором режима. Статистический отбор оптимального режима менее продолжителен, чем отбор по системе, сравнивающей все варианты уставки. Дальнейшее повышение быстродействия достигается в системах с упорядоченным отбором, в которых сравниваемые режимы переключаются в определенной закономерности. Эту закономерность часто удается выбрать так, что достаточно сравнить между собой всего два-три соседних режима, чтобы найти требуемый режим. Целью кибернетических систем автоматического регулирования (САР) с экстремальным отбором является установление и поддержание такого режима работы системы (таких значений регулирующих воздействий), при котором регулируемая величина φ , называемая также показателем качества режима, принимает наибольшее или наименьшее (экстремальное) возможное, в данных условиях работы, значение (минимум ошибки, максимум производительности, к. п. д. и пр.).

Во многих случаях объект регулирования имеет естественную экстремальную характеристику по одному или по нескольким регулирующим воздействиям

$$\varphi = f(\mu) \text{ или } \varphi = f(\mu_1, \mu_2) \text{ при } \lambda = \text{var.}$$

В других случаях можно искусственно сформировать характеристику объекта экстремального типа. Методы такого формирования еще недостаточно разработаны.

Вопрос о способах упорядочения отбора также требует еще детальной разработки. Ограничимся одним примером. Допустим, что регулирующее воздействие μ может принимать только дискретный ряд значений $\mu_{11}, \mu_{12}, \dots, \mu_{1n}$. В связи с этим и показатель экстремума φ (при некотором значении возмущения $\lambda = \text{const}$) также имеет ряд значений. Если объект таков, что значения $\varphi_{11}, \varphi_{12}, \varphi_{13}, \dots, \varphi_{1n}$

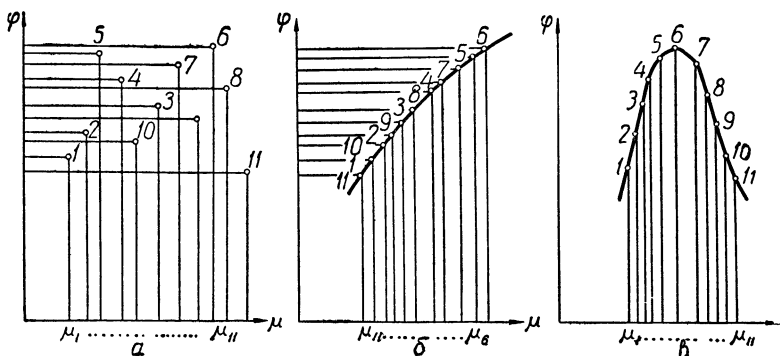


Рис. 21. К разработке упорядоченного отбора режима:

a — заданное множество дискретных режимов; *б* — формирование характеристики объекта для применения системы стабилизации; *в* — формирование характеристики экстремального типа для поиска режима точки *б*.

всегда (т. е. при всех значениях λ) расположены в одной и той же последовательности любого вида, то нетрудно путем подбора очередности включения регулирующих воздействий искусственно формировать как непрерывно возрастающую характеристику (пригодную для применения стабилизирующего регулятора), так и характеристику экстремального типа (для применения экстремального регулятора).

В качестве иллюстраций открывающихся здесь возможностей на рис. 21 показано, как множество дискретных режимов (*a*) может быть преобразовано так, чтобы составить непрерывно возрастающую характеристику (*б*), а также так, чтобы была образована экстремальная характеристика объекта регулирования (*в*).

Единственным условием допустимости такого преобразования является требование сохранения взаимного расположения точек на плоскости $\varphi-\mu$ при изменениях возмущений. При любых возмущениях режим, отвечающий точке b , должен давать наибольшее значение φ . Если при одном значении возмущения $\lambda = \lambda_1$

$$\varphi_6 > \varphi_7 > \varphi_{10} > \varphi_2 > \varphi_5 > \varphi_9 \text{ и т. д.,}$$

то это же соотношение (неравенство) должно сохраниться и при другом значении $\lambda = \lambda_2$.

При наличии экстремальной характеристики (или при ее искусственном формировании) упорядоченный отбор режима достигается сравнительно просто.

Ясно, что при этом достаточно сравнить между собой всего два-три режима, чтобы точно установить, в какую сторону следует изменить регулирующие воздействия. Направление этого изменения должно быть направлением движения к экстремуму. Другими словами, достаточно знать знак отношения $\frac{\Delta\varphi}{\Delta\mu}$, чтобы установить требуемое направление изменения регулирующего воздействия μ .

Действительно, пусть система по очереди пробует все значения регулирующего воздействия, начиная с самого малого и постепенно переходя все к большим значениям, тогда

$$\Delta\mu > 0.$$

Если при этом рабочий режим системы находится слева от экстремума, то значения регулируемой величины все время будут возрастать $\Delta\varphi > 0$. Но как только рабочая точка (отвечающая состоянию системы) перейдет через экстремум O_2 , регулируемая величина начнет уменьшаться. Следовательно, слева от экстремума $\frac{\Delta\varphi}{\Delta\mu} > 0$, а справа $\frac{\Delta\varphi}{\Delta\mu} < 0$.

При движении системы в обратном направлении, т. е. при постепенном уменьшении регулирующего воздействия, $\Delta\mu < 0$.

Но здесь в отличие от предыдущего справа от экстремума $\Delta\mu > 0$ и слева $\Delta\mu < 0$. Следовательно, снова слева

$\frac{\Delta\varphi}{\Delta\mu} > 0$ и справа $\frac{\Delta\varphi}{\Delta\mu} < 0$. Таким образом, знак отношения $\frac{\Delta\varphi}{\Delta\mu}$ показывает, в какую сторону нужно включить сервомотор, чтобы режим системы приближался к экстремуму O_2 . Следует отметить, что учет знака направления движения $\Delta\mu$ не менее важен, чем учет знака изменения регулируемой величины $\Delta\varphi$.

Системы, в которых нет элемента, учитывающего направление движения, т. е. изменений регулирующего воздействия и регулируемой величины, не работоспособны.

До сих пор мы рассматривали систему, имеющую дискретный ряд значений регулирующего воздействия

$$\mu, \mu', \mu'', \mu''', \dots, \mu^n.$$

При $n \rightarrow \infty$, когда число таких значений неограниченно возрастает, мы получаем систему непрерывного действия.

В такой системе роль отношения $\frac{\Delta\varphi}{\Delta\mu}$ играет производная $\frac{d\varphi}{d\mu}$. Знак производной определяет требуемое направление изменения режима системы.

Рассмотрим основные разновидности систем с упорядоченным отбором.

Системы с автоколебательным поиском не содержат в своей схеме генераторов пробных возмущений (например импульсов). Они представляют собой замкнутую цепь, состоящую из следующих элементов: объект регулирования — элемент логического действия — реле — сервомотор — объект регулирования.

Автоколебательные системы, как показано на рис. 17, имеют две разновидности: а) системы, действующие по производной¹ $\frac{d\varphi}{d\mu}$; б) системы, удерживающие пиковое значение φ .

Схемы автоколебательных систем подробно рассмотрены нами ранее [16] и [18]. Конкретные примеры этих схем будут рассмотрены в гл. VIII.

Системы с вынужденными колебаниями и отличаются наличием в схеме командного генера-

¹ Эта разновидность автоколебательных систем называется иногда также системами, действующими по производным $r\varphi$ и $r\mu$, так как практически производная $\frac{d\varphi}{d\mu}$ заменяется этими двумя производными.

тора, задающего определенный цикл действий, или генератора модулирующего воздействия, подающего на вход объекта регулирования колебания определенной частоты и амплитуды.

В свою очередь, системы с вынужденными колебаниями можно разделить на группы: а) системы шагового типа и б) системы с модулирующим воздействием. Рассмотрим примеры системы с вынужденными колебаниями.

Схема модели системы экстремального регулирования шагового типа. Как известно, магнитный усилитель обладает экстремальной V-образной характеристикой $I_{\sim} = f(I_y)$ и поэтому его удобно использовать в качестве модели объекта регулирования. Внешние возмущения действуют на объект и могут быть имитированы различным образом.

Изменяя ток в обмотке смещения, можно перемещать характеристику (на плоскости ток выхода — ток управления) по горизонтали. Введение обратной связи позволяет нарушить симметрию характеристики. По вертикали характеристику можно смещать подпиткой нагрузки током от стабилизированного источника через большое сопротивление или изменением напряжения питания и т. д.

Кроме модели объекта регулирования *МОУ*, на рис. 22 изображены: генератор импульсов *ГИ*, шаговый распределитель *ШР*, элемент логического действия *ЭЛД*, тахогенератор *ТГ*, исполнительный двигатель *ИД*. Исполнительный двигатель вращается до тех пор, пока сумма ампервитков постоянного тока магнитного усилителя не станет равной нулю

$$\Sigma a\omega_{\sim} = 0$$

и ток выхода магнитного усилителя *МУ* достигнет наименьшего (экстремального) значения

$$I_{\sim} = I_{\sim\text{мин}}$$

Затем система совершает вокруг $I_{\sim\text{мин}}$ небольшие колебания.

Таким образом, данная модель представляет *своеобразную следящую систему, у которой ток в одной обмотке постоянного тока повторяет все изменения тока в другой обмотке с небольшими колебаниями*

$$I_{y_1} = \kappa I_{y_2}$$

Это еще раз подтверждает (с другой точки зрения) мысль о сходстве экстремальных и следящих систем регулирования. Для обеспечения такого следящего действия в системе происходят следующие процессы. Генератор импульсов заставляет непрерывно (или время от времени) вращаться шаговый распределитель (искатель). Последний выполняет цикл из четырех команд (положений).

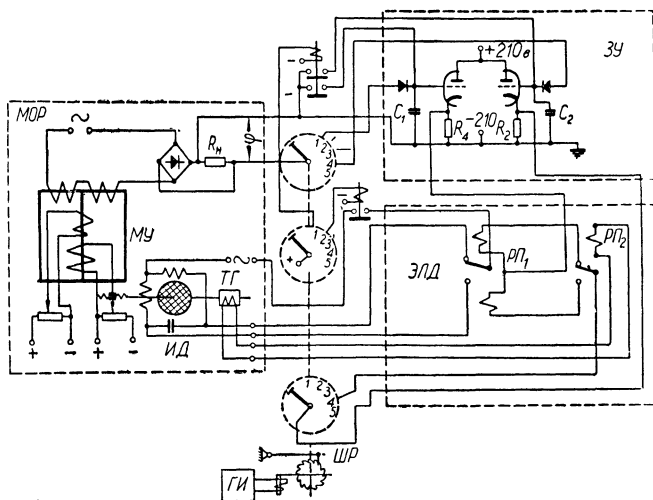


Рис. 22. Схема модели системы экстремального регулирования шагового типа тахогенератором.

В первом положении распределителя происходит стирание записей на первом и втором запоминающем устройстве (разряд конденсаторов C_1 и C_2).

Во втором положении — запись первого значения показателя экстремума φ_1 (тока выхода магнитного усилителя).

В третьем положении — включение исполнительного двигателя на небольшое определенное время (шаг). Особенно точную величину шага дает применение в схеме импульсных двигателей (СПТ, СПЧ и др.).

В четвертом положении — запись второго значения показателя экстремума φ_2 и сравнение его с первым $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$. Если система сделала шаг в сторону приближения к экстремуму, то никаких переключений в элементе логического действия не происходит. В противном случае одно

из поляризованных реле *РП* переключается и, следовательно, в следующем цикле система сделает шаг в обратную сторону, по направлению к экстремуму¹.

Тахогенератор позволяет произвести учет направления изменения регулирующего воздействия, так как показывает, в какую сторону вращается сервомотор, и тем самым обеспечивает правильное действие логического элемента. Наличие в схеме элемента, учитывающего направление вращения исполнительного двигателя, является принципиально необходимым.

На рис. 23 представлена схема без тахогенератора, в которой последний заменен переключателем и дополнительным поляризованным реле, «запоминающим» направление вращения двигателя. В отличие от предыдущей схемы здесь цикл содержит пять команд. В четвертом положении распределителя также устанавливается («запоминается») направление вращения исполнительного двигателя, а на пятом происходит сравнение первого и второго значений показателя экстремума. В остальном действие схемы не отличается от предыдущего описания.

Схема модели системы экстремального регулирования с модулирующим воздействием². Генератор модулирующего воздействия непрерывно подает прямоугольные разнополярные импульсы напряжения на дополнительную обмотку магнитного усилителя, являющегося в данной модели объектом регулирования.

Частота импульсов выбирается весьма низкой (в несколько раз меньше величины, обратной постоянной времени объекта регулирования). Это необходимо для того, чтобы инерция объекта регулирования существенно не изменяла фазы колебаний выходного напряжения U_{φ} (рис. 24).

Выходное напряжение магнитного усилителя подается на релейный фазовый дискриминатор *ФД*, работа которого поясняется осциллограммами напряжений, показанными на рис. 24, б.

На выходе дискриминатора после сглаживающего фильтра находится поляризованное реле *РП*, которое включает исполнительный двигатель *ИД* (промежуточные реле на схеме

¹ Мы рассматриваем только системы, у которых нет специальных «пробных» шагов, а «рабочий» шаг всегда совпадает с «пробным».

² Один из первых экстремальных регуляторов по типу системы с модулирующим воздействием описан П. Насленом [2].

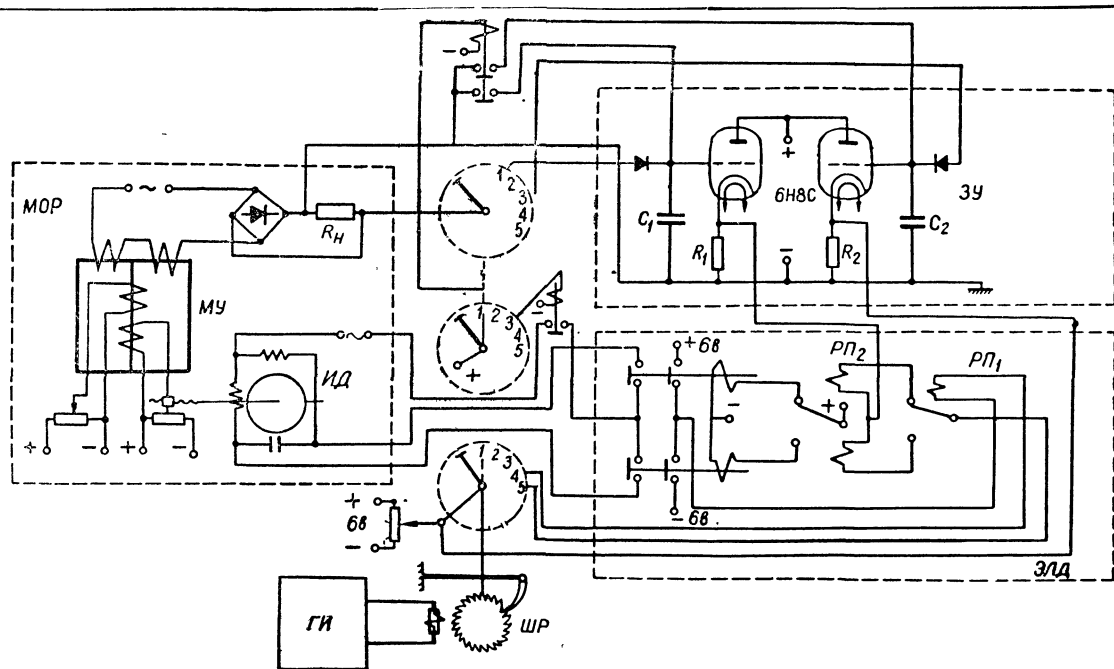


Рис. 23. Схема модели системы экстремального регулирования шагового типа без тахогенератора (условные обозначения те же, что и на рис. 22).

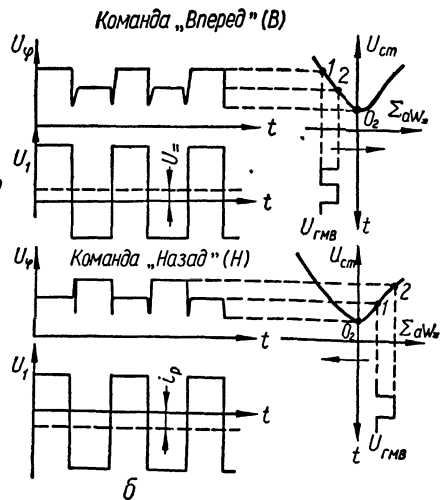
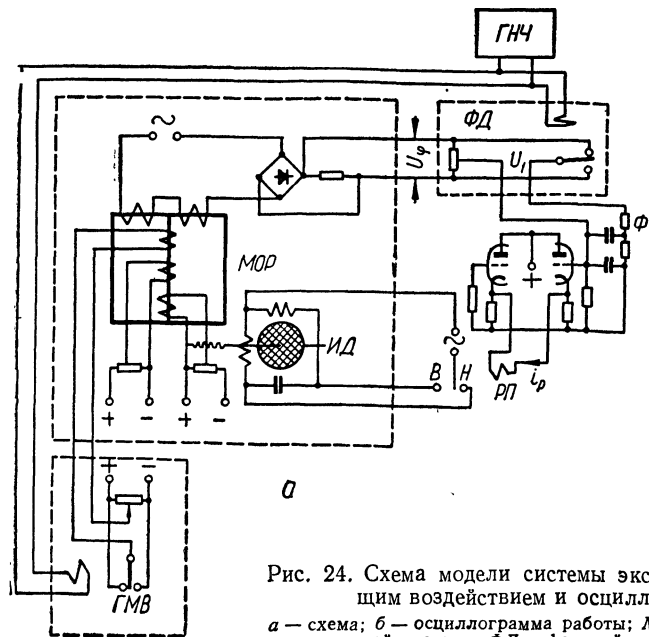


Рис. 24. Схема модели системы экстремального регулирования с модулирующим воздействием и осциллограммы, поясняющие ее действие:

а — схема; б — осциллограмма работы; МОР — модель объекта регулирования, ГНЧ — генератор низкой частоты, ФД — фазовый дискриминатор, Ф — фильтр, РП — поляризованное реле, ИД — исполнительный двигатель, ГМВ — генератор модулирующего воздействия.

го алгоритмом «стирание записи — первая запись — шаг — вторая запись — сравнение», целесообразно применить другой цикл, например, алгоритм «стирание записи — первая запись — шаг — шаг — шаг — вторая запись — сравнение», обеспечивающий наиболее быстрое изменение режима работы системы, а следовательно, и достижение экстремума.

Автоматическое изменение алгоритма (цикла) выполняет реле, измеряющее величину приращения показателя экстремума за один шаг. Если приращение мало, то это означает, что система находится вблизи экстремума и нужна первая программа. Если же, наоборот, приращение за один шаг велико (система находится далеко от экстремума), то нет причин действовать слишком осторожно и целесообразно работать по второму алгоритму.

Например, если экстремальная характеристика объекта достаточно близка к параболе, то вдали от экстремума O_2 один шаг изменения регулирующего воздействия μ дает большее приращение регулируемой величины φ , чем вблизи экстремума. Это обстоятельство используется для того, чтобы ускорить движение системы в том случае, когда она находится далеко от экстремума. Схема такой системы достаточно проста. Специальное реле, реагирующее на величину изменения φ , переключает систему с медленного цикла работы на более быстрый. Например, если $\varphi_1 - \varphi_2 < 10$ в, шаговая система осуществляет цикл «стирание записей — запись первого значения φ — один шаг изменения μ — запись второго значения φ — сравнение».

Если же $\varphi_1 - \varphi_2 > 10$ в, то реле переключает систему на ускоренный цикл «стирание записей — запись первого значения φ — несколько шагов изменения μ — запись второго значения φ — сравнение».

Данная система является экстремальной системой с самоизменяющимся алгоритмом действия.

Преимущества такой системы в смысле быстродействия очевидны. Под быстродействием мы понимаем величину, обратную времени перехода системы, вызванного изменением возмущения, от режима колебаний вокруг одной точки экстремума к режиму колебаний вокруг другой точки экстремума.

Система с опробованием в первую очередь наиболее вероятных режимов. В такой системе специальные счетные реле регистри-

руют число включений каждого из режимов. При поиске оптимального режима (в системе со статистическим беспорядочным отбором) в первую очередь опробуются те режимы, которые чаще всего бывают в системе. Это значительно сокращает время статистического отбора требуемого режима.

Рассматриваемая система по замыслу весьма близка к самоулучшающейся телефонной связи (фирмы «Филлипс»), в которой для сокращения времени соединения абонентов последние периодически переключаются так, чтобы те из них, которые чаще всего телефонируют друг другу, были включены поближе на телефонном коммутаторе [52].

Самоулучшающиеся вероятностные системы являются наиболее типичными представителями систем, способных к «обучению» (подробнее см. стр. 174).

Комбинированные системы экстремального регулирования

Выше мы говорили о том, что наиболее совершенными (в смысле точности и быстродействия) являются комбинированные системы, сочетающие в себе принципы управления по возмущению и по регулируемой величине. Познакомившись со всевозможными системами, работающими по одному из указанных двух принципов, рассмотрим схему комбинированной системы.

В качестве примера комбинированной экстремальной системы на рис. 18,в дана схема регулирования угла поворота лопастей гидротурбины по одному возмущению (напору воды).

Более совершенная система, осуществляющая две нелинейные компаундирующие связи по двум возмущениям (по напору воды и по нагрузке турбины) разработана В. А. Богомоловым и В. Л. Бениным [6].

Еще более совершенной является комбинированная система, в которой, кроме компаундирующих связей по возмущениям, применены обратные связи с элементами логического действия.

Пример такой комбинированной системы дан на рис. 25. В ней одновременно применены регулятор с обратной связью $\mathcal{E}P_1$ и регулятор по возмущению $\mathcal{E}P_2$ (см. рис. 18,в). Действие первого регулятора состоит в следующем: измерительные элементы W , L и φ вырабатывают напряжение, пропорциональное отношению мощности генератора к расходу воды. Это отношение является регулируемой вели-

чиной (показателем экстремума) и должно поддерживаться на максимально возможном уровне путем выбора угла поворота лопастей турбины μ . Для этого напряжение φ подается на экстремальный регулятор $\mathcal{E}P_1$ (лучше всего шагового типа или с модулирующим воздействием). Исполнительный двигатель этого регулятора непрерывно, путем

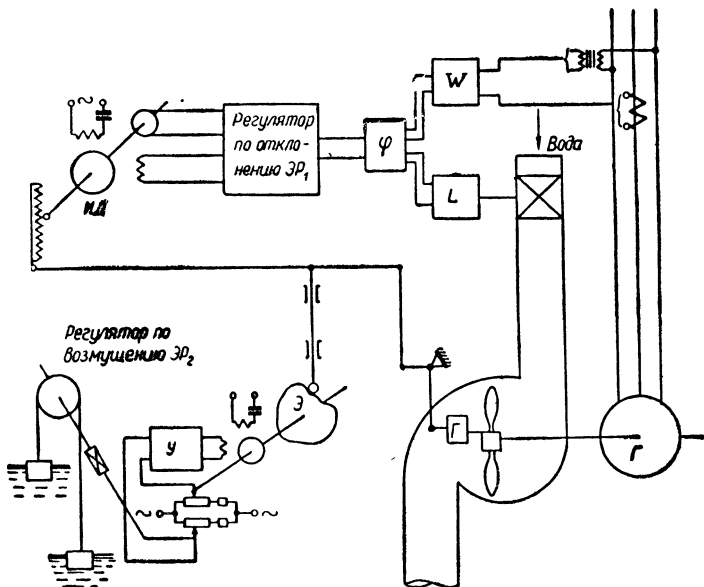


Рис. 25. Комбинированный экстремальный регулятор угла поворота лопастей гидротурбины:

W — измерительный элемент мощности, L — измерительный элемент расхода воды, φ — измерительный элемент, дающий $\varphi = \frac{W}{L}$, $\mathcal{E}P_1$ — экстремальный регулятор по регулируемой величине, $\mathcal{E}P_2$ — экстремальный регулятор по возмущению (см. рис. 18), ИД — исполнительный двигатель, Э — эксцентрик, Г — гидрогенератор.

колебаний отыскивает требуемый угол поворота лопастей. Если бы регулятор по возмущению — напору воды $\mathcal{E}P_2$ — работал идеально, а других возмущений в системе не было и характеристики элементов системы не изменялись во времени, то регулятор $\mathcal{E}P_1$ был бы не нужен. Регулятор по отклонению регулируемой величины $\mathcal{E}P_1$ необходим только для устранения смещения рабочей точки с экстремального положения O_2 , вызываемого другими неосновными

возмущениями (помехами). Таким образом, уже на данной стадии изучения можно отметить два явных преимущества комбинированных систем:

а) мощность и амплитуда колебаний исполнительного элемента регулятора по отклонению регулируемой величины $\mathcal{E}P_1$ может быть значительно снижена, а частота поисковых колебаний повышена;

б) регулятор по отклонению регулируемой величины $\mathcal{E}P_1$ (если он выполнен по схеме с модулирующим воздействием) включается сравнительно редко. Он может вообще долго не действовать, пока суммарное влияние разнообразных второстепенных возмущений (помех) не вызывает заметного смещения рабочей точки от точек экстремальной работы. К вопросам теории комбинированных экстремальных систем мы вернемся в гл. VIII и IX.

Выше были рассмотрены примеры различных по устройству самонастраивающихся экстремальных систем и составлена их классификация (см. рис. 17). В последующих главах мы рассмотрим другие типы систем технической кибернетики, чтобы обосновать указанную выше аналогию принципов действия этих систем.

НЕКОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ОБРАТНЫЕ СВЯЗИ

Выясним, можно ли осуществить отрицательную обратную связь экстремального регулятора обычными средствами без применения ЭЛД специального вида и без поисковых колебаний в ее цепи.

Выше мы убедились в том, что *компаундирующие связи по возмущениям* $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, применяемые в экстремальных регуляторах, почти ничем не отличаются от компаундирующих связей, применяемых, например, в системах стабилизации. В них нет каких-либо особенных ЭЛД. Они не являются колебательными, т. е. выполняют свою функцию без поисковых колебаний. Единственной особенностью этих связей является то, что они чаще всего являются нелинейными со специально подобранной нелинейностью, в то время как в системе стабилизации обычно применяются линейные компаундирующие связи.

В отличие от этого обратные связи по регулируемой величине φ , применяемые в экстремальных регуляторах, чаще всего являются колебательными¹, благодаря чему и

¹ Колебательной обратной связью мы называем неустойчивый колебательный контур обратной связи.

осуществляется поиск точки экстремума O_2 . Неустойчивость (колебательность) обратных связей достигается *благодаря применению в них сервомотора* (с постоянной или пропорциональной скоростью) с весьма малой зоной нечувствительности, управляемому ЭЛД по логической схеме равнозначности (см. выше).

С первого взгляда кажется, что поиск экстремума при помощи обратных связей обязательно должен быть колебательным. Однако в действительности это не так. Можно указать, по крайней мере, два-три случая, когда отрицательная обратная связь экстремального регулятора может быть неколебательной.

Известно, что при использовании пропорционального логического элемента автоколебательные системы описываются линейными уравнениями и при определенных условиях могут приходить к экстремуму без поисковых колебаний [19]. Такие устойчивые системы следует более точно называть экстремальными системами с неколебательной (гибкой) обратной связью. Только в случае использования логического элемента релейного типа поисковые колебания в цепи обратной связи часто являются неизбежными (см. рис. 7).

Рассмотрим еще несколько примеров неколебательных обратных связей, не содержащих релейных ЭЛД, т. е. таких, которые могут при определенных условиях выполнять задачу нахождения и поддержания экстремума устойчиво без поисковых колебаний.

Системы, в которых несколько точек экстремальной характеристики существуют одновременно. Одновременное существование двух точек экстремальной характеристики может быть в системах с такими объектами, у которых, по крайней мере, два режима (отвечающие двум точкам экстремальной характеристики) *существуют в одно и то же время*. Например, для поиска наиболее яркого участка горизонта можно применить как колебательную обратную связь (когда один фотоэлемент колеблется и сравнивает яркость двух точек, наблюдаемых одновременно), так и неколебательную обратную связь (когда два фотоэлемента направлены под небольшим углом на горизонт и сравнение их напряжений позволяет судить о том, в какую сторону должна вращаться система).

Обратную связь обычного неколебательного типа можно применить и при решении такой, например, задачи, как

поиск наиболее глубокого места реки или канала. Для этого достаточно непрерывно сравнивать показания, по крайней мере, двух эхолотов, направленных на два соседних участка дна (рис. 26).

Системы с запирающими и шунтирующими вентилями.

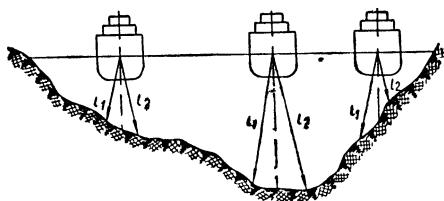


Рис. 26. Системы, где поиск экстремума максимума глубины может быть неколебательным (экстремум отыскивается путем уравнивания длины лучей l_1 и l_2).

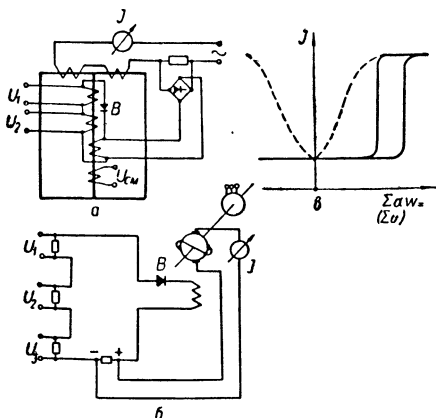


Рис. 27. Объекты экстремального регулирования, для которых может быть применена неколебательная обратная связь: *a* — магнитный усилитель; *b* — электромашинный усилитель; *в* — характеристики объектов *a* и *b*.

Иногда можно применить неколебательную обычную обратную связь без специальных ЭЛД, если свойства объекта регулирования подобны свойствам магнитного или электромашинного усилителя.

На рис. 27 изображены две системы с глубокой положительной обратной связью (коэффициенты обратной связи значительно больше единицы). Благодаря наличию шунтирующего (рис. 27, *a*) или запирающего (рис. 27, *b*) вентилей *B*, полярность включения которых должна быть соответственно подобрана, положительной связи не удастся «прокинуть» систему. Все, что может сделать эта связь — это привести систему в точку минимального тока, т. е. к экстремуму O_2 .

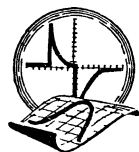
Во всех установившихся режимах сумма ампер-витков (рис. 27, *a*) или сумма напряжений (рис. 27, *b*) в цепи суммирования равны нулю, поэтому данные системы можно рассматривать не только как экстремальные, но и как

системы суммирования или даже как следящие системы, у которых изменение μ точно повторяет изменение λ .

Таким образом, положительная обратная связь с противовключенным или шунтирующим клапаном решает задачу экстремального регулирования тока магнитного усилителя или электромашинного усилителя без колебательного поиска.

Системы, в которых показатель экстремума φ равен отклонению некоторой величины от заданного значения. Обратная связь обычного типа может быть применена и в том случае, когда показателем экстремума является отклонение некоторой величины от заданного значения. В этом случае мы имеем дело, собственно, с хорошо известной задачей стабилизации, которую можно решить как при помощи обычной обратной связи, так и при помощи аппаратуры экстремального регулирования отклонения (на минимум). Пример такой задачи мы рассмотрим в гл. VII.

Вполне возможно, что в ближайшем будущем число примеров решения задачи экстремального регулирования без применения колебательной обратной связи будет дополнено новыми примерами.



Глава IV

КИБЕРНЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С САМОИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ПРОГРАММОЙ ИЛИ АЛГОРИТМОМ ДЕЙСТВИЯ

ЗАДАЧИ САМОИЗМЕНЕНИЯ ПРОГРАММЫ

Системы с самоизменяющейся программой действия представляют собой программные системы автоматического регулирования, в которых программа движения непрерывно или периодически изменяется в определенном соответствии с изменением внешних условий или внутреннего состояния системы. В обычных программных системах регулируемая величина изменяется в соответствии с наперед заданной программой. Программа изменения регулируемой величины может быть задана во времени или пространстве [16]. Например, температура отжига пермаллоя обычно изменяется в функции времени. Часовой механизм в определенных моменты времени изменяет уставку системы стабилизации температуры. Программа движения шахтного подъемного механизма задается в функции пути. В каждой точке пути система должна двигаться с определенной, наперед заданной скоростью.

Как бы ни была задана программа во времени или пространстве, она до сих пор устанавливалась человеком до пуска системы в ход. Новые кибернетические программные системы с самоизменяющейся программой отличаются тем, что они непрерывно или при появлении различных внутренних или внешних возмущений производят сравнение и смену ряда программ для того, чтобы выбрать из них наилучшую или удовлетворительную программу движения.

В данной главе мы рассмотрим ряд примеров систем с самоизменяющейся программой и произведем их класси-

фикацию. Главной целью классификации является установление аналогии принципиальных схем рассмотренных выше систем с самоизменяющейся уставкой (режимом работы) и систем с самоизменяющейся программой.

Системы с самоизменяющейся программой только еще начинают развиваться. В ближайшем будущем мы будем свидетелями появления большого количества разнообразных новых практических задач, решаемых с помощью систем с самоизменяющейся программой, большинство которых будут подчинены главному требованию: свести тот или иной показатель к *минимуму* или *максимуму* или, наконец, к заданной величине. Этот показатель по аналогии с предыдущим мы будем называть *регулируемой величиной*, или *показателем качества программы*. Показатель же экстремума ϕ в экстремальной системе с самоизменением уставки аналогично можно назвать *показателем качества уставки*.

Некоторое затруднение в проведении сравнения принципиальных схем систем с самоизменяющейся уставкой и самоизменяющейся программой состоит в том, что среди первых мы не нашли систем более чем с одним показателем качества уставки. Эти системы выбирают режим, исходя только из *одного требования*, а именно: один показатель качества уставки должен иметь экстремальное значение. Системы с самоизменяющейся уставкой, имеющие несколько показателей качества, удовлетворяющие не одному, а нескольким требованиям, еще только разрабатываются. Среди систем с самоизменяющейся программой такие системы уже известны.

Если ограничиться сравнением систем с самоизменением уставки при одном показателе качества и систем с выбором программы по одному требованию, то аналогия схем будет наиболее полной. Поэтому в начале главы мы будем рассматривать только системы, у которых программа характеризуется одним показателем качества, а затем перейдем к более сложным системам с многими показателями качества программы.

ПРИМЕРЫ СИСТЕМ С САМОИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ПРОГРАММОЙ С ОДНИМ ПОКАЗАТЕЛЕМ КАЧЕСТВА

Примерами программных систем, подчиняющихся одному требованию, могут служить системы, в которых изменяется одна величина, например, перемещение, скорость, температура, концентрация раствора и другие величины

по программе, заданной *во времени* или в *пространстве*, причем отклонение действительного выполнения программы от оптимальной может быть оценено, например, одним из следующих показателей качества.

1. Мгновенное значение ошибки на наиболее характерном участке программы. Измеряется датчиком ошибки.

2. Максимальное значение мгновенной ошибки за время выполнения всей программы. Измеряется при помощи устройства, запоминающего максимальное значение ошибки, например, при помощи пик-вольтметра.

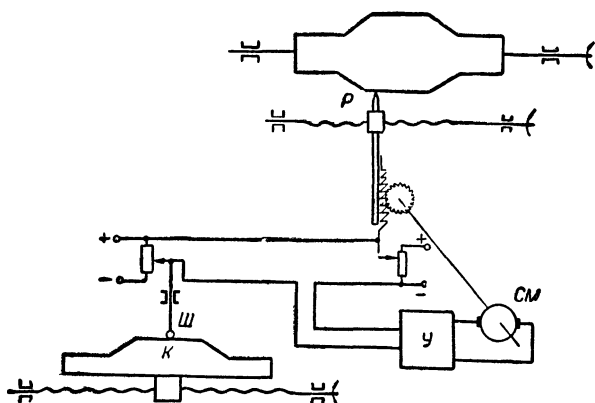


Рис. 28. Схема программного управления перемещением резца.

3. Среднее, интегральное значение ошибки за все время выполнения программы. Измеряется при помощи интеграторов, суммирующих ошибку или при помощи специальных оптических проекторов.

Один из показателей принимается за показатель качества всей программы.

На рис. 28 изображена схема программного управления перемещением резца для металлообрабатывающего станка (для краткости рассматривается программное управление перемещением по одной координате, вдоль прямой). Требуемая форма детали задается при помощи копира *К*, а в последнее время — в виде записи цифр двоичного кода [15]. Электрическая (или гидравлическая) следящая система, состоящая из усилителя *У* и сервомотора *СМ*, заставляет резец *Р* повторять все движения щупа *Щ*. Ясно,

что рассматриваемая копировальная система не свободна от ошибок, возникающих из-за наличия зазоров, люфтов, износа резца, ошибок следящей системы и т. д. Задачей самоизменения программы в данном случае может быть выбор такой исходной программы (такого профиля копира), при котором деталь после обработки в наибольшей степени принимает требуемые размеры. Ошибки (мгновенная или усредненная) между требуемой формой детали и действительным ее исполнением должны быть сведены к минимуму. В данном примере, как и в случае экстремального самоизменения уставки, мы имеем дело с системой, которая должна быть подчинена только *одному* требованию: наибольшее или среднее отклонение формы детали от формы копира должно быть наименьшим

$\varphi \rightarrow \varphi_{\text{мин}}$.

На рис. 29,а дана схема системы программного регулирования скорости шахтной подъемной установки. Одна из задач системы состоит в том, чтобы, например, при спуске скипа (сосуда) в шахту в самом конце пути (в определенном его месте) получить заданную весьма малую скорость движения. На остальных же участках пути система должна идти с возможно более высокой скоростью. Практически это достигается сравнительно просто и сводится к

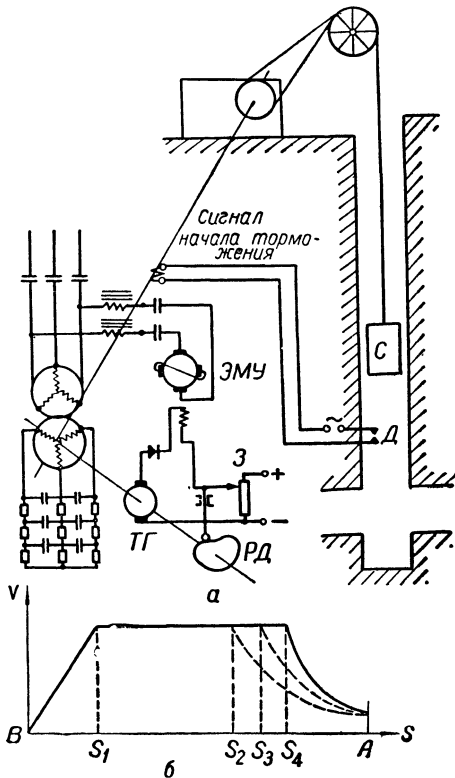


Рис. 29. Программный регулятор скорости шахтной подъемной установки:
а — схема; б — программа изменения скорости.

выдерживанию трапецевидной программы изменения скорости в пути. Из программ хороши те, которые при достаточно малой общей продолжительности спуска дают достаточно малую скорость в точке A (рис. 29, б). Таким образом, в данном примере мы снова имеем одно главное требование, в соответствии с которым должна действовать система саморегулирования программы. Отклонение скорости в точке A от требуемого значения должно быть наименьшим

$$\varphi \rightarrow \varphi_{\text{мин.}}$$

Принцип работы системы состоит в следующем: в начале программы подъемный двигатель разгоняется до полной скорости (участок B_1S_1). Затем система движется с постоянной скоростью (участок S_1S_4). Наконец, в точке пути S_4 начинается процесс торможения. Здесь вступает в действие так называемая система динамического торможения. Пуск системы торможения может быть осуществлен от специального контактного датчика D , установленного в определенном месте пути. Датчик включает в обмотку статора двигателя постоянный ток электромашинного усилителя ЭМУ, управляемого по разности напряжений тахогенератора $TГ$ и задатчика скорости $З$. Задатчик скорости перемещается, получая движения от так называемого ретардирующего диска $РД$, представляющего собой эксцентрик, профиль которого выбирается так, чтобы получить требуемое изменение скорости в пути. Более детально с действием установки можно познакомиться в работах [8], [14], [81].

К системам с самоизменением программы относятся также «регуляторы темпа», подбирающие масштаб времени выполнения программы в соответствии с каким-либо показателем качества. В регуляторах темпа все участки программы сокращаются или удлиняются в равной степени.

Например, регулятор темпа может быть применен для равномерного изменения скорости всех участков заводского конвейера в зависимости от какого-либо показателя качества.

Существуют регуляторы темпа, изменяющие скорость выполнения отдельных этапов программы в функции времени. Например, в регуляторах командоаппаратов для заводских конвейерных линий, демонстрировавшихся на выставке в Лейпциге в 1957 г., отдельные участки программы удлинялись или сокращались по разным законам, чтобы учесть усталость рабочих. Для того чтобы производитель-

ность конвейера в среднем была максимальной, темп работы в самом начале и, особенно, в конце смены, автоматически замедляется.

Примером системы с самоизменяющейся программой может также служить самоулучшающаяся система экстремального регулирования шагового типа, рассмотренная выше. Задача состоит в выборе такой программы действий, при которой система быстрее всего достигает экстремума (при заданном от него начальном отклонении). Здесь имеется одно требование: время достижения экстремума должно быть минимальным

$$\Delta t = \varphi \rightarrow \varphi_{\min}.$$

Сложнее обстоит вопрос в таких системах, как система программного управления температурой печи отжига пермаллоя, температурой печей для сушки кирпича, красильных машин (барок) и некоторых других объектов. Здесь программа изменения температуры во времени должна быть подобрана так, чтобы получить наилучшее качество продукции в наиболее короткое время. Только при условии, что качество продукта может быть оценено одним числом (например φ), мы получим один показатель качества программы, экстремум которого желательно достичь.

Рассмотренные примеры показывают, что хотя речь идет о выборе программы, в конце концов эта задача часто сводится к выбору экстремального режима работы системы, поэтому уже сейчас выявляется общность идей экстремального регулирования уставки и программы, что и служит основой для проводимой ниже аналогии.

КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ С САМОИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ПРОГРАММОЙ И ОДНИМ ПОКАЗАТЕЛЕМ КАЧЕСТВА

Как и в предыдущей главе, основное разделение рассматриваемых систем можно произвести в первую очередь по принципу управления, используемому в данной системе. Как уже указывалось выше, существует два принципа управления: а) по возмущениям, осуществляемое по разомкнутым цепям, б) по регулируемой величине, осуществляемое отрицательными обратными связями и, кроме того, комбинированное управление, объединяющее оба принципа.

Системы с самоизменяющейся программой разомкнутого типа, управляемые по возмущениям, могут быть, в свою очередь, подразделены по виду характеристики на:

- а) системы с двумя программами;
- б) системы с несколькими программами;
- в) системы с плавным изменением программы.

Наглядными примерами этих трех типов систем являются системы программного управления шахтной подъемной машиной. В работе [14] предложено осуществить компаундирование системы по основному возмущению (нагрузке).

Регулирование шахтной подъемной машины с воздействием по нагрузке рассматривалось также в работе О. М. Крыжановского¹. Основным возмущением, изменяющим ход выполнения заданной программы, является нагрузка (вес) скипа. Нагруженный скип обладает большой инерцией и, следовательно, в период торможения имеет большой выбег.

Для того чтобы обеспечить в точке A (рис. 29, б) одно и то же значение скорости (т. е. чтобы достичь экстремального значения показателя качества программы), предложено изменять время начала торможения. При тяжелом скипе начало торможения должно быть в точке S_2 , при средней загрузке — в точке S_3 и, наконец, при незагруженном скипе — в точке S_4 . Как видно из рис. 29, б, при таком самоизменении программы скорость движения скипа в точке A обеспечивается почти постоянной, что и требуется.

На рис. 30 представлены принципиальные схемы осуществления самоизменяющейся программы по весу скипа. Здесь показан указатель положения скипа в стволе шахты, снабженный контактными устройствами. Вес скипа при помощи индуктивного датчика Q преобразуется в пропорциональное ему напряжение переменного тока. Один из вариантов такого датчика разработан в Институте горного дела АН УССР инж. Г. Э. Зелинкевичем. В схеме рис. 30, а реле P , включенное на выход усилителя $У$, производит переключение двух программ. На схеме рис. 30, б число программ увеличено до четырех. Здесь

¹ Вопросы теории автоматического регулирования шахтных скиповых подъемных установок, «Автоматика», № 1, 1956.

переключение производит электронный автоматический компенсатор (потенциометр) *П*. Угол поворота сервомотора *СМ* компенсатора пропорционален весу скипа. Наконец, в схеме 30,в сервомотор компенсатора производит плавное, пропорциональное весу скипа изменение программы. В других задачах могут потребоваться более сложные нелинейные законы изменения программы в функции возмуще-

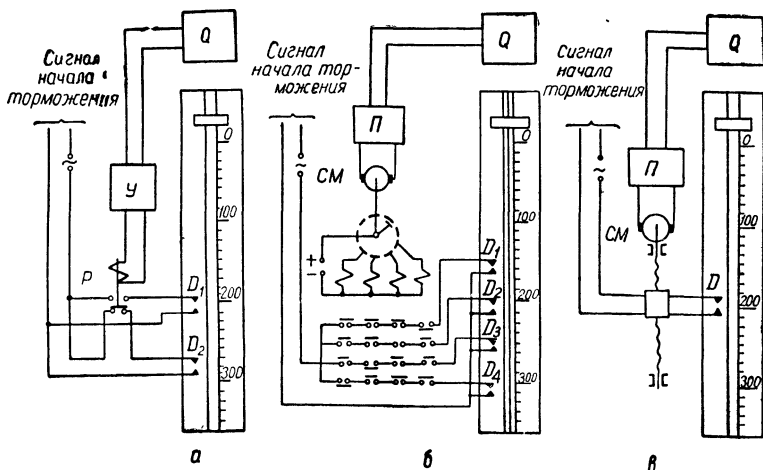


Рис. 30. Схемы самоизменения программы шахтной подъемной машины по весу скипа:

а — с двумя программами; *б* — с несколькими программами; *в* — с плавным изменением программы.

ний. Выбор требуемой в каждом конкретном случае зависимости производится по хорошо известной методике выбора оптимальных нелинейных компаундирующих связей систем регулирования. К этому вопросу мы вернемся ниже.

Другим примером системы с релейным переключением двух программ может служить схема автоматического электропривода портального крана. В этой схеме имеется два датчика возмущений, напряжение которых непрерывно сравнивается. Если один из датчиков дает более высокое напряжение, выполняется одна программа управления, если другой, — другая. Эти программы управления меняются в зависимости от внешних факторов.

Системы с самоизменяющейся программой замкнутого типа, управляемые по регулируемой величине (т. е. по показателю качества программы), имеют значительно больше

разновидностей. В отличие от систем с управлением по возмущению при создании систем с обратной связью не требуется точное знание функции оптимальной характеристики компаундирования $\mu = f(\lambda)$, обеспечивающей максимум показателя качества программы φ . Система сама находит режимы, отвечающие этой характеристике.

Аналогично классификации, данной в предыдущей главе (см. рис. 17), можно указать следующие основные разновидности систем управления по регулируемой величине с самоизменением программы при одном показателе качества:

а) с отбором одной программы из нескольких одновременно существующих;

б) с опробованием всех программ последовательно во времени;

в) со статистическим отбором программы до первой удовлетворительной;

г) с упорядоченным, главным образом, экстремальным отбором программы;

д) с самоулучшающимся отбором программы.

Рассмотрим эти разновидности систем в той же последовательности, которую мы приняли в предыдущей главе.

Системы с отбором одной программы из нескольких одновременно существующих. При наличии нескольких одновременно существующих программ, так же как и при сравниваемых режимах (см. гл. III), может быть применен как колебательный поиск оптимальной программы, так и поиск без колебаний. В качестве первого примера рассмотрим систему программного управления станками, в которой программа задана во времени. Представим себе ряд совершенно одинаковых металлообрабатывающих станков, изготавливающих одноименные детали. Применим для управления этими станками систему программного управления. Пусть, например, требуемый профиль детали представляет собой линию $\Psi(t)$, изображенную на рис. 31. Из-за наличия ряда причин действительное исполнение детали будет иметь вид кривой $\Phi(t)$, т. е. система будет обладать переходной ошибкой и ошибкой следования.

Для устранения ошибок (а в случае нелинейности системы для их всемерного уменьшения, или «минимизации») необходимо задать станку некоторую видоизмененную программу $\Psi'(t)$, тогда система будет точно следовать по требуемой программе $\Psi(t)$.

Из теории комбинированных систем регулирования из-

известно, что новая программа $\Psi'(t)$ должна представлять собой кривую, ординаты которой равны сумме ординат старой программы $\Psi(t)$, первой и второй производной от нее $\rho\Psi$ и $\rho^2\Psi$, взятых с некоторым весом,

$$\Psi'(t) = \Psi(t) + k_1\rho\Psi = k_2\rho^2\Psi.$$

Для полного устранения ошибки линейной системы величины коэффициентов k_1 , k_2 должны быть выбраны в соответствии с *условием инвариантности в четвертой форме* (см. гл. X). В нелинейной системе таким путем можно резко уменьшить ошибку.

Так как по условию задачи мы располагаем несколькими одновременно работающими станками, то можем задать ряд значений коэффициентам дифференциаторов k_1 , k_2 , для того чтобы быстро установить (путем автоматического сравнительного измерения готовых изделий) те значения, при которых обеспечивается наиболее полное устранение ошибки.

Напомним, что постепенным увеличением k_1 мы можем устранить ошибку следования h , а увеличивая постепенно k_2 (в системах второго порядка) — устранить и переходную ошибку [16]. При нелинейности системы значения коэффициентов k_1 , k_2 должны постепенно изменяться в процессе перехода системы от одного режима к другому (например, в точке B для полного устранения переходной ошибки может потребоваться большее значение амплитуды импульса второй производной, чем в точке A).

Коэффициенты k_1 , k_2 (определяющие в данном случае регулирующие воздействия) можно подбирать по очереди или методами градиента, наискорейшего спуска (в шаговых системах), одновременной модуляции кратными частотами (в системах с модулирующим воздействием) и другими методами (см. работы Е. К. Круг, В. И. Стаховского и др.).

На рис. 32 дан пример схемы отбора одной программы из нескольких путем выбора k_1 (выбор k_2 не показан).

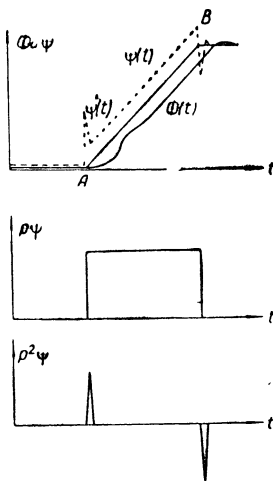


Рис. 31. Выбор программы $\Psi'(t)$, дающей точное следование по линии $\Psi(t)$.

Три станка 1, 2, 3 работают по программам, отличающимся значениями коэффициента k_1 . Результаты обработки сравниваются при помощи индикатора наименьшей ошибки ИМН. Легко представить себе, что, определив таким путем наилучшее значение k_1 , система (в следующем цикле работы) может установить его для всех станков и работать с выбранной наилучшей программой до тех пор, пока какие-либо возмущения (например, изменение харак-

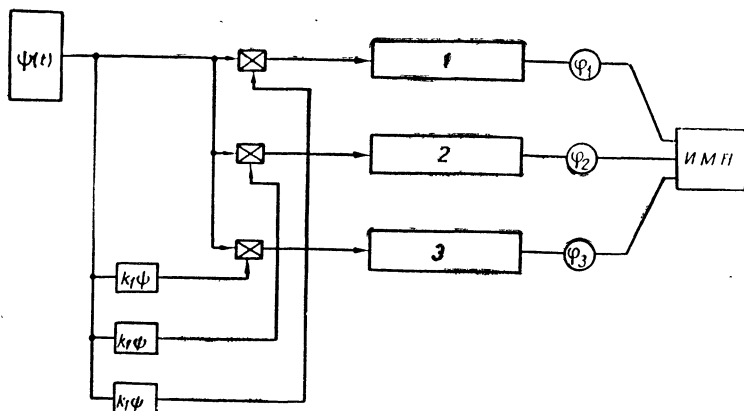


Рис. 32. Система с отбором одной программы из нескольких одновременно существующих.

теристик оборудования, материала, детали, износ резцов и др.) не нарушат точное следование по программе. Здесь снова потребуется произвести отбор нового значения k_1 , наилучшего для новых условий работы. Кибернетические системы не эффективны, если система не подвергается никаким внешним или внутренним возмущениям и изменений коэффициентов k_1 , k_2 не требуется.

В качестве второго примера системы с отбором одной программы из нескольких рассмотрим систему выбора направления движения «черепахи», где программа задана в пространстве и времени. Можно представить себе «черепаху», снабженную большим числом фотоэлементов, направленных по секторам во все стороны возможного движения (рис. 33). При помощи индикатора наибольшего напряжения ИБН легко установить, какой из фотоэлементов наиболее освещен и, следовательно, в какую сторону нужно двигаться «черепахе». Релейная следящая система должна совместить на-

правление каретки «черепahi» с направлением оси наиболее (или наименее) освещенного фотоэлемента.

«Черепaha» с таким поисковым устройством использует выбор одной программы (направления) движения из ряда одновременно существующих возможных программ.

Системы с опробованием всех возможных программ последовательно во времени. В предыдущих двух примерах (станок с программным управлением и «черепaha») требуется одновременное наличие ряда станков или ряда фотоэлементов. Нетрудно представить себе другой способ решения тех же задач, отличающийся применением ряда запоминающих устройств.

В первом примере для выбора оптимальных значений k_1 и k_2 ряд значений этих коэффициентов устанавливается на одном и том же станке. При помощи запоминающих устройств фиксируется (в виде напряжений или цифр) результат обработки детали для каждой комбинации значений коэффициентов. Затем напряжения запоминающих устройств подаются на индикатор наименьшего напряжения и устанавливается, какая комбинация значений k_1 , k_2 дает наиболее точное выполнение программы.

Системы со статистическим, беспорядочным, отбором программы до первой удовлетворительной. Эти системы не используют запоминающих устройств. Сравнение возможных вариантов программы происходит хаотически до тех пор, пока одна из них не даст достаточное значение показателя качества программы. После этого поиск программы прекращается.

Статистический отбор программы целесообразно применять в системах, где показатель качества может принимать только два значения (например, как в гомеостате Эшби), так как при большом числе сравниваемых программ время отбора оказывается слишком большим. При числе программ более двух легко сформировать характеристику экстремального типа и применить упорядоченный экстремальный поиск программы.

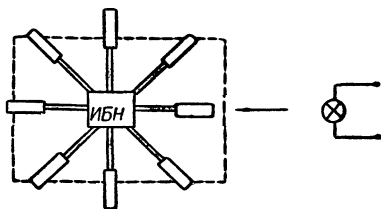


Рис. 33. Система отбора направления движения «черепahi», использующая несколько фотоэлементов, направленных по секторам во все стороны.

Отбор программы может быть чисто *статистическим* (при котором система беспорядочно производит смену некоторого числа программ до получения первой удовлетворительной программы). Кроме того, система может производить так называемый *упорядоченный* отбор.

Системы с упорядоченным отбором программы. Принципы упорядочения отбора мы рассмотрели выше. В случаях, указанных в предыдущей главе, сравниваемые между собой программы могут опробоваться в определенном порядке, например, таком, при котором *показатель качества программы* φ как функция *номера программы* N образует характеристику экстремального типа. При этом время поиска оптимальной программы сокращается, так как для выбора программы достаточно сравнить между собой два-три соседних варианта.

В примере выбора программы станка при постепенном изменении коэффициента k_1 ошибка следования h сначала уменьшается, а затем увеличивается, т. е. *характеристика* $h = f(k_1)$ *имеет экстремальный характер*.

Во втором нашем примере — «черепаше» — также весьма просто осуществить упорядоченный выбор программы движения: освещенность фотоэлемента в функции угла поворота «черепашки» изменяется по синусоиде, следовательно, она также имеет экстремальный характер.

Как только мы расположим сравниваемые программы так, чтобы образовалась экстремальная характеристика, мы получим возможность применить для выбора программы всю технику экстремального регулирования.

Экстремальные регуляторы (как и другие системы приспособления характеристик) могут быть применены, например, к цифровой вычислительной машине как объекту управления. Показателем качества может служить величина, обратная длительности решения задачи, или точность. Регулирующими воздействиями являются наборы программ, пригодных для решения задач данного типа. Система подбирает наиболее эффективную программу. Такая система иногда называется системой с «*эвристической программой*», потому что она сама выбирает программу решения задачи.

Системы с самоулучшающимся отбором программы. Читатель, по-видимому, уже убедился в том, что системы с самоизменением программы при одном показателе качества аналогичны экстремальным системам с самоизменением

уставки при одном показателе экстремума. Поэтому дальнейшее проведение аналогии не представляет большого труда.

Можно представить себе системы с *самоулучшающимся принципом отбора*, в которых правила упорядоченного отбора изменяются в зависимости от условий работы системы так, чтобы время отбора наилучшей программы было наименьшим, а система была наиболее быстродействующей.

Так же, как и в предыдущей главе, примерами самоулучшающихся систем с самоизменением программы могут быть системы, изменяющие программу достижения наилучшей программы в зависимости от величины отклонения показателя качества. Например, при больших ошибках в обработке детали можно ускорить ход изменения коэффициентов k_1 , k_2 , а при малых — действовать более осторожно, малыми шагами.

Можно также представить себе самоулучшающиеся системы со статистическим, беспорядочным, отбором программы, опробующие в первую очередь те из них, которые *вероятнее всего* подойдут для данных условий работы системы. В такой системе потребуются запоминающие устройства, накапливающие опыт работы системы и указывающие наиболее часто используемые в данных условиях программы.

Комбинированные системы с самоизменяющейся программой

Теория комбинированных систем регулирования может быть весьма плодотворно применена и для создания наиболее совершенных систем с самоизменяющейся программой.

Выше мы рассмотрели пример системы автоматического регулирования скорости шахтной подъемной машины с самоизменением программы по весу скипа. Ясно, что в данной системе изменение веса скипа не является единственным возмущением, влияющим на ход программы. На показатель качества программы, которым является скорость в точке A (см. рис. 31), влияет также и напряжение питания двигателей, состояние оборудования и другие причины. Поэтому систему компаундирования регулятора по весу скипа целесообразно дополнить как другими компаундирующими связями¹, так и обратной связью с ЭЛД,

¹ Компаундирование регулятора по напряжению сети осуществлялось М. Н. Василевским [8].

производящей колебательный поиск наименьшего отклонения скорости скипа в точке *A* от заданного значения непрерывного ряда возмущений.

В качестве примера на рис. 34 дана схема системы колебательного поиска момента начала торможения. Действие ее состоит в следующем: шаговый распределитель *ШР*

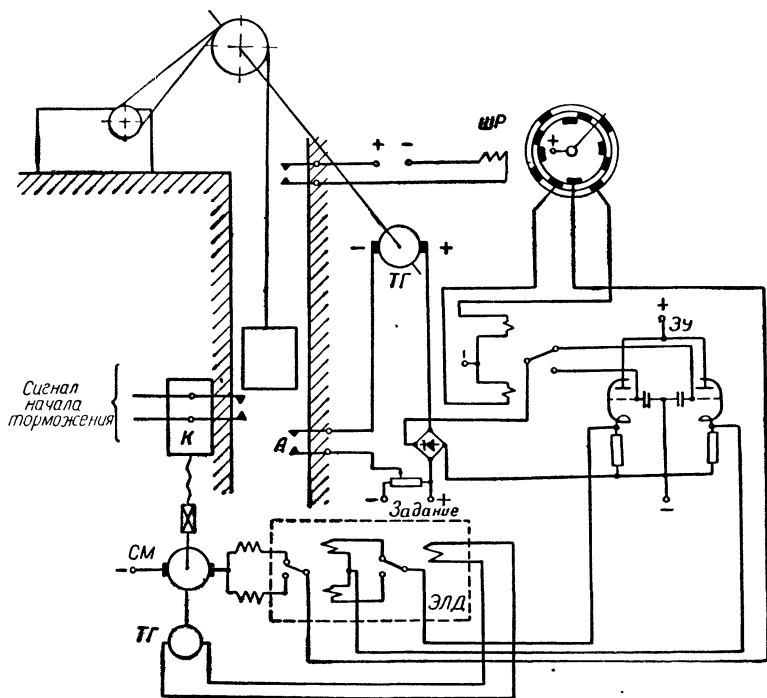


Рис. 34. Система поиска момента начала торможения при помощи обратной связи с *ЭЛД*.

поворачивается на один шаг за каждый подъем скипа. В течение одного подъема он записывает напряжения тахогенератора *ТГ* в момент прохождения скипом интересующей нас точки *A*. При втором подъеме производится шаг изменения регулирующего воздействия — перемещается каретка *К*, на которой укреплен датчик начала торможения. При третьем подъеме записывается новое значение напряжения тахогенератора в точке *A*. Схема *ЭЛД* не-

прерывно производит сравнение записанных напряжений и включает сервомотор *СМ* в сторону уменьшения отклонения скорости скипа в точке *А* от заданного значения.

Таким образом, за три-четыре подъема скипа система автоматически устанавливает момент отключения, отвечающий наилучшим образом новым условиям работы. Система (рис. 34) является сравнительно медленно действующей. Изменения веса скипа, напряжения питания и других воздействий должны происходить нечасто.

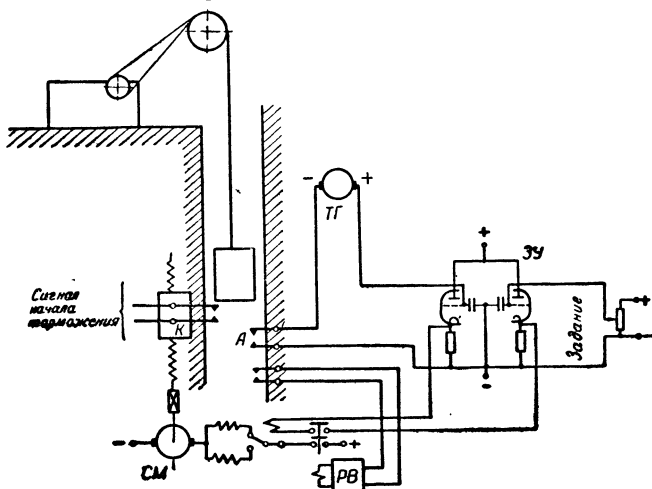


Рис. 35. Система стабилизации скорости скипа в точке *А*.

Более быстродействующей является система, схема которой дана на рис. 35. Эта система хотя и имеет некоторые элементы системы экстремального регулирования, изображенной на рис. 34 (например, запоминающее устройство *ЗУ*, записывающее напряжение тахогенератора *ТГ* в момент прохождения скипом точки *А*), но все же является скорее системой стабилизации напряжения тахогенератора, а следовательно, скорости скипа в точке *А*. Особенностью схемы является применение реле времени *РВ*, включающего элемент сравнения регулируемой скорости и задания на определенный короткий промежуток времени.

Большее быстродействие системы (рис. 35) объясняется тем, что она реагирует после каждого измерения отклонения скорости, в то время как предыдущая система (рис. 34)

вырабатывает регулирующее воздействие только после сравнения результатов двух таких измерений.

Наконец, на рис. 36 представлена комбинированная система, содержащая как компаундирующие разомкнутые связи по основным возмущениям (Q_1 — весу скипа и Q_2 — напряжению сети), так и обратную замкнутую связь (Q_3) по скорости скипа в точке A . Эта схема может быть

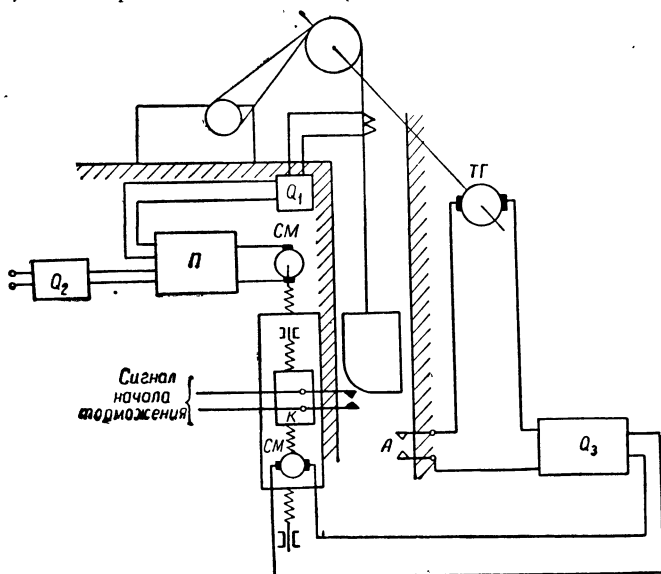


Рис. 36. Комбинированная система поиска момента начала торможения.

наиболее быстродействующей и наиболее точной при условии правильного выбора ее данных. Методика расчета параметров системы (рис. 36) не отличается от методики расчета любой другой комбинированной системы регулирования [16].

Схемы (рис. 34, 35 и 36) составлены в предположении, что скорость скипа в точке A в основном определяется положением путевого выключателя каретки K . Это предположение не всегда оправдывается, так как скорость зависит от многих других факторов. Тем не менее, чтобы показать общность возможных решений различных кибернетических задач, нам иногда приходится рассматривать и такие отдель-

ные системы регулирования, которые не имеют большого практического значения. Такое общее рассмотрение полезно с познавательной точки зрения.

Рассматривая принципиальные схемы систем с самоизменением программы, мы убедились, что они классифицируются так же, как и системы с самоизменением уставки. Аналогию схем самоизменения уставки и самоизменения программы можно считать доказанной.

Однако всякая аналогия не означает полного тождества. Легко обнаружить примеры систем с самоизменяющейся программой, для которых не находится аналогии среди систем с самоизменением уставки. К таким исключениям относятся, например, системы с самоизменением программы по ее участкам, системы с разверткой во времени или пространстве и некоторые другие. Общим для них является наличие *нескольких* показателей качества программы.

ПРИМЕРЫ СИСТЕМ С САМОИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ПРОГРАММОЙ И НЕСКОЛЬКИМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ КАЧЕСТВА

Если показателем качества программы является какой-либо один показатель, то большой разницы в принципах построения схем регуляторов с самоизменением программы или с самоизменением уставки, как мы убедились, нет. Различие в основном состоит в том, что усредненный показатель качества программы нельзя измерять непрерывно.

Если в системах с самоизменением уставки или параметров можно выбрать характер регулирования (непрерывный или дискретный), то в системах с самоизменением программы мы *вынуждены применить только дискретное регулирование*, так как значения показателя экстремума в них поступают в конце выполнения каждой программы через некоторые промежутки времени.

Приведенная классификация экстремальных систем с непрерывным измерением показателя экстремума остается, в основном, в силе и для систем дискретного регулирования, какими являются системы с самоизменением программы.

При наличии дополнительного устройства, называемого *экстраполятором*, различие в системах непрерывного и дискретного измерений показателя экстремума совсем незначительно.

Экстраполятор, как это следует из самого названия, «выдает» предполагаемые промежуточные значения

показателя экстремума, находящиеся между точками точного его измерения. Вопросы устройства и работы экстраполяторов мы здесь не рассматриваем.

Применение запоминающего устройства и экстраполяторов позволяет сохранить значение показателя экстремума и воспользоваться им в любой требуемый момент времени.

Большое отличие системы с самоизменением программы от других кибернетических систем возникает лишь в том случае, когда показателем качества программы берется мгновенное или усредненное значение ошибки за небольшое время (этап), а не за все время выполнения программы.

Здесь мы получаем систему с несколькими показателями качества соответственно числу этапов. Приведем пример такой системы.

Системы, требующие применения элементов развертки значений ошибки во времени и пространстве. Выше мы рассматривали пример программной системы копировального станка, в которой происходило самоизменение коэффициентов дифференциаторов k_1 и k_2 по одному показателю качества программы φ , характеризующему всю программу в целом.

Имеются также системы, в которых изменение программы происходит не после, а в ходе ее выполнения. Значение поправки, вносимой в программу в данный момент времени, зависит от ошибки на соответствующих участках изделий, изготовленных по предыдущим программам. В этих системах приходится применять те или иные способы *развертки* значений ошибки во времени (если программа задана во времени) или в пространстве (если программа задана в пути). При этом системы имеют бесконечное множество показателей качества соответственно всем значениям поправок.

Поясним идею развертки на конкретном примере системы управления копирсвальным станком с самоизменением программы обработки (рис. 37).

Данная система предусматривает непрерывную коррекцию программы, осуществляемой в данном ее цикле, по среднему значению ошибки в трех предыдущих циклах выполнения программы. Для этого производится непрерывное измерение ошибки на трех деталях, обозначенных цифрами 1, 2, 3. Усреднение результатов этих измерений

(каждое с некоторым весом) производится по формуле

$$\varphi_{\text{ср}} = \frac{\alpha_1\varphi_1 + \alpha_2\varphi_2 + \alpha_3\varphi_3}{3}.$$

Усредненная величина вводится в программу в виде добавочного напряжения. Необходимость усреднения ряда замеров объясняется тем, что по своей идее схема предна;

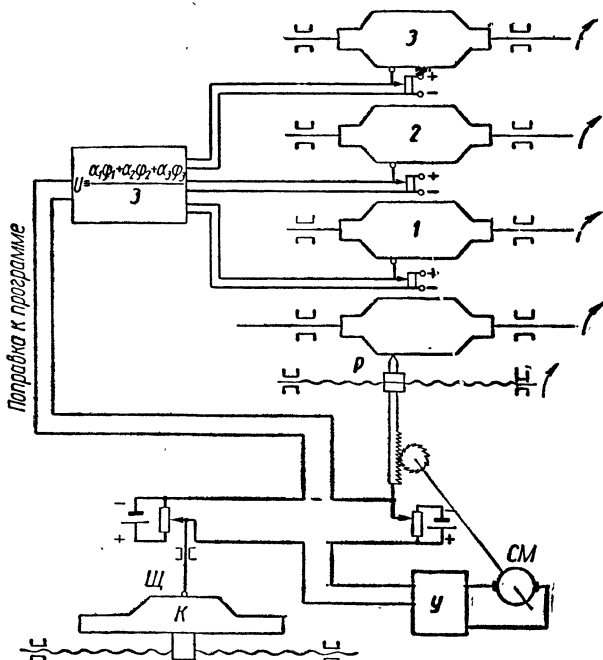


Рис. 37. Схема системы с самоизменением программы по среднему значению ошибки в трех предыдущих циклах обработки детали.

значена для учета систематически возникающих ошибок и не должна по возможности реагировать на случайные отклонения.

Если по условиям производства одновременное измерение трех деталей невозможно, то для этого надо составить схему с запоминающими устройствами, выполняющую те же функции, что и данная схема.

Системы с самоизменением программы по возмущениям, действующим на

отдельные участки программы и с контролем по этапам. При покрытии металлических изделий слоем другого металла эти изделия переносятся из одной ванны в другую по определенной программе. В первой ванне производится обезжиривание изделия, во второй — промывка, в третьей — покрытие металлом — подкладкой, в четвертой — снова промывка, в пятой — нанесение основного покрытия и т. п.

Допустим, что при некоторой температуре, силе тока, концентрации электролитов (три возмущения) оптимальная программа, обеспечивающая минимальное общее время обработки детали (показатель экстремума) при удовлетворительном качестве изделия, состоит из пяти промежутков времени

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5.$$

Продолжительность каждой из пяти операций (регулирующие воздействия) можно изменять в определенном соотношении с изменением возмущающих воздействий. Например, если концентрация электролита в ванне уменьшилась по какой-либо причине, нужно в некоторой функции от этого уменьшения увеличить время пребывания изделий в данной электролитической ванне и т. п. Таким образом, получаем систему с самоизменением программы *по участкам*, или этапам, в зависимости от возмущений, действующих на этих участках.

Вторым примером системы управления по возмущениям может служить система, в которой каждый этап программы выполняется до тех пор, пока обрабатываемый продукт не достигнет определенного качества. Здесь качество (состояние) является мерой возмущения.

Аналога такой программной системы с контролем по этапам среди систем с самоизменением уставки найти не удастся.

О СИСТЕМАХ С САМОИЗМЕНЕНИЕМ АЛГОРИТМОВ

Только среди кибернетических систем с самоизменением алгоритмов действия можно найти системы, использующие те или иные устройства контроля качества алгоритма по этапам решения задачи. Таким образом, системы с самоизменяющейся программой, или алгоритмом, имеют разновидности, которых нет среди других систем.

Алгоритмом в математике называется последователь-

ность действий, производимых по определенному правилу, приводящая к решению математической задачи.

Алгоритмом в автоматике можно назвать последовательность действий (программу), задаваемую не во времени или пути, а в функции номера этапа, ведущую к решению задачи регулирования.

Кроме указанных выше задач регулирования (стабилизация, программное и следящее регулирование, кибернетические задачи с самоизменением характеристик системы), при помощи применения тех или иных алгоритмов решается задача преобразования одной характеристики в другую или одного кода в другой (например, при переводе текста с одного языка на другой). Таким образом, между понятиями *алгоритм действия* системы и *алгоритм преобразования* есть небольшое различие в типе задачи, решаемой данным алгоритмом. Так как алгоритм является все же своеобразной последовательностью, программой, то вся классификация систем с самоизменением программы сохраняет силу и для систем с самоизменением некоторых алгоритмов. Примеры системы с самоизменением алгоритмов действия и преобразования мы рассмотрим в гл. VI.

Кибернетическая «черепаха». Рассмотрим еще пример программной системы, где самоизменение программы подчиняется не одному, а нескольким требованиям. Таким примером может быть «черепаха» Вальтера [9], [59], [50]. «Черепаха» представляет собой автоматическую игрушку, воспроизводящую все основные черты поведения живой черепахи. Конструктивно она выполнена в виде небольшой тележки на трех колесах, на которой установлены два сервомотора (ход вперед и поворот), электромагнитные реле, электронная аппаратура и питающий аккумулятор.

Если аккумулятор хорошо заряжен, то «черепаха» ведет себя как сытая и ищет темный угол в комнате. Если аккумулятор разряжен, то «черепаха» ищет кормушку. Такой «кормушкой» служит место для зарядки аккумулятора, освещенное сильной электрической лампой. «Черепаха» ищет свет и, подойдя к месту зарядки, стоит там пока не зарядятся аккумуляторы. Затем снова уходит в более темное место комнаты.

Первые «черепахи» Вальтера (под названием «Элси» и «Элмер») реагировали на источник света только в зависимости от состояния своего «желудка» (аккумулятора). В следующей разработке («черепаха» «Кора») автор осуще-

ствил еще добавочную реакцию на свист. При свисте «черепаха» замирает, т. е. некоторое время не движется. Если свист повторяется весьма часто, то «черепаха» перестает на него реагировать и продолжает либо искать «кормушку», либо уходит от нее.

Если «черепаха» наталкивается на препятствия, то программа ее действий изменяется (элемент самоизменения программы). Она делает ход назад, поворот, а затем только продолжает поиск «кормушки».

Правила действия (алгоритм) «черепахи» можно записать в виде табл. 5.

Таблица 5

Режимы работы «черепахи»

№ программы	Сигналы	Программы действий «черепахи» «Кора»	
		«Черепаха» голодна (аккумулятор разряжен)	«Черепаха» сыта (аккумулятор заряжен)
1	Сигналов нет («черепаха» ищет источник света)	Ход вперед — поворот, ход вперед — поворот — ход вперед и т. д.	Ход назад — поворот — ход назад — поворот — ход назад и т. д.
2	Сигнал от фотоэлемента («черепаха» нашла свет)	Ход вперед — ход вперед — ход вперед и т. д.	Ход назад — ход назад — ход назад и т. д.
3	Сигнал от контактного устройства, свидетельствующий об ударе о препятствие («черепаха» натолкнулась на препятствие)	Ход назад — поворот — ход вперед и далее по программе № 1 или 2	Ход вперед — поворот — ход назад и далее по программе № 1 или 2
4	Сигнал от микрофона (первый). Подали свисток	Все цепи «черепахи» отключаются на 10 сек.	Все цепи «черепахи» отключаются на 10 сек.
5	Сигналы от микрофона (пять сигналов за последние 10 сек.). «Черепаха» слышит частые свистки	Цепь управления от микрофона отключается на 30 сек.	Цепь управления от микрофона отключается на 30 сек.

В табл. 5 сигналы расположены по силе их действия. Сигнал от контактного датчика имеет преимущество перед сигналом фотоэлемента, а сигнал от микрофона действует сильнее всех других сигналов.

Из таблицы следует, что главными программами являются: программа № 1, обеспечивающая поиск источника света, и программа № 2, обеспечивающая более быстрое движение «черепахи» по направлению к источнику света или от него. Каждая из этих программ может иметь ряд вариантов (количество ходов и величина их не оговаривались выше). Из вариантов программы тот лучше, при котором:

а) «черепаха» быстрее находит наиболее яркий источник света;

б) найдя источник, возможно быстрее движется к нему (или от него).

Важно также, чтобы «черепаха» наиболее точно выполняла требования, указанные в таблице, и не теряла источника света из своего поля зрения, т. е. чтобы, перейдя к программе № 2, не возвращалась снова где-либо в пути к программе № 1. Таким образом, «черепаха» имеет несколько показателей качества программы, кроме того, ее движение еще подчинено ряду дополнительных требований (ограничений).

Ниже мы рассмотрим более подробно схемы управления «черепахи», удовлетворяющие этим требованиям.

После «черепах» английского инж. Вальтера автоматические «черепахи» разрабатывали австрийский инж. Земах, немецкий инж. Эйхер и др.

В СССР различные конструкции «черепах» разрабатывались в Институте автоматики и телемеханики АН СССР (инж. А. М. Петровский и Р. Б. Васильев), в Московском инженерно-физическом институте, в Институте автоматики Грузинской ССР и др. «Черепаха» «Тортилла», описываемая ниже, разработана в лаборатории автоматического регулирования Института электротехники АН УССР. Экспериментальная часть выполнена инженерами Т. Д. Кравцем, Ю. В. Крементуло и Е. И. Шукайло.

С точки зрения техники экстремального регулирования основная программа «черепахи» может быть решена двумя различными способами:

1) при помощи системы колебательного экстремального поиска наиболее яркого места горизонта, осуществляемого одним фотоэлементом («черепаха» «Тортилла-1»);

2) при помощи неколебательной обратной связи, осуществляемой двумя фотоэлементами, направленными под

небольшим углом в две соседние точки горизонта («черепаха» «Тортилла-2»).

В последнем случае мы располагаем всеми точками экстремальной характеристики одновременно и потому можно осуществить систему неколебательного установления экстремума (подробнее см. выше).

Колебательная система благодаря наличию фильтра более помехоустойчива. Неколебательная система проще и надежнее.

Для краткости дадим описание только «черепахи» «Тортилла-1» (с колебательным поиском)¹.

На рис. 38 изображена схема экстремального регулирования направления движения «черепахи» «Тортилла-1». В ней применена система шагового экстремального регулирования, рассмотренная в предыдущей главе.

Система экстремального поиска «черепахи» «Тортилла-1» действует следующим образом. Напряжение, вырабатываемое фотоэлементом ЦГ-4, усиливается при помощи электронного усилителя и поступает затем на контактные устройства шагового распределителя ШР, имеющего четыре поля. Цикл работы системы весьма прост. На первом контакте второго поля шаговый распределитель производит стирание предыдущей записи с первого электронного запоминающего устройства ЗУ₁, а вторым контактом первого поля производится на нем новая (первая) запись напряжения. Третий контакт второго поля осуществляет стирание записи со второго запоминающего устройства ЗУ₂, а третий контакт четвертого поля включает напряжение на сервомотор СМ₁, который поворачивает фотоэлемент на шаг 7,5°. После этого четвертым контактом первого поля производится вторая запись усиленного напряжения фотоэлемента на ЗУ₂, а пятым контактом третьего поля — сравнение напряжений первой и второй записи. Элемент логического действия ЭЛД включает сервомотор СМ₁ в направлении, обеспечивающем движение (вращение) фотоэлемента к направлению экстремальной (наибольшей или наименьшей) освещенности. Затем цикл операций повторяется сначала.

Одиннадцатый и двенадцатый контакты четвертого поля (рис. 39) используются для: а) включения напряжения на

¹ «Черепаха» «Тортилла-2» описана Ю. В. Крементуло в журнале «Автоматика», № 2, 1959.

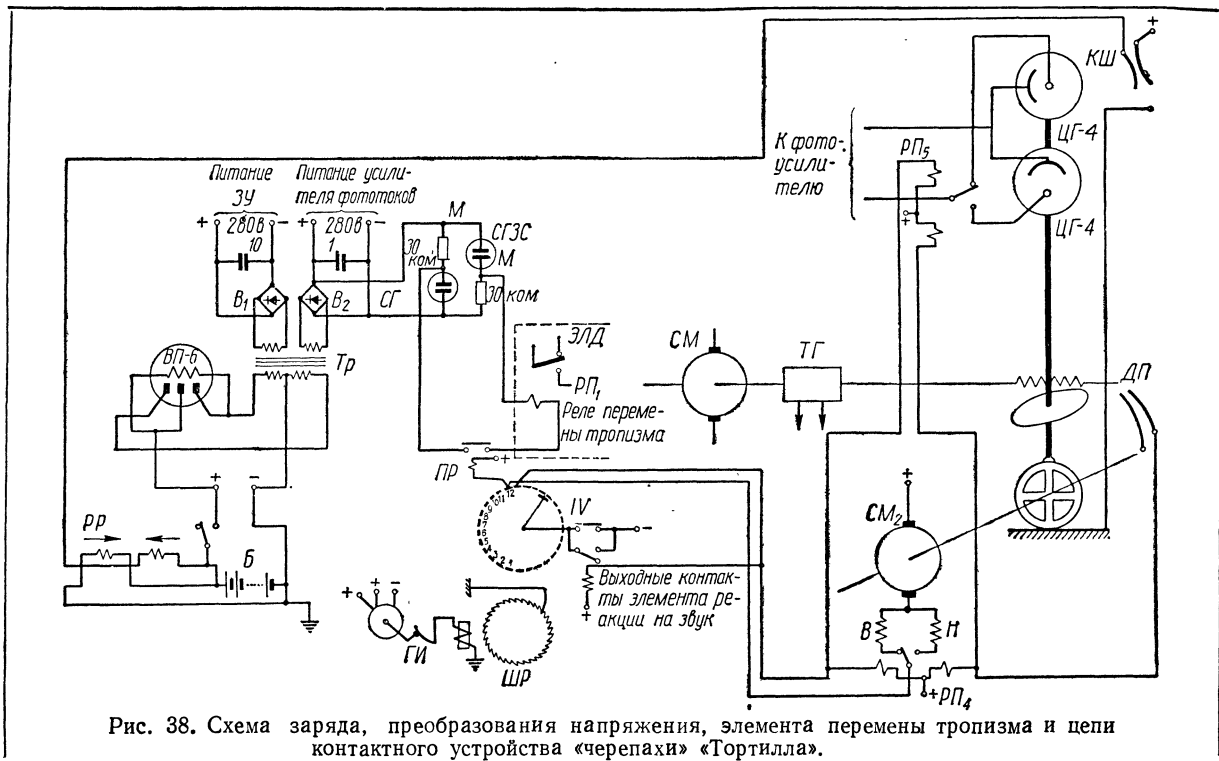
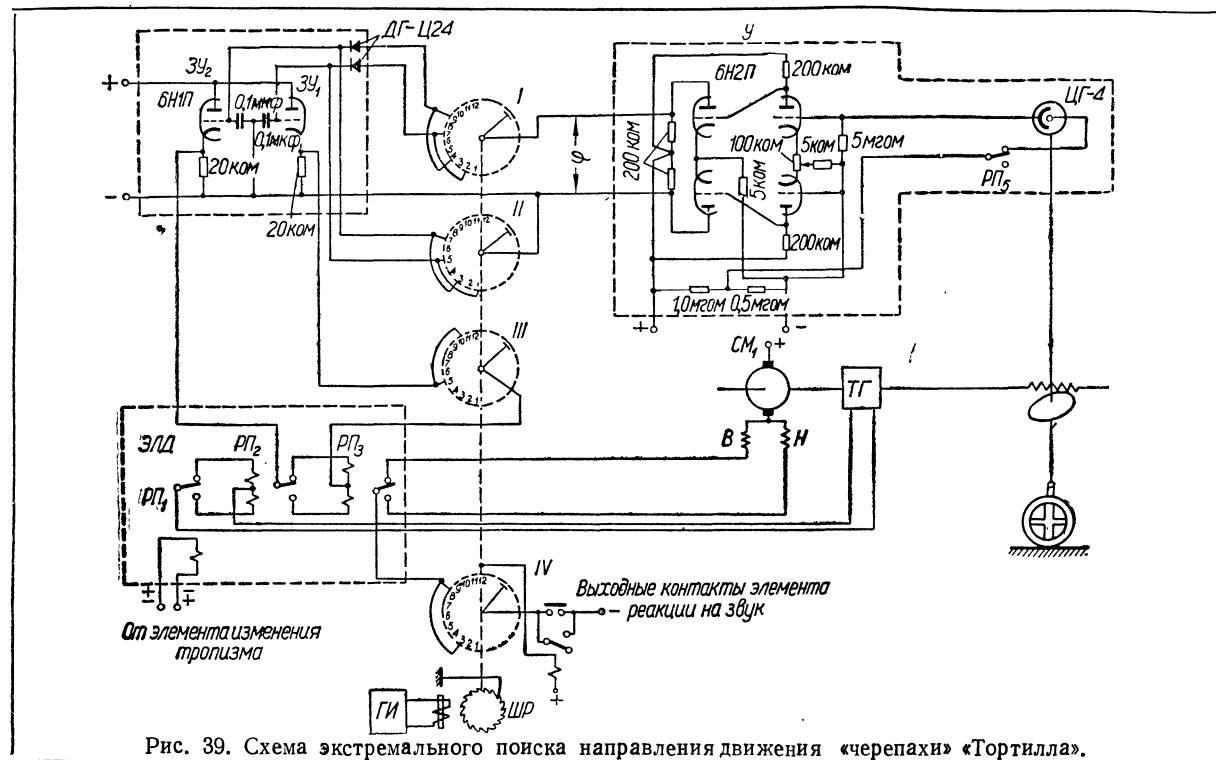


Рис. 38. Схема заряда, преобразования напряжения, элемента перемены тропизма и цепи контактного устройства «черепахи» «Тортилла».



анодов $ЗУ$ и усилителя фототоков. Датчик препятствий $ДП$ при встрече с «черепахой» какого-либо препятствия срабатывает и при помощи реле $РП_4$ изменяет программу хода вперед на программу хода назад. В этом случае «черепаха» делает один шаг назад (на одиннадцатом контакте) и некоторое время двигается по направлению, перпендикулярному с направлением на источник света. Это достигается включением вместо основного вспомогательного

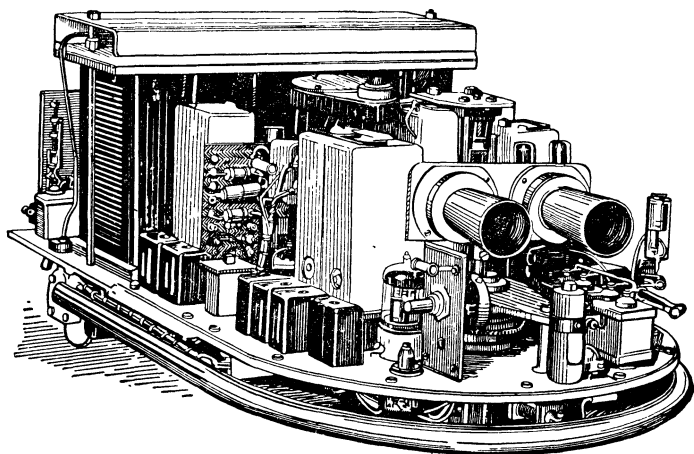


Рис. 41. Общий вид «черепахи» «Тортилла-2».

фотоэлемента, направленного перпендикулярно оси «черепахи». Режим обхода препятствий кратковременный: как только подвижный контакт шагового распределителя дойдет снова до 12-й ламели, то, как видно из схемы (рис. 39), основная программа «черепахи» восстанавливается.

Частота импульсов определяет собой скорость действий «черепахи». Скорость передвижения «черепахи» оказывается достаточной, если полный оборот распределителя происходит за 6 сек. В качестве генераторов импульсов можно использовать контактное устройство, вращаемое отдельным двигателем.

Рассмотрим теперь действие цепи, осуществляющей реакцию «черепахи» на свисток (рис. 40). В качестве микрофона $М$ использована пьезоэлектрическая телефонная трубка. Схема резонансного усилителя подобна схеме акустического управления радиоприемником, описанной в журнале

«Радио», № 4 за 1957 г. Реле P_1 на выходе схемы срабатывает под действием звука (свисток с частотой около 9000 $гц$) и останавливает оба сервомотора $СМ_1$ и $СМ_2$ «черепахи» (рис. 39).

Время остановки «черепахи» определяется параметрами нагрузки (R и C) детектора. Если свистки повторяются редко, то конденсатор C успевает разрядиться, реле P_1 отпускает контакт и «черепаха» начинает снова двигаться. Если же свистки следуют часто, то напряжение на обмотке реле P_1 подымается выше некоторого предела, срабатывает реле P_2 , шунтирует контакт реле P_1 и «черепаха» перестает реагировать на свистки. Блокировка реле P_2 снимается основным распределителем при прохождении через 12-й контакт, если конденсатор к этому времени достаточно разрядится.

График типичного пути «черепахи» «Тортилла-1» к источнику света представляет собой ломаную линию. Общий вид «черепахи» «Тортилла» представлен на рис. 41.

Данные элементов «черепахи» «Тортилла» приведены на рис. 38—40.

Шаг поворота фотоэлемента составляет величину от $7,5$ до 60° при частоте импульсов от $0,5$ до 3 импульсов /сек. «Черепаха» реагирует на источник света (лампа накаливания мощностью 25 $вт$) на расстоянии до 3 $м$.

Некоторые дополнительные технические данные «черепахи»
«Тортилла-1»

$PП$ — поляризованное реле типа $PП$;

$СМ$ — двигатели на 24 или 27 $в$;

$ШИ$ — шаговый искатель;

$Тр$ — трансформатор, имеющий:

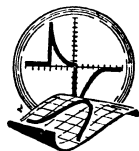
$W_1 = 2 \times 60$ вит; $d_1 = 0,6$ $мм$;

$W_2 = W_3 = 3000$ вит; $d_{23} = 0,12$ $мм$;

V_1V_2 — выпрямители, собранные на ДГ-Ц24;

B — аккумулятор типа 5 НКН-10;

Напряжение тахогенератора 6 $в$.



Глава V

КИБЕРНЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С САМОИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ ПАРАМЕТРАМИ

ЗАДАЧА САМОИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ

Системы с самоизменяющимися параметрами являются системами автоматического регулирования, у которых варьируемые параметры, определяющие частотные характеристики и динамические свойства системы, изменяются в зависимости от внешних воздействий или показателей внутреннего состояния системы.

Под изменением внутреннего состояния системы понимается изменение характеристик ее составных частей, например, электронных ламп, сопротивлений, источников питания и т. п.

Если в процессе исследования системы используются частотные методы, то вместо термина «самоизменение параметров» лучше применять термин «самоизменение частотных характеристик», а если используются методы дифференциальных уравнений, то лучше использовать термин «самоизменение динамических характеристик», хотя по сути речь идет об одном и том же.

Задача системы с самоизменением параметров состоит в том, чтобы непрерывно, периодически или время от времени поддерживать на наилучшем экстремальном или заданном уровне некоторую регулируемую величину, т. е. показатель качества варьируемых параметров.

¹ Некоторые авторы, например, проф. В. В. Солодовников [53], называют эти системы самонастраивающимися, имея в виду настройку изменением варьируемых параметров (а не изменением уставки).

Рассмотрим системы, у которых можно принять только один такой показатель качества φ .

Возмущающими воздействиями $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$, нарушающими оптимальное значение φ , являются:

а) независимые от нас изменения значений параметров и характеристик оборудования, входящего в систему;

б) изменение спектральных характеристик возмущений;

в) изменение спектральных характеристик возмущений и помех, одновременно действующих на систему. Последний случай мы рассмотрим в девятой главе, а здесь ограничимся первыми двумя.

Регулирующими воздействиями $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ являются переменные (варьируемые) параметры системы, значения которых изменяются так, чтобы возможно лучше решить данную кибернетическую задачу регулирования.

В обычных системах регулирования значения варьируемых параметров выбираются человеком один раз при пуске системы в ход. В системах с самоизменением эти параметры автоматически изменяются во время работы системы в зависимости от изменения внутренних и внешних возмущений.

Заметим, что среди рассмотренных выше кибернетических систем мы уже встречали системы с переменными параметрами, используемыми в качестве регулирующих воздействий. Такими системами, например, являются системы с самоизменением установки в случае, когда последняя изменяется путем изменения параметров нелинейных измерительных мостов (см. гл. III).

ПРИМЕРЫ СИСТЕМ С САМОИЗМЕНЕНИЕМ ПАРАМЕТРОВ

В качестве первого примера рассмотрим систему стабилизации курса корабля. В данной системе изменение варьируемых параметров необходимо для компенсации влияния изменения других параметров, не контролируемых нами.

Уравнения динамики элементов системы (при пропорциональной скорости сервомотора) имеют вид:

$$\Sigma = -m(p)\varphi,$$

$$p\mu_1 = \alpha_1 \Sigma,$$

$$(Ip + F)p\rho = \alpha_2\mu_1 - \beta_2\lambda,$$

где Σ — сумма напряжений на входе поворотного соленоида;

μ_1 — угол поворота руля;
 φ — отклонение корабля от курса;
 $\beta_2 \lambda$ — момент возмущающих сил;
 I — момент инерции корабля;

F — коэффициент вязкого трения корпуса корабля.

Используем результаты исследования линейного варианта уравнений (при $m(p) = m_0 + m_1 p + m_2 p^2$), полученные нами ранее [16].

Условие устойчивости

$$(F + \alpha_1 \alpha_2 m_2) m_1 \geq I m_0.$$

Это условие показывает, что без регулирования по первой производной от угла $m_1 p \varphi$ система структурно не устойчива, т. е. в ней нельзя достичь устойчивости ни при каком выборе значений параметров.

Если бы мы рассматривали корабль при ничтожно малом сопротивлении воды, когда $F = 0$, то можно было бы сделать дополнительный вывод о необходимости регулирования еще и по второй производной от угла $m_2 p^2 \varphi$.

Данная система является системой, описываемой уравнениями с переменными во времени коэффициентами, так как $F = F(t)$ и $I = I(t)$. Такие системы описаны в книге Цянь Сюэ-Сень [66], а также в работах [26], [27], [54], [57], [12], [56]. В указанных источниках можно найти и другие примеры объектов с переменными параметрами и, следовательно, в системах регулирования этих объектов также можно применить принцип самоизменения варьируемых параметров.

В рассматриваемом нами примере степень устойчивости системы стабилизации корабля изменяется во время его движения, так как в условии устойчивости входит зависящий от плотности окружающей среды и, следовательно, изменяющийся в период движения корабля коэффициент F . Кроме того, из-за расхода горючего непрерывно уменьшается момент инерции I . Для обеспечения постоянной степени устойчивости системы в течение всего времени движения целесообразно производить самоизменение параметров m_1 и m_2 в зависимости от изменения F или I так, чтобы отношение $\frac{I m_0}{(F + \alpha_1 \alpha_2 m_2) m_1}$ все время оставалось неизменным.

Показателем качества φ варьируемых параметров в данном примере является отклонение степени устойчивости системы от заданного значения. Регулирующими воздей-

ствиями μ_1 и μ_2 служат параметры-коэффициенты дифференциаторов первой и второй производной отклонения угла: $\mu_1 = m_1$, $\mu_2 = m_2$. Возмущающим воздействием λ является изменение коэффициента вязкого трения корпуса корабля: $\lambda = F$ или момента инерции $\lambda = I$.

Вторым примером системы с самоизменением параметров может служить следящая система с самоизменением коэффициента усиления в зависимости от показателей спектральной характеристики (спектральной плотности) задания.

Рассмотрим следящую систему с самоизменением коэффициента усиления в разомкнутом состоянии α_p в зависимости от показателей так называемой текущей спектральной плотности сигнала при отсутствии помех.

Корректирующие следящие системы предназначены для отработки знакопеременного задания $\Psi(t)$. Возможен случай, когда $\Psi(t)$ представляет собой стационарную случайную функцию времени, т. е. такую функцию, у которой спектральная характеристика не зависит от начала отсчета времени, а среднее значение (математическое ожидание), как показано в литературе [55], [48], [2] и [89], равно нулю.

Стационарной случайной функцией, например, является прямоугольный закон изменения задания с амплитудой A и средней частотой $f = \frac{1}{T}$ (рис. 42). Среднее значение частоты

$$k = M_f = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt.$$

Спектральная плотность и автокорреляционная функция прямоугольного сигнала равны:¹

$$S_\psi(\omega) = \frac{A^2}{\pi} \cdot \frac{2k}{(2k)^2 + \omega^2}; \quad A_\psi(\tau) = A^2 \cdot e^{-2k\tau}.$$

¹ См. например, А. А. Харкевич, Спектры и анализ, 1957.

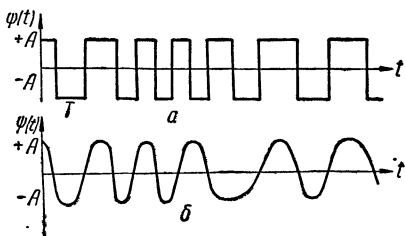


Рис. 42. Стационарные случайные функции времени:

a — прямоугольный закон изменения функции, *b* — гармоническая функция со статистическим разбросом фазы.

Стационарной функцией времени является и гармоническая функция со статистическим разбросом фазы (рис. 42, б).

Будем полагать, что задание системы $\Psi(t)$ представляет собой квази-стационарную функцию времени, т. е. такую функцию, у которой показатели спектральной плот-

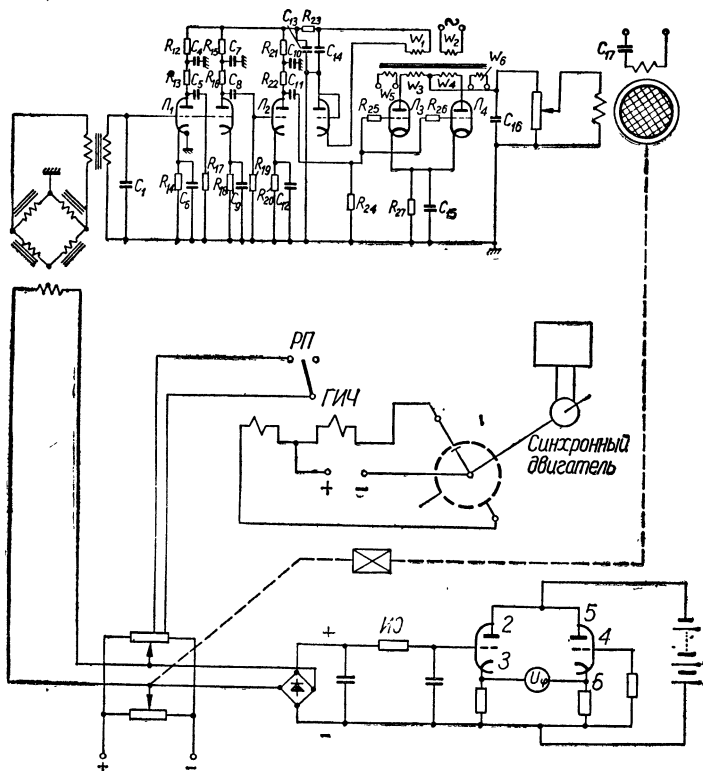


Рис. 43. Схема экспериментального определения оптимальной характеристики компаундирования синхронно-следящей системы: ИО — измеритель ошибки, ГИЧ — генератор инфранизких частот, РП — поляризованное реле.

ности (в данном примере A и k) могут достаточно медленно изменяться во времени. В каждый момент времени сигнал имеет некоторое текущее квази-постоянное значение спектральной плотности и, следовательно, величин A и k .

Эксперименты, проведенные в лаборатории автоматического регулирования Института электротехники АН

УССР, показали, что в большинстве случаев для каждой системы и каждой пары значений A и k удается подобрать коэффициент усиления α_p (точнее говоря, полосу пропускания частот) так, чтобы получить минимальное значение среднеквадратической ошибки ε . Схема опыта показана на рис. 43. Данные системы следующие: собственная частота колебаний системы $\omega_0 = 3,5$ гц. Зона линейности не менее ± 6 делений, скорость прохождения всей шкалы (180 делений) — 2 сек.

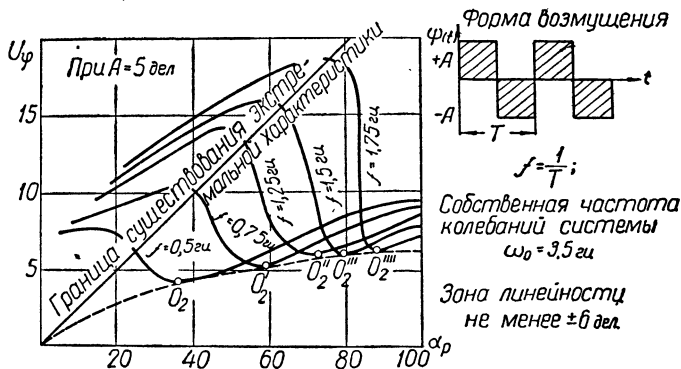


Рис. 44. Зависимость ошибки следящей системы от коэффициента усиления α_p при различных частотах прямоугольного возмущения.

Опытным путем была найдена оптимальная характеристика компаундирования (обеспечивающая астатическую характеристику $O_2 O_2' O_2''$)

$$\alpha_p = f(A, k) \text{ при } \varepsilon = \varepsilon_{\min}.$$

Эта характеристика показывает, как в данном примере следует изменять коэффициент усиления системы, чтобы получить минимум ошибки для каждого значения A и k (рис. 44 и 45).

Простота экспериментального доказательства существования экстремума и, главное, определения границ его существования, удобство определения оптимальной характеристики компаундирования несколько снижают ценность кропотливых, точных аналитических работ в этом направлении. Следует стремиться к разработке простых приближенных методов, таких как метод Ж. Дютиля [2], с дальнейшим их уточнением экспериментальным путем.

Следует отметить, что в данной задаче многие аналитические методы статистической теории дают неправильный вывод об отсутствии экстремума. Создается впечатление, что при отсутствии заметных помех следует стремиться к бесконечно большой полосе пропускания частот линейной системы, т. е. к бесконечно большому коэффициенту усиления, что противоречит опыту.

Это противоречие объясняется тем, что в реальных системах даже небольшие нелинейные отклонения характеристик влияют на работу так, как и внешние помехи. Статистические же методы до последнего времени разрабатывались для линейных систем. Они также, по-видимому, не учитывают влияния разрывов непрерывности первого рода и импульсных функций во входном сигнале. На примере прямоугольных импульсов, имеющих такие разрывы непрерывности, можно легко показать, что

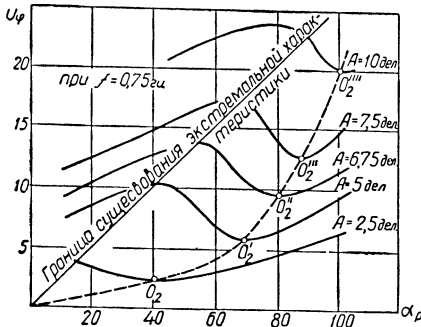


Рис. 45. Зависимость ошибки следящей системы от амплитуды прямоугольного возмущения A и коэффициента усиления системы α_p .

мгновенная ошибка системы состоит из вынужденной и свободной составляющей.

Разделение ошибки на вынужденную и свободную составляющую всегда является в некоторой степени условным. Выясним более точно, что мы понимаем под этими терминами. Например, для прямоугольного входного сигнала при симметричности характеристики усиления системы вынужденная составляющая выходного сигнала может быть определена так. Разложим выходную величину системы в гармонический ряд

$$\Phi(t) = A_1 \sin(\omega_1 t + \beta_1) + A_3 \sin(3\omega_1 t + \beta_3) + \dots$$

Вынужденная составляющая $\Phi_{\text{вын}}(t)$ выходного сигнала будет иметь вид

$$\Phi_{\text{вын}}(t) = A \operatorname{sign}[\sin(\omega_1 t + \beta_1)],$$

где A равно амплитуде выходного прямоугольного сигнала,

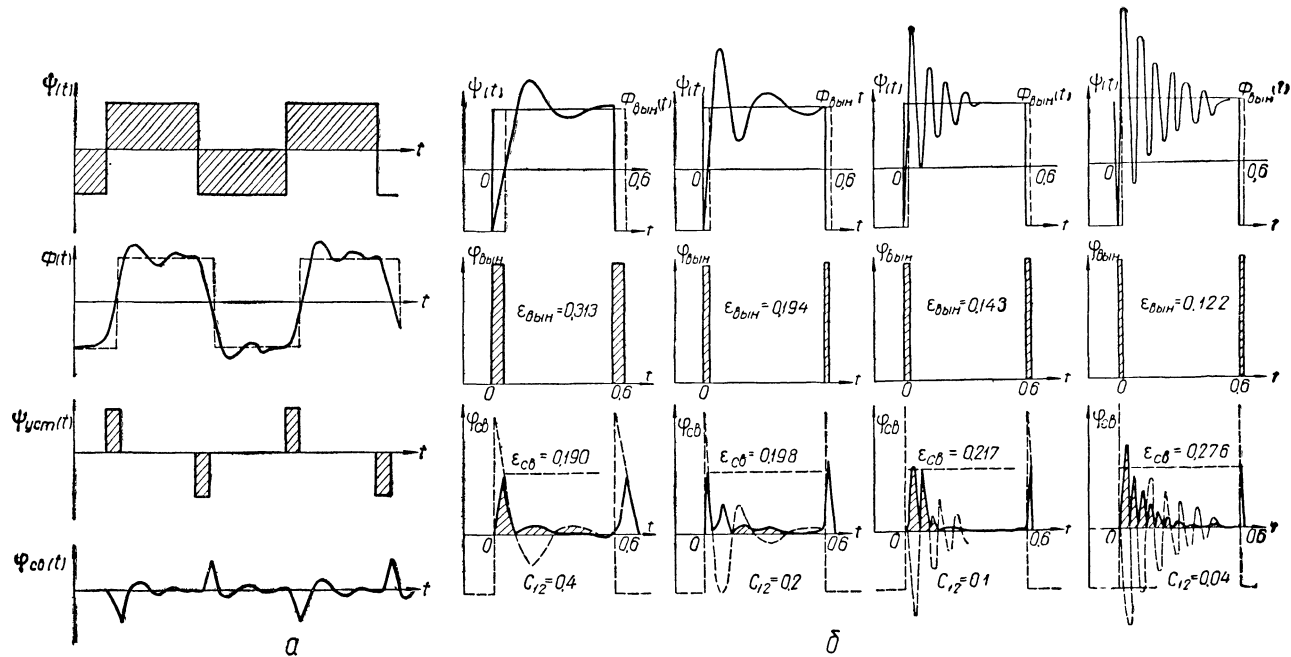


Рис. 46. Анализ ошибки следящей системы:

a — задание $\Psi(t)$, отработка $\Phi(t)$ и две составляющие динамической ошибки $\Psi_{уст}$ и $\Psi_{св}$; *б* — уменьшение вынужденной и возрастание свободной составляющей ошибки при увеличении коэффициента усиления.

умноженного на коэффициент усиления замкнутой системы (обычно равный единице).

Вынужденная составляющая выходной величины $\Phi_{\text{вын}}$ определяется как составляющая, совпадающая по форме со входным сигналом, а по фазе с выходной величиной (рис. 46, в), точнее с ее первой гармоникой.

Вынужденная составляющая ошибки $\varphi_{\text{вын}}$ равна разности входного сигнала и вынужденной составляющей выходной величины

$$\varphi_{\text{вын}} = \Psi - \Phi_{\text{вын}}.$$

Остальная часть ошибки системы является свободной составляющей $\varphi_{\text{св}}$, возникающей в переходных режимах,

$$\varphi_{\text{св}} = \varphi - \varphi_{\text{вын}} \text{ или } \varphi = \Psi - \Phi = \varphi_{\text{вын}} + \varphi_{\text{св}}.$$

Свободная составляющая ошибки особенно заметна при наличии во входном знакопеременном сигнале импульсных составляющих и разрывов непрерывности в слабодемпфированных системах.

Определив мгновенные значения составляющих ошибки, можно найти и среднеквадратичные значения этих составляющих:

$$\varepsilon_{\text{св}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \varphi_{\text{св}}^2 dt}, \quad \varepsilon_{\text{вын}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \varphi_{\text{вын}}^2 dt}.$$

Пример. Рассмотрим действие на линейную систему второго порядка прямоугольного периодического сигнала

$$\Psi(t) = A \operatorname{sign} [\sin \omega t].$$

Напишем уравнение динамики систем (в безразмерном виде при $T = \omega_0 t$)

$$(D^2 + 2c_{12}D + 1)\Phi = \Psi(t).$$

Рассмотрим сначала решение вспомогательного уравнения

$$(D^2 + 2c_{12}D + 1)\Phi_1 = 2A [1].$$

Это решение, как указано в литературе [3], имеет вид

$$\Phi_1 = 2A \left[1 - e^{-c_{12}T} \cdot \frac{c_{12}}{\sqrt{1 - c_{12}^2}} \cdot \sin \sqrt{1 - c_{12}^2} \cdot T \right].$$

Если период собственных колебаний системы меньше, чем период прямоугольного сигнала $\left(\frac{2\pi}{\omega} > \frac{2\pi}{\omega_0 \sqrt{1 - c_{12}^2}} \right)$, то при $c_{12} > 0$ началь-

ные условия в конце каждого полупериода сигнала можно считать нулевыми. Выходное воздействие $\Phi(t)$ можно представить как ряд сопряженных кривых $\pm \Phi_1(t)$, сдвинутых на полпериода входного сигнала и смещенных на величину A (рис. 46, а и б).

Время пересечения оси времени T_1 определяется из уравнения

$$A = 2A \left[1 - e^{-c_{12} T_1} \cdot \frac{c_{12}}{\sqrt{1 - c_{12}^2}} \cdot \sin \sqrt{1 - c_{12}^2} \cdot T_1 \right] \text{ при } c_{12} \rightarrow 0;$$

$$T_1 = \frac{1}{4} \cdot \frac{2\pi}{\sqrt{1 - c_{12}^2}} \quad \text{или} \quad t_1 = \frac{T_1}{\omega_0} = \frac{1}{4} \cdot \frac{2\pi}{\omega_0 \sqrt{1 - c_{12}^2}}.$$

Фаза сдвига выходной величины относительно входного сигнала приближенно равна $\theta = \omega t_1$.

Зная фазу, легко построить вынужденную составляющую выходной величины в виде знакопеременных прямоугольных импульсов с амплитудой A и фазой θ .

Разность входного сигнала и вынужденной составляющей выходной величины дает вынужденную составляющую ошибки.

Свободная составляющая равна остальной части ошибки $\varphi_{\text{св}} = \varphi - \varphi_{\text{вын}}$. Ее легче определить графически, чем аналитически, что видно даже на простом примере, показанном на рис. 46,б. Проведя построения для ряда значений коэффициента затухания c_{12} , легко обнаружить влияние этой величины, а также и коэффициента усиления разомкнутой системы α_p , обратно пропорциональной коэффициенту c_{12} , на величину вынужденной и свободной составляющей ошибки:

$$\varphi_{\text{вын}} = +A \text{ при } 0 < t < t_1;$$

$$\varphi_{\text{вын}} = 0 \text{ при } t_1 < t < 2\pi;$$

$$\varphi_{\text{вын}} = -A \text{ при } 2\pi < t < t_1 \text{ и т. д.}$$

В системах, описываемых уравнением динамики второго порядка, экстремум находится вблизи границы устойчивости. Только при нелинейности он сдвигается в область процессов со значительным затуханием. В системах третьего и более высоких порядков имеются несколько экстремумов, отвечающих настройкам со значительным затуханием.

Напомним, что все построения нужно производить при естественном масштабе времени.

Как уже указывалось, аналитический статистический метод учитывает только вынужденную составляющую ошибки и не учитывает свободной ее составляющей, генерируемой в самой следящей системе, что является одной из причин, приводящих к неточным выводам. В действительности с увеличением коэффициента усиления разомкнутой системы α_p вынужденная составляющая среднеквадратичной ошибки $\epsilon_{\text{вын}}$ падает, что согласуется с теорией, а свободная составляющая $\epsilon_{\text{св}}$ увеличивается, что теорией не учитывается. Такая связь между $\epsilon_{\text{вын}}$, $\epsilon_{\text{св}}$ и α_p обуславливает появление экстремальной характеристики для полной среднеквадратичной ошибки $\epsilon = f(\alpha_p)$.

Для существования экстремальной характеристики достаточно выполнения одного из следующих трех условий:

1) наличие помех (шумов); 2) наличие нелинейности системы или 3) наличие разрывов непрерывности либо импульсных функций во входном сигнале. Если же на вход системы при отсутствии помех будет подан гармонический сигнал весьма малой амплитуды, при которой система остается в пределах линейности, то характеристика $\varepsilon = f(\alpha_p)$ действительно не будет иметь экстремума, так как здесь свободная составляющая ошибки равна нулю.

Экспериментально легко выясняются *границы области экстремального регулирования ошибки* на минимум, например в таком виде (см. рис. 45):

$$\begin{aligned} \alpha_{\max} &> \alpha_p > 0,25U_\varphi; \\ f_{\max} &> f > f_{\min}; \\ A_{\max} &> A > A_{\min}, \end{aligned}$$

где U_φ — напряжение, пропорциональное абсолютной величине средней ошибки.

При выходе из этой зоны кибернетический регулятор поиска минимума ошибки должен автоматически отключаться с помощью конечных выключателей и ограничительных реле.

В процессе работы при изменении возмущений может потребоваться *самоизменение области самоограничения* системы. Эта весьма интересная задача встречается в ряде технических проблем, но представляет собой особую тему, которой мы здесь не будем касаться.

При наличии знакопеременного входного сигнала последний увлекает систему и не позволяет ей раскачаться даже в том случае, если она при отсутствии сигнала неустойчива и генерирует колебания (корни характеристического уравнения имеют положительные действительные части). Обычно *минимум ошибки достигается при значениях коэффициента усиления разомкнутой системы α_p , в несколько раз превышающих его значение, определяемое из условий устойчивости основной системы.*

Кибернетическая система, действующая по возмущениям, может устойчиво работать при среднем значении коэффициента усиления, который в несколько раз превышает значение, допускаемое для обычных некибернетических систем по условиям устойчивости.

Система сама автоматически возвращается от режима точного слежения при большом коэффициенте усиления к режиму сглаживания помехи при малом значении коэф-

фициента усиления, как только частота и амплитуда входного сигнала уменьшаются. Динамическая ошибка при этом снижается приблизительно в два раза.

Полученные выше выводы действительны в случаях, когда время усреднения достаточно велико и, следовательно, мы можем предположить весьма медленное изменение частоты сигнала.

КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ С САМОИЗМЕНЕНИЕМ ПАРАМЕТРОВ

Как и все другие системы автоматического регулирования, кибернетические системы с самоизменением параметров по принципу управления могут быть разделены на *системы управления по возмущениям, системы управления по регулируемой величине (показателю качества) и комбинированные системы.*

Системы по возмущению представляют собой линейные или нелинейные компаундирующие связи, осуществляющие указанное выше оптимальное соотношение параметров частотного спектра и параметров системы.

Системы по возмущению могут иметь одно или несколько переключений варьируемых параметров. В этих системах оптимальное соотношение выполняется только приближенно.

Возможно создание систем и с плавным изменением варьируемых параметров, более точно осуществляющих оптимальную характеристику компаундирования. Такие системы рассматривались в работах В. В. Солодовникова и А. М. Баткова [53] и [54].

Для построения систем управления по возмущению нужно знать нелинейную функцию оптимальной характеристики компаундирования, которую должны осуществлять компаундирующие связи. Приближенные и экспериментальные методы определения этой функции вполне достаточны по точности. Дальнейшее уточнение зависимостей можно выполнить экспериментально.

Пример системы управления по возмущению можно получить, если дополнить следящую систему (см. рис. 43) элементами, измеряющими амплитуду задания A и частоту задания f . Измерения должны производиться за некоторый отрезок времени (время усреднения) непосредственно перед подачей команды на изменение величины коэффициента усиления разомкнутой системы α_p . Возможно создание экстраполятора, предсказывающего зна-

чение параметров спектра задания на ближайшее время, т. е. вырабатывающего некоторую гипотезу о законах их изменения.

Напряжения датчиков, пропорциональные A и f , поступают на нелинейный преобразователь, который в соответствии с формулой оптимальной характеристики компаундирования (отвечающей точкам $O_2, O_2', O_2'' \dots$) $\alpha_p = f(A, f)$ производит перемещение движка делителя напряжения, регулирующего коэффициент усиления α_p .

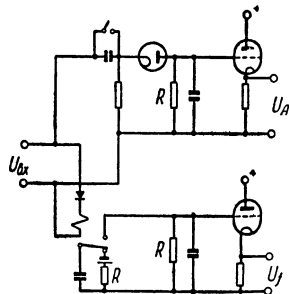


Рис. 47. Схема для измерения амплитуды и частоты знакопеременного сигнала.

Напряжение U_A , пропорциональное амплитуде A , можно приблизительно получить при помощи пик-вольтметра, а напряжение U_f , пропорциональное частоте f , — при помощи реле, считающего число переключений (частотомер) (рис. 47). Может быть также применен конденсаторный частотомер, схема

которого хорошо известна в технике телеизмерений. Разрядные сопротивления R выбираются так, чтобы на вы-

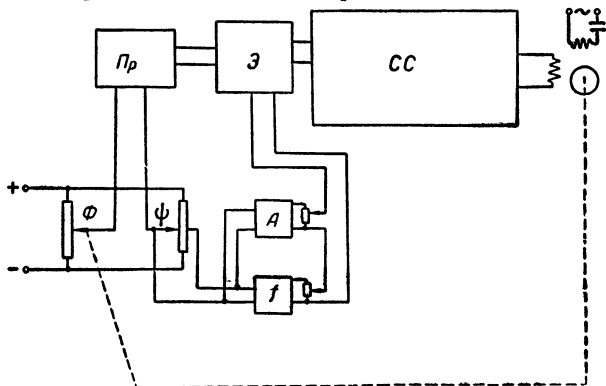


Рис. 48. Система управления по возмущению с самоизменением коэффициента усиления в зависимости от частоты и амплитуды задания.

ходе измерительных схем получить величины, пропорциональные средним значениям A и f за определенное время усреднения $\tau = RC$.

Напряжения, пропорциональные A и f , как указыва-

лось, поступают на вход нелинейного преобразователя, осуществляющего компаундирующую связь по возмущению.

Схемы систем управления по возмущениям показаны на рис. 48 и 49. Целью систем является уменьшение ошибки в условиях медленного изменения показателей спектральной плотности знакопеременного сигнала A и f .

Схема следящей системы $СС$ (объекта) более подробно показана на рис. 43, а измерительные элементы задания A и f могут быть выполнены, например, по схеме рис. 47. Экспандер \mathcal{E} представляет собой устройство для изменения коэффициента усиления системы в соответствии с оптимальной характеристикой компаундирования.

Экспандеры довольно широко применяются в радиотехнике для расширения так называемого динамического диапазона громкости, поэтому их схемы здесь не приводим. Преобразователь Pr служит для преобразования постоянного тока в переменный. Другие варианты решения той же задачи показаны на рис. 49.

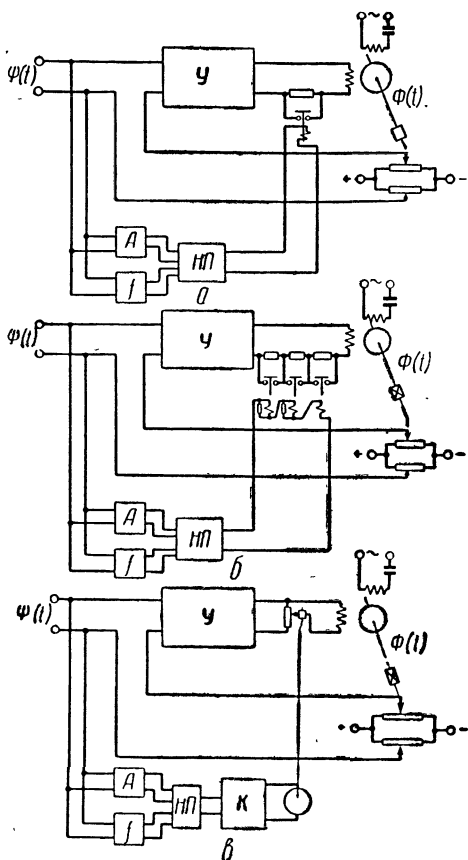


Рис. 49. Схемы компенсаторов, работающих по принципу управления по возмущению, с самоизменением коэффициента усиления:

а — с одним переключением; б — с несколькими; в — с плавным изменением коэффициента усиления; У — усилитель, НП — нелинейный преобразователь, К — компенсатор.

Системы управления по регулируемой величине (т. е. по показателю качества) имеют такие же разновидности, как и рассмотренные выше другие типы кибернетических систем автоматического регулирования:

а) с отбором одного значения варьируемого параметра (или параметров) из нескольких одновременно существующих;

б) с опробованием всех возможных значений варьируемого параметра, последовательно во времени;

в) со статистическим (беспорядочным) опробованием ряда значений параметра до нахождения первого удовлетворительного;

г) с упорядоченным (главным образом экстремальным) отбором. В этих системах могут быть применимы все четыре разновидности схем экстремального регулирования;

д) самоулучшающиеся системы самоизменения параметров.

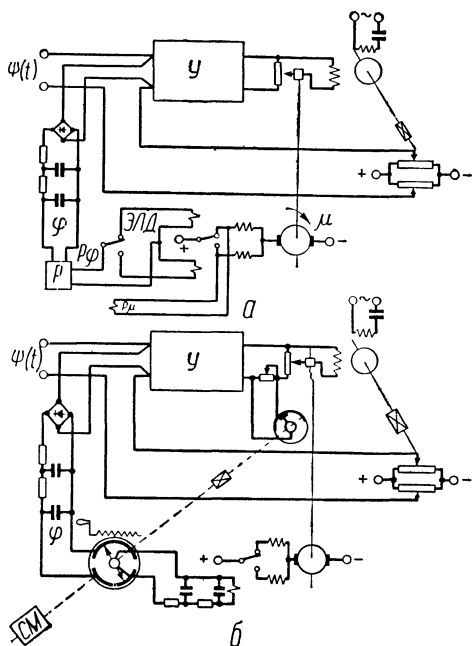


Рис. 50. Схемы компенсаторов, использующих принцип управления по регулируемой величине, с самоизменением коэффициента усиления:

а — автоколебательный экстремальный регулятор; б — экстремальный регулятор с модулирующим воздействием.

Конкретные примеры осуществления схемы экстремального самоизменения коэффициента усиления следящей системы по показателю качества динамической ошибки показаны на рис. 50, а и б. Схема рис. 50, а — автоколебательного типа, а схема рис. 50, б — с модулирующим воздействием.

Пользуясь примерами, рассмотренными выше, легко представить себе конкретные схемы всех перечисленных

здесь систем поиска экстремума (например, минимума ошибки). Для краткости ограничимся рассмотрением только экстремального поиска.

Комбинированные системы с самоизменением параметров

Сочетая схемы рис. 49 и 50, получим комбинированную систему с самоизменением коэффициента усиления. Преимущества комбинированных систем состоят в повышении точности и быстродействия, повышении надежности, уменьшении мощности контура обратной связи с ЭЛД.

Системы регулирования, находящиеся под влиянием нескольких воздействий и помех, как объекты кибернетического самоизменения параметров будут рассмотрены в гл. VIII, но и рассмотренных двух задач достаточно, чтобы убедиться в аналогии принципиальных схем и способов решения задачи самоизменения параметров, программы и уставки.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЛЕДЯЩИХ СИСТЕМ, НАХОДЯЩИХСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СТАТИСТИЧЕСКИХ ЗНАКОПЕРЕМЕННЫХ ВХОДНЫХ СИГНАЛОВ

Если мы обратим внимание на характер движений человека, сидящего за рулем автомашины, то заметим, что повороты руля имеют знакопеременный характер. Особенно это относится к движению по прямолинейной дороге.

Знакопеременный характер входных сигналов имеется во всех так называемых *корректирующих следящих системах*, являющихся дополнительными к основной системе движения. В данном примере такая коррекция движения осуществляется водителем машины.

Рассмотрим пример корректирующей следящей системы без участия в ней человека.

На рис. 51 изображены регуляторы скорости и следящие системы.

В комбинированной системе, представляющей собой соединение разомкнутой и замкнутой систем, замкнутая ее часть является корректирующей, работающей только вследствие несовершенства основной разомкнутой системы. Ошибки основной системы имеют статистический и знакопеременный характер. Поэтому и входные сигналы, посту-

пающие на корректирующую систему, являются знакопеременными.

Практическое значение корректирующих следящих систем, входящих в комбинированную систему, весьма велико.

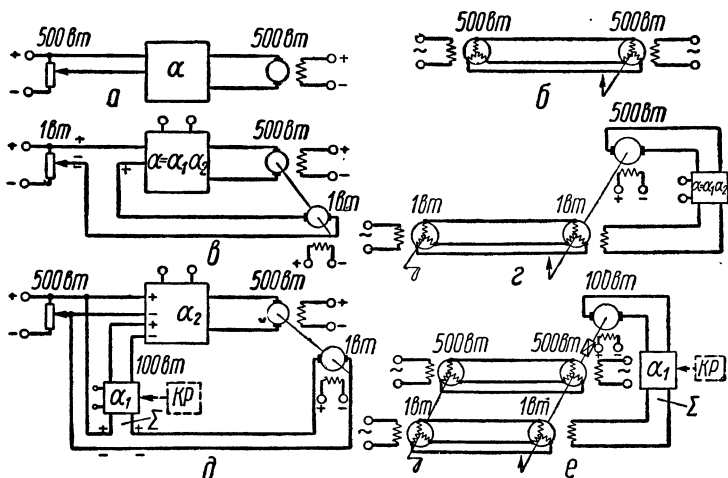
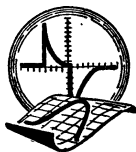


Рис. 51. Регуляторы скорости и следящие системы:

а, б — разомкнутые; *в, г* — замкнутые (с обратной связью); *д, е* — комбинированные; Σ — знакопеременный сигнал ошибки, КР — вторичный кибернетический регулятор; 1, 100, 500 *вт* — порядок мощности элементов.

Следовательно, большое значение имеет и исследование следящих систем, находящихся под действием статистически заданных знакопеременных входных сигналов.

Для некорректирующих следящих систем, работающих без разомкнутого контура, для уменьшения динамической ошибки целесообразно осуществлять самоизменение коэффициента усиления и других параметров по ускорению $p^2\Psi$, как это указано в литературе [90].



Глава VI

КИБЕРНЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С САМОИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ НЕЛИНЕЙНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ИЛИ АЛГОРИТМОМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

ЗАДАЧА САМОИЗМЕНЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ

Системы с самоизменяющимися нелинейными характеристиками (зависимостями) являются системами автоматического регулирования, в которых один либо несколько элементов непрерывно, время от времени или периодически изменяют свою нелинейную характеристику в зависимости от внешних воздействий или от изменений внутреннего состояния системы.

Нелинейные характеристики элементов обычных систем стабилизации, программного и следящего регулирования остаются все время одними и теми же или медленно изменяются в произвольном, часто независимом от воли конструктора направлении. Так, например, в случае использования электронных устройств обычно с течением времени из-за старения ламп падает коэффициент усиления, уменьшается максимальное значение тока.

В зависимости от условий работы в системах с самоизменением нелинейных характеристик происходит активное их изменение. Такое изменение нелинейных характеристик улучшает показатели точности системы в условиях непрерывного изменения внешних и внутренних возмущений.

Необходимость в активном самоизменении нелинейных характеристик может возникнуть по следующим причинам:

а) в результате изменения параметров системы или ее нерегулируемых нелинейных характеристик;

б) вследствие изменения спектра частот основных возмущений;

в) вследствие изменения спектра частот как основных возмущений, так и помех.

Рассмотрим два первых случая.

Как и в предыдущих главах, ограничимся системами, имеющими только одну *регулируемую величину* φ , которую можно также в данном случае назвать *показателем качества нелинейной характеристики*. К этой группе кибернетических задач относится, например, задача самоизменения ширины зоны неподвижности сервомотора в зависимости от сигналов корреляторов для повышения динамической точности. Такая задача была сформулирована впервые проф. А. И. Кухтенко для автоматической врубовой машины.

Отличие систем с самоизменением параметров от систем с самоизменением нелинейностей невелико, как и вообще невелико различие всех кибернетических систем автоматического регулирования. Оно состоит только в выборе регулирующих воздействий. Первые действуют на величину варьируемых параметров системы, а вторые — на форму нелинейных характеристик. Система с самоизменением уставки или параметров может быть линейной, а система с варьируемой нелинейностью — только нелинейной.

Выяснение аналогии (сходства) систем с самоизменением параметров и систем с самоизменением нелинейностей является одной из основных целей данной главы.

ПРИМЕРЫ СИСТЕМ С САМОИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ НЕЛИНЕЙНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

В целом ряде систем автоматического регулирования применяется искусственное введение в систему нелинейных связей. Нелинейные связи для повышения быстродействия и точности могут быть применены как в замкнутом контуре системы, так и в разомкнутых цепях компаундирующих связей по возмущениям.

Применение нелинейных связей по возмущениям нами было рассмотрено выше. В ряде случаев задача экстремального регулирования может быть решена простым применением специально выбранной связи по возмущению, осуществляющей оптимальную характеристику компаундирования

$$\mu = f(\lambda).$$

Ясно, что выбор функции $f(\lambda)$ практически не может быть выполнен абсолютно точно с учетом всех обстоятельств, но возможно создание систем, непрерывно или периодически производящих поиск наилучшей в данных условиях функциональной нелинейной зависимости $f(\lambda)$. Так мы приходим к идее системы с самоизменением нелинейной компаундирующей связи.

Типичным примером рассматриваемых систем является система с нелинейным преобразователем, изменяющим свою

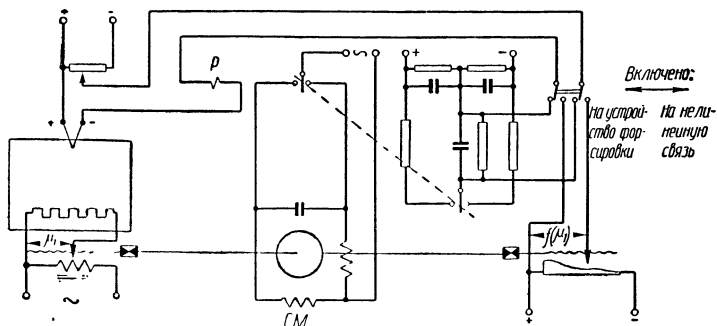


Рис. 52. Система регулирования температуры печи с нелинейной обратной связью или устройством форсировки.

нелинейную характеристику при изменении характера возмущений во времени.

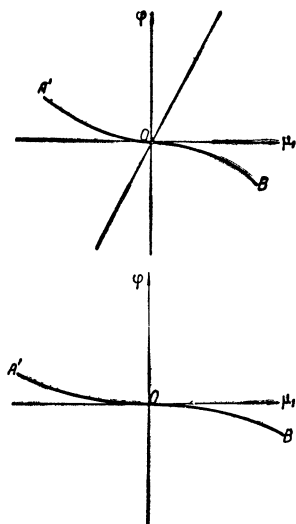
Такие преобразователи могут быть включены как в цепь прямого усиления сигналов управления, так и в цепи обратных связей. В цепи прямого усиления используются нелинейные преобразователи с «северной» (формы буквы N) характеристикой, а в цепи обратной связи, наоборот, — с «южной» (формы буквы S) характеристикой.

В качестве первого примера системы с нелинейной обратной связью рассмотрим систему регулирования температуры электропечи (рис. 52). Как известно, постоянная времени электропечей (как печей сопротивления, так и особенно дугowych электропечей) только весьма условно может быть названа постоянной. В действительности она изменяется в *несколько десятков раз* в зависимости от условий работы печи. На ее величину сильно влияют загрузка печи металлом, температура и состояние его, условия охлаждения и другие величины. Поэтому возникают задачи изменения свойств регулятора в определенной связи

с изменением, например, загрузки печи, температуры и других возмущений.

Сначала произведем *синтез нелинейной характеристики обратной связи*, пользуясь методом, изложенным в работе [22], полагая постоянной времени печи действительно постоянной.

Составим уравнения динамики элементов системы¹:



$$\Sigma = -\varphi - f(\mu_1);$$

$$(\tau_2 p + 1)\varphi = \alpha_2 \mu_1 - \beta \lambda;$$

$$p\mu_1 = \begin{cases} +\alpha_1 \dots & \text{при } \Sigma > 0 \\ 0 \dots & \text{» } \Sigma = 0 \\ -\alpha_1 \dots & \text{» } \Sigma < 0, \end{cases}$$

где φ — отклонение температуры печи;

μ_1 — напряжение питания нагревательного элемента;

τ_2 — постоянная времени печи;

λ — тепловая нагрузка печи;

α_1 и α_2 — коэффициенты, согласующие размерности членов уравнения.

Рис. 53. Зона отключения $A'O'B$ сервомотора следящей системы.

Требуется определить нелинейность усилителя напряжения в цепи жесткой обратной связи $f(\mu_1)$, обеспечивающую аperiodичность свободных движений системы. При появлении отклонений система должна возвращаться к требуемой статической характеристике при помощи *одного включения сервомотора*.

Синтез состоит из следующих операций:

1. Интегрируя уравнения, находим уравнения интегральных кривых на фазовой плоскости $\varphi - \mu_1$ (рис. 53)

$$\varphi = [-\alpha_2 (\mu_{11} \pm \alpha_1 \tau_2) + \varphi_{21}] e^{-\frac{\mu_1 - \mu_{11}}{\alpha_1 \tau_2}} + \alpha_2 \mu_1 \pm \alpha_1 \alpha_2 \tau_2,$$

¹ Все примеры в данной главе взяты из работ автора, опубликованных в 1948 г. в «Сборнике трудов Института электротехники АН УССР», вып. 1, 2 и 3, а также в книге «Электроавтоматика», издание 1-е, Гостехиздат УССР, 1954.

где μ_{11} и φ_{21} — начальные отклонения координат μ_1 и φ , верхние знаки — для левой полуплоскости, а нижние — для правой.

2. Состояние равновесия системы определяется пересечением статических характеристик объекта $\varphi = \alpha_2 \mu_1$ и регулятора $\Sigma = 0$ [или $\varphi = -f(\mu_1)$], т. е. находится в начале координат.

Условие аperiodичности свободного движения системы из точки $\mu_1 = \mu_{11}$, $\varphi = \varphi_{21}$ к началу координат получим, полагая, что $\mu_1 = 0$ и $\varphi = 0$,

$$[-\alpha_2(\mu_{11} \pm \alpha_1 \tau_2) + \varphi_{21}] e^{\pm \frac{\mu_{11}}{\alpha_1 \tau_2}} \pm \alpha_1 \alpha_2 \tau_2 = 0.$$

3. Отыскиваем геометрическое место точек фазовой плоскости $A'O B$, из которых система приходит к состоянию равновесия аperiodичности. Для этого заменяем $\mu_{11} = \mu_1$.

Если мы выберем:

$$\Sigma = -\varphi + \alpha_2 \mu_1 - \alpha_1 \alpha_2 \tau_2 \left(1 - e^{-\frac{\mu_1}{\alpha_1 \tau_2}}\right) \text{ при } \mu_1 > 0;$$

$$\Sigma = -\varphi + \alpha_2 \mu_1 + \alpha_1 \alpha_2 \tau_2 \left(1 - e^{+\frac{\mu_1}{\alpha_1 \tau_2}}\right) \text{ при } \mu_1 = 0,$$

то зона выключения сервомотора (кривая $A'O B$, рис. 53) будет состоять исключительно из точек, из которых система приходит к равновесию аperiodично, однократным включением сервомотора. Следовательно, искомый нелинейный закон обратной связи

$$f(\mu_1) = \alpha_2 \left[\mu_1 \mp \alpha_1 \tau_2 \left(1 - e^{\mp \frac{\mu_1}{\alpha_1 \tau_2}}\right) \right].$$

Задача синтеза нелинейной обратной связи решена. Для обеспечения аperiodичности переходного процесса в зависимости от величины постоянной времени τ_2 требуются нелинейные характеристики обратной связи различного вида.

При больших постоянных времени ($\tau_2 \rightarrow \infty$), как было показано нами в работе [22], требуется квадратичная обратная связь

$$f(\mu_1) = \pm \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \frac{\mu_1^2}{2}.$$

Действительно, разложив функцию $e^{\frac{\mu_1 t}{\alpha_1 \tau_2}}$ в ряд, находим

$$\Sigma = -\varphi + \alpha_2 \mu_1 \mp \alpha_1 \alpha_2 \tau_2 \left(\mp \frac{\mu_1}{\alpha_1 \tau_2} \pm \frac{\mu_1^2}{2\alpha_1^2 \tau_2^2} \mp \dots \right).$$

Отсюда получим

$$\Sigma = -\varphi \mp \frac{\alpha_2 \mu_1^2}{\alpha_1 2\tau_2}.$$

При средних значениях постоянной времени $0 < \tau_2 < \infty$ требуется указанная выше экспоненциальная обратная связь. Характер нелинейности при этом может быть совершенно различным (рис. 53).

Так как с начала движения $\mu_1 = \alpha_1 t$, то вместо нелинейной жесткой обратной связи в рассматриваемой системе, как показано в нашей работе [22], можно применить устройство форсировки, включающееся одновременно с сервомотором и подающее на вход регулятора такие функции времени:

а) при $0 < \tau_2 < \infty$ $\Sigma_3(t) = \alpha_2 \left[\alpha_1 t \pm \alpha_1 \tau_2 \left(1 - e^{\pm \frac{t}{\tau_2}} \right) \right],$

б) при $\tau_2 \rightarrow \infty$ $\Sigma_3(t) = \frac{\alpha_1 \alpha_2 \tau_2}{2}.$

Закон регулирования в этом случае имеет вид $\Sigma = -\varphi + \Sigma_3(t).$

Аналогичные результаты может дать и регулирование по производной $p\varphi$ [22].

Мы рассмотрели нелинейную систему с постоянной скоростью сервомотора. Весьма сходные результаты получаются и для систем с непрерывными характеристиками, у которых вместо уравнения сервомотора

$$p\mu_1 = \begin{cases} +\alpha_1 & \text{при } \Sigma > 0 \\ 0 & \text{» } \Sigma = 0 \\ -\alpha_1 & \text{» } \Sigma < 0 \end{cases}$$

имеется нелинейная характеристика с нечетной функцией, например:

$$p\mu_1 = \alpha_1 \Sigma^3.$$

Системы с такими нечетными характеристиками часто встречаются на практике.

Вторым примером системы с искусственно вводимой нелинейностью может служить синхронно-следящая система, схема которой дана на рис. 54.

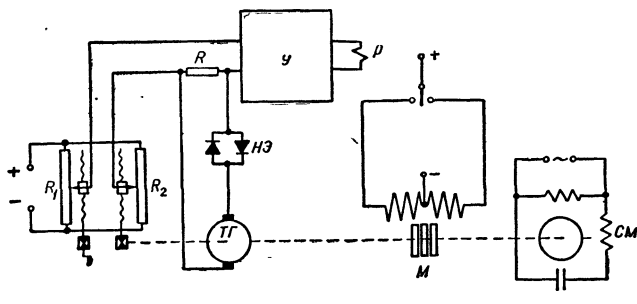


Рис. 54. Схема синхронно-следящей системы с нелинейной обратной связью:

У — усилитель, Р — реле, М — электромагнитная муфта, СМ — сервомотор, НЭ — нелинейный элемент, ТГ — тахогенератор.

Уравнения динамики элементов системы:

$$\Sigma = -\Phi + \Psi + f(\rho\Phi),$$

$$(\tau_2\rho + 1)\rho\dot{\Phi} = \begin{cases} +\alpha_1\alpha_2 & \text{при } \Sigma > 0 \\ 0 & \text{» } \Sigma = 0 \\ -\alpha_1\alpha_2 & \text{» } \Sigma < 0, \end{cases}$$

где Σ — сумма напряжений на входе усилителя;

Ψ — угол поворота командного вала;

Φ — угол поворота следящего вала;

$f(\rho\Phi)$ — напряжение нелинейной обратной связи;

τ_2 — постоянная времени следящего вала;

$\alpha_p = \alpha_1\alpha_2$ — коэффициент усиления разомкнутой системы.

Сравнение этих уравнений с уравнениями предыдущей системы стабилизации температуры показывает, что в смысле свободных колебаний системы аналогичны, так как описываются одинаковыми уравнениями. Следовательно, и синтез нелинейной характеристики дает тот же результат: для аperiodичности свободных движений требуется, чтобы закон регулирования системы имел вид (вариант схемы с устройством форсировки) при $0 < \tau_2 < \infty$

$$\Sigma = -\Phi + \alpha_1\alpha_2 t + \alpha_1\alpha_2\tau_2(1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}).$$

Остается заменить в этих выражениях время t через производную $p\Phi$. Из уравнения объекта находим

$$p\Phi = \pm \alpha_1 \alpha_2 (1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}),$$

откуда:

$$e^{-\frac{t}{\tau_2}} = \left(1 \mp \frac{p\Phi}{\alpha_1 \alpha_2}\right),$$

$$t = -\tau_2 \ln \left(1 \mp \frac{p\Phi}{\alpha_1 \alpha_2}\right).$$

Полученные выражения дают искомые нелинейные зависимости (вариант схемы с дифференциатором $p\Phi$)

$$\Sigma = -\Phi - \tau_2 \left[\alpha_1 \alpha_2 \ln \left(1 + \frac{p\Phi}{\alpha_1 \alpha_2} \pm p\Phi\right) \right].$$

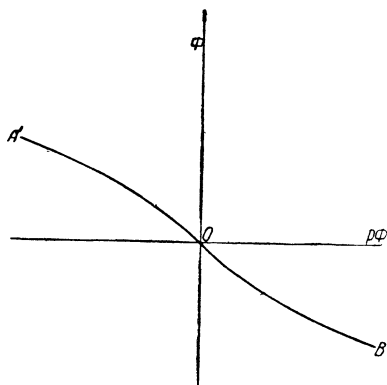


Рис. 55. Зона отключения $A'OB$ на плоскости $\Phi - p\Phi$.

Верхние знаки выражения соответствуют правой полуплоскости $\Phi - p\Phi$, а нижние — левой.

Построение кривых $\Sigma = 0$ (рис. 55) показывает, что зона отключения сервомотора на плоскости $\Phi - p\Phi$ имеет характер кривой с монотонно изменяющимся наклоном, как и кривые $\Sigma = 0$ в предыдущей задаче (кривые формы буквы S).

Экспериментально установлено, что небольшие отклонения нелинейной характеристики от точной, определяемой указанным выше путем, незначительно влияют на характер свободных колебаний системы. Требуемые логарифмические зависимости часто осуществляются при помощи твердых выпрямителей, включенных навстречу друг другу (рис. 56 и 57). Изменением сопротивлений R_1 и R_2 (рис. 56) R и R_n (рис. 57) можно получить как очень крутые (например, квадратные), так и более пологие характеристики с логарифмическим законом (рис. 55).

Можно отметить аналогию следующих двух положений из теории усилителей.

1. Безынерционный усилитель, охваченный звеном отрицательной обратной связи с передаточной функцией $\frac{P(p)}{Q(p)}$, при достаточно большом коэффициенте усиления имеет своей передаточной функцией выражение $\frac{Q(p)}{P(p)}$.

2. Линейный усилитель, охваченный звеном отрицательной обратной связи с нелинейной характеристикой

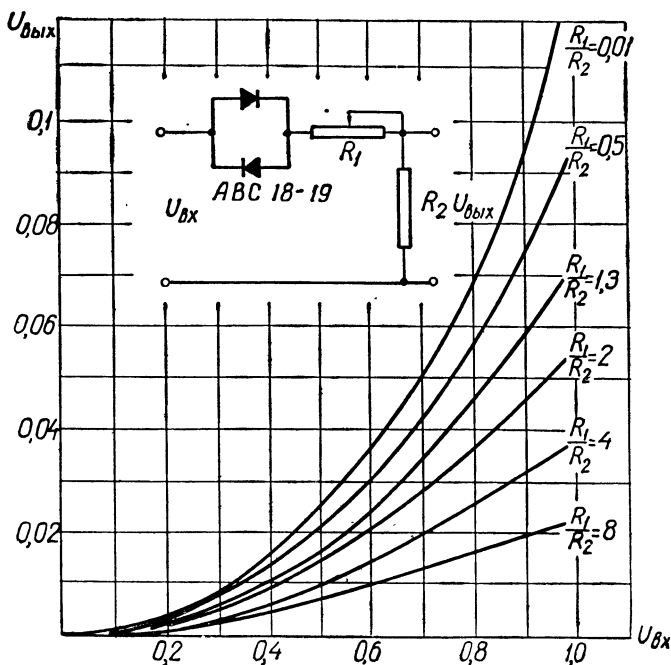


Рис. 56. Нелинейные характеристики выпрямительного преобразователя (типа N).

типа N , при достаточно большом коэффициенте усиления имеет нелинейную характеристику типа S . Наоборот, усилитель, охваченный нелинейной обратной связью типа S , имеет характеристику типа N .

Физическое объяснение отмеченных положений очевидно. Из второго положения следует, что усилитель с обратной связью можно использовать для преобразования одного типа нелинейности в другой. Более подробные све-

дения о выборе и осуществлении нелинейных характеристик можно получить из литературы [42], [43], [2].

Мы уже говорили, что постоянная времени электропечи (см. рис. 52) изменяется в зависимости от разных причин (возмущений) в несколько раз. То же может быть и в рассмотренной следящей системе, где постоянная времени

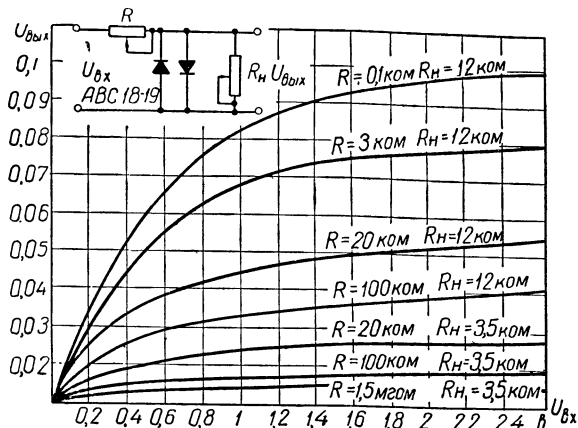


Рис. 57. Нелинейные характеристики выпрямительного преобразователя (типа S).

определяется как отношение момента инерции двигателя к коэффициенту трения F

$$\tau_2 = \frac{I}{F}.$$

Вязкое трение сильно зависит от температуры, продолжительности работы системы, состояния смазки и т. п. Такая зависимость F от внешних факторов приводит к изменению постоянной времени.

При изменении постоянной времени в большом диапазоне целесообразно в следящей системе осуществить самоизменение нелинейной зависимости обратной связи (жесткой или гибкой или устройства форсировки), чтобы сохранить качество процессов почти неизменным.

Если требуемую для каждого значения τ_2 нелинейную зависимость (в пределах одной полуплоскости) аппроксимировать при помощи параболы

$$f(\mu) = n\mu^m,$$

то задачу, подлежащую решению, можно сформулировать так. Система при помощи проб должна сравнивать ряд конкретных значений степени m

$$\text{от } m = 0 \text{ до } m = \infty$$

для того, чтобы отобрать то ее значение, при котором свободные колебания системы апериодичны, а длительность процесса, вызванного единичным отклонением, минимальна.

Длительность переходного процесса можно назвать регулируемой величиной, или *показателем качества нелинейной характеристики* $\varphi = \Delta t \rightarrow \Delta t_{\text{мин}}$.

Показатель степени m выполняет роль *регулирующего воздействия*.

Таким образом, не находя математического выражения оптимальной характеристики компаундирования $m = f(\tau_2)$, мы только ограничились доказательством того, что такая характеристика существует.

Необходимость в самоизменении нелинейных зависимостей возникает не только при наличии в системе элементов с переменными параметрами (например, с переменной постоянной времени τ_2). Применение нелинейных зависимостей может потребоваться и для улучшения свойств систем регулирования при изменении спектра частот основного возмущения, а также при действии помех.

Покажем это, используя рассмотренные выше системы (см. рис. 52 и 54). Допустим, что на эти системы действует изменение нагрузки по экспоненциальному закону

$$\lambda_2 = A_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}} \right),$$

где λ_2 для схемы (рис. 52) — изменение тепловой нагрузки печи, а для схемы (рис. 54) — изменение момента на следящем валу.

Уравнение элементов динамики систем принимает вид:

$$p\mu = \begin{cases} +\alpha_1 & \text{при } \Sigma > 0 \\ 0 & \text{» } \Sigma = 0 \\ -\alpha_1 & \text{» } \Sigma < 0, \end{cases}$$

$$(\tau_2 p + 1) \varphi = \alpha_2 \mu_1 - \beta \lambda.$$

Применяя метод синтеза нелинейности обратной связи из условия апериодичности вынужденных движений, из-

ложенный в работе [22], находим закон регулирования системы

$$\Sigma = -\varphi - \frac{\tau_2}{\tau_2 - T_1} (\alpha_2 \mu_1 - \varphi) \left(e^{-\frac{\mu_1}{\alpha_1 T_1}} - e^{\frac{\mu_1}{\alpha_1 \tau_2}} \right) \pm \\ \pm \tau_2 \alpha_1 \alpha_2 \left(1 - e^{\frac{\mu_1}{\alpha_1 \tau_2}} \right) + \alpha_2 \mu_1.$$

Таким образом, для апериодичности переходного процесса нелинейность обратной связи системы должна быть выбрана с учетом постоянной времени T_1 . Если изменяется T_1 , то нужно изменять и нелинейность обратных связей или устройств форсировки.

Мы рассмотрели только простой случай изменения нагрузки по экспоненциальному закону с постоянной времени T_1 и установили, что при изменении T_1 целесообразно изменять нелинейность обратной связи. Изменение постоянной времени T_1 можно рассматривать как изменение спектра частот возмущения $\lambda_2(\omega)$. Если мы разложим экспоненты $\lambda_2(t)$ с различными значениями T_1 в ряд Фурье, то убедимся, что экспоненты с меньшей постоянной времени дают больше высокочастотных составляющих, чем экспоненты с большой постоянной времени. Увеличение постоянной времени снижает высокочастотную часть спектральной характеристики.

Связь между постоянной времени экспоненциального возмущения и его спектральной характеристикой свидетельствует о наличии зависимости формы оптимальной нелинейной характеристики системы от спектральной характеристики возмущения. Зависимость между требуемой нелинейной характеристикой и спектром возмущения имеет более широкий смысл, чем зависимость этой характеристики от постоянной времени экспоненциального возмущения, являющегося частным случаем возмущающего воздействия. Становится ясной целесообразность изменения формы нелинейной характеристики в зависимости от спектра частот (спектральной плотности) основного возмущения.

В некоторых случаях трудно аналитически определить точную связь между оптимальной формой нелинейной характеристики системы и спектром возмущения (т. е. оптимальную характеристику компаундирования)

$$\mu = f_1[\lambda(\omega)].$$

Однако знание функции f_1 необходимо только для осуществления разомкнутых систем управления, изменяющих нелинейность по заданному закону.

Если же речь идет о системах с замкнутой обратной связью, то знание оптимальной характеристики компандирования (функции f_1) не требуется. Достаточно ограничиться установлением факта ее существования, что мы и сделали выше. Замкнутая система сама отыскивает оптимальную характеристику компандирования.

Для осуществления поиска оптимальной нелинейности достаточно измерить одну величину, принятую как показатель качества φ системы, и влиять затем на регулирующее воздействие, которым должен быть один из показателей нелинейной характеристики.

Таким показателем нелинейной характеристики может быть, например, показатель степени m (изменяемый в пределе от 0 до ∞) при сохранении определенной величины коэффициента усиления n .

Выбор показателя m в качестве регулируемого воздействия не является единственно возможным. Как уже упоминалось, проф. А. И. Кухтенко рассматривалась задача изменения ширины зоны нечувствительности регулятора в функции спектральной плотности возмущения.

Постановка задачи, когда регулирующим воздействием является показатель степени m , такова: имеется следящая система, на вход которой поступает управляющий сигнал $\Psi(t)$, причем функция $\Psi(t)$ может быть как случайной, так и заданной функцией времени. Все элементы следящей системы линейны, за исключением одного нелинейного, имеющего нечетную характеристику

$$U_{\text{вых}} = n(U_{\text{вх}})^m,$$

где $0 < m < \infty$.

Требуется подобрать степень m так, чтобы ошибка системы была минимальной.

Иногда задача усложняется еще тем, что на вход следящей системы подается не только полезный сигнал $\Psi(t)$, но и помеха $N(t)$ с заданной спектральной характеристикой. Если полезный сигнал и помеха имеют нормальное распределение, то оптимальной, с точки зрения минимума среднеквадратичной ошибки, является линейная следящая система. При других распределениях оказы-

вается оптимальной нелинейная система, причем отклонение от линейного усиления зависит от соотношения амплитуд, точнее спектральных характеристик полезного сигнала и шума.

Известен ряд работ по синтезу оптимальной нелинейной характеристики¹.

В последние годы статистические методы применяются и в нелинейных системах. Существуют приближенные методы, позволяющие по заданным спектральным характеристикам входного сигнала определять спектральные характеристики выходного сигнала нелинейного звена (методы В. С. Пугачева [48], Н. Винера [88] и др.). Как указывалось выше, для создания системы с плавным самоизменением нелинейности (от S до M) знание оптимальной нелинейности не требуется. Достаточно знать, что оптимум вообще существует. Поэтому можно разрабатывать конкретные схемы обратной связи указанных систем, не разрабатывая ни один из методов определения оптимальных нелинейных характеристик. Приближенное знание оптимальной нелинейности требуется только при создании приспособляющихся систем, действующих по возмущениям.

В большинстве систем существует минимум ошибки при некотором значении степени m параболической характеристики нелинейного элемента системы и, таким образом, существует экстремальная характеристика $\varphi = f(m)$. Наличие экстремальной характеристики системы проще всего можно обнаружить экспериментальным путем, например так, как это сделано для системы, изображенной на рис. 43.

Следует отметить, что между рассмотренными выше системами с самоизменением параметров и рассматриваемыми системами с самоизменением нелинейных характеристик можно найти много общего.

Изменение нелинейности характеристики усилителя эквивалентно в смысле общего результата, т. е. действия на показатель качества системы, изменению частотной характеристики линейного усилителя. Такую эквивалентность, по-видимому, можно доказать, пользуясь методом гармонического баланса или его разновидностями.

¹ Обзор методов синтеза оптимальных нелинейных систем можно найти в сборнике «Автоматическое управление и вычислительная техника», под ред. В. В. Солодовникова, М., 1958.

КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ С САМОИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ НЕЛИНЕЙНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Так же, как и системы, рассмотренные в предыдущих главах, системы с самоизменяющимися нелинейными характеристиками могут по принципу управления быть разделены на *разомкнутые системы по возмущениям, с обратными связями по регулируемой величине и комбинированные*.

Системы управления по возмущениям могут быть осуществлены как *системы с двумя или несколькими переключаемыми нелинейностями* или в виде *систем с плавным изменением нелинейности*. Плавное изменение нелинейности можно достичь, например, путем плавного изменения сопротивления R_1 , включенного последовательно с нелинейным преобразователем, состоящим из двух выпрямителей (рис. 56).

Коноиды, клинкомбинаторы, лампы типа варимю, релостаты с нелинейной намоткой сопротивлений также относятся к средствам плавного изменения нелинейностей.

Наиболее просто осуществляется изменение нелинейных характеристик в системах управления по возмущению при использовании устройств форсировки вместо обратных связей (см. рис. 52).

Системы управления с обратной связью по аналогии с системами, рассмотренными в предыдущих главах, можно разделить на системы:

1) с отбором одного из нескольких включенных одновременно нелинейных преобразователей;

2) с опробованием всех возможных вариантов нелинейной характеристики (последовательно во времени). В этой схеме требуется применение запоминающих устройств, равных числу сравниваемых характеристик;

3) со статистическим, беспорядочным, отбором нелинейности (последовательно во времени, до первого удовлетворительного результата). Система сама устанавливает случайные связи, подвергающиеся затем проверке, которая показывает, удовлетворяют ли они задаче системы или нет;

4) с упорядоченным (экстремальным) отбором нелинейной характеристики. Здесь можно использовать любую из четырех известных схем экстремального регулирования;

5) самосовершенствующиеся, отыскивающие наиболее точный и быстрый отбор оптимальной нелинейной характеристики.

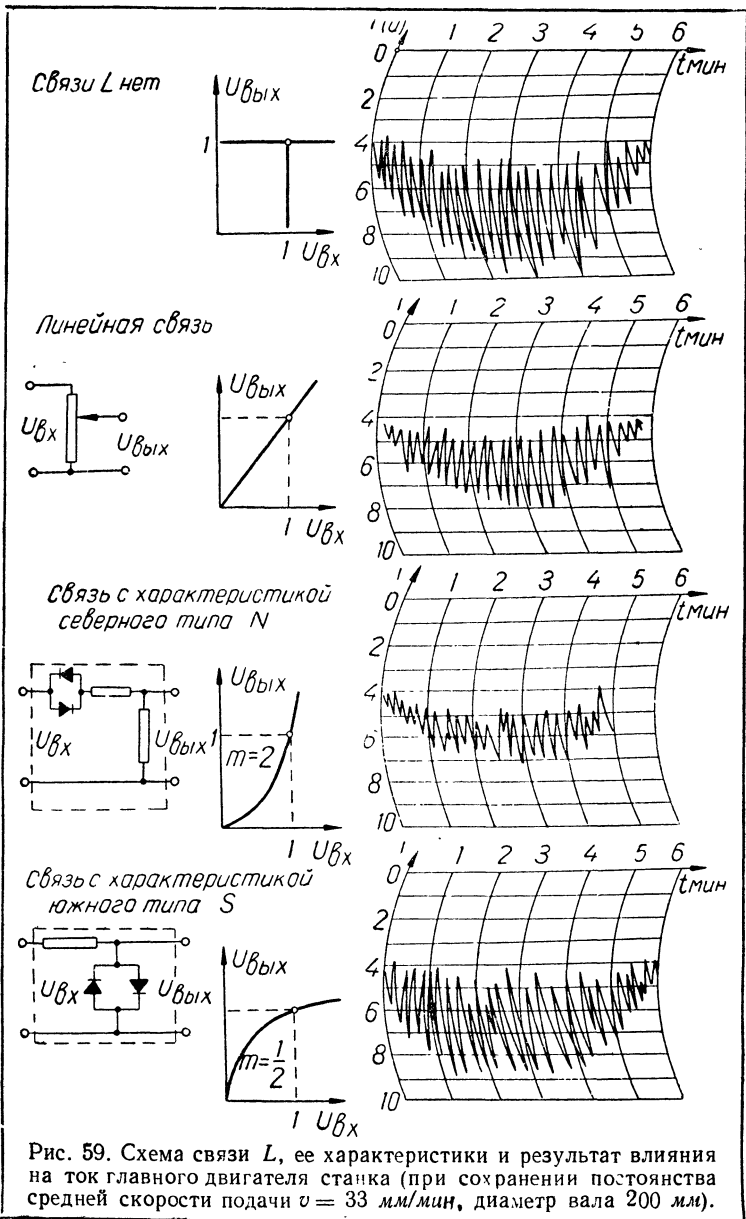


Рис. 59. Схема связи L , ее характеристики и результат влияния на ток главного двигателя станка (при сохранении постоянства средней скорости подачи $v = 33$ мм/мин, диаметр вала 200 мм).

Такое действие схемы достигается при помощи связи L по току главного двигателя, приблизительно выражающей связь по основному возмущению — нагрузке. Как показано на рис. 59, нелинейность характеристики связи влияет на наличие толчков тока в статоре главного двигателя. Нелинейность связи L следует выбирать так, чтобы толчки тока (а следовательно, и усилия резания) были возможно меньшими при сохранении одной и той же средней скорости подачи.

В данной установке зависимость амплитуды переменной составляющей усилия резания φ от показателя сте-

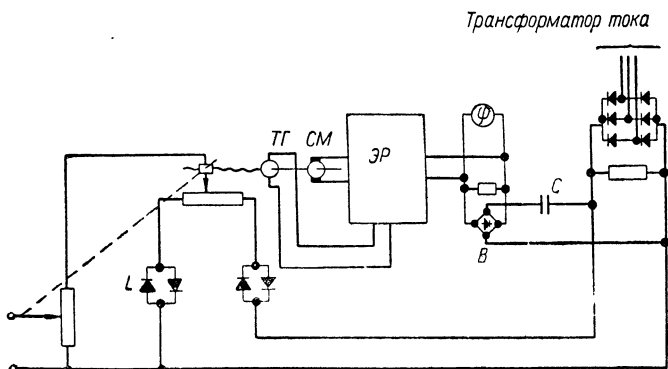


Рис. 60. Схема упорядоченного (экстремального) поиска оптимальной нелинейности связи L .

пени имеет экстремальный характер, причем положение экстремума (точки O_2) на плоскости $\varphi - t$ изменяется при изменении диаметра разрезаемого вала, его формы и материала, состояния зубьев пилы и других возмущений.

Именно вследствие перемещения экстремума и становится целесообразным применение экстремального отбора значения показателя степени t . Отсюда становится понятной идея экстремального регулирования, осуществляемая по схеме (рис. 60). Экстремальный регулятор $\mathcal{E}\mathcal{P}$ выбирает изгиб нелинейной характеристики связи L так, чтобы переменная составляющая усилия резания (показываемая прибором φ) была минимальной. Регулируемой величиной (показателем качества нелинейной характеристики) φ является переменная составляющая усилия резания. Напряжение, пропорциональное φ , получается при по-

мощи конденсатора C и выпрямителя B . Регулирующим воздействием μ служит показатель степени в аналитическом выражении нелинейной характеристики связи L

$$U_{\text{вых}} = n (U_{\text{вх}})^m,$$

где $0 < m < \infty$, а коэффициент n выбирается, исходя из амплитуды напряжения, предельно допустимой для схемы управления тиристором (т. е. исходя из предела регулирования).

Возмущающими воздействиями $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ служит сорт стали разрезаемого вала, его форма, состояние зубьев пилы и другого оборудования, а также много других факторов, влияющих на усилие резания. На рис. 61 представлена разомкнутая схема плавного изменения формы нелинейной характеристики

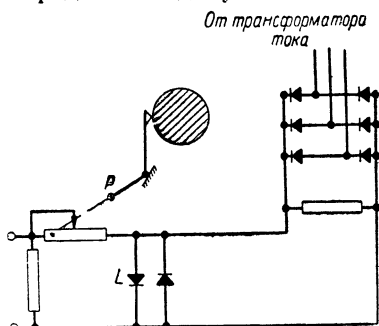


Рис. 61. Схема изменения нелинейности связи L по внешнему возмущению (диаметру изделия).

степени (n) по одному из основных возмущающих воздействий — по размеру разрезаемой детали.

Схема комбинированной системы представляет собой соединение двух схем с различными принципами управления нелинейностью связи L , показанных на рис. 60 и 61, в одной схеме. Суммирование выходных величин производится в виде суммирования перемещений, создаваемых сервомотором $СМ$ экстремального регулятора (рис. 60) и рычага P (рис. 61) компаундирующей связи по размеру разрезаемого вала.

К рассмотренным выше системам с самоизменяющимися нелинейными характеристиками непосредственно примыкают близкие им по принципу следящие системы с самоизменяющимся законом следования и системы с самоизменяющимся алгоритмом преобразования.

СЛЕДЯЩИЕ СИСТЕМЫ С САМОИЗМЕНЯЮЩИМСЯ ЗАКОНОМ СЛЕДОВАНИЯ

В следящих системах регулируемая величина изменяется в определенной зависимости от изменения каких-либо внешних для системы возмущений. Так, например, в

синхронно-следающих системах угол поворота следящего вала по возможности точно повторяет все изменения угла поворота командного вала. В копировальных станках резец повторяет все движения копира, движущегося по модели. В электронном потенциометре (компенсаторе) угол поворота стрелки выходного прибора повторяет изменение входного напряжения.

В этих примерах мы имеем дело с линейным законом следования выходной величины за входной.

Кроме систем с линейным законом следования, существуют следящие системы, имеющие нелинейный закон следования. Примером таких систем могут служить различные нелинейные преобразователи, применяемые в счетно-решающих и моделирующих устройствах и в системах автоматического регулирования. Например, так называемые квадраторы осуществляют такой закон следования:

$$U_{\text{вых}} = aU_{\text{вх}}^2.$$

Существуют логарифмические, гармонические и другие нелинейные преобразователи.

В системах с самоизменяющимся законом следования вид закона следования устанавливает сама система путем отбора ряда вариантов. Здесь так же, как и для других кибернетических систем, возможно применение статистического (беспорядочного), упорядоченного (экстремального) и упорядочно-самоулучшающегося отбора.

Как уже говорилось, системы экстремального регулирования весьма сходны со следящими системами. Поэтому к классу систем с самоизменяющимся законом следования можно отнести системы, которые в зависимости от внешних условий или от внутреннего состояния производят поиск то максимума, то минимума. Такие системы рассмотрены выше при описании моделей «черепахи». Если аккумулятор, питающий «черепашу», заряжен, экстремальный регулятор направляет ее в наиболее темную сторону. Если аккумулятор разряжен, «черепаша» ищет свет. Реле перемены тропизма «черепахи» (т. е. стремления то к темноте, то к свету в зависимости от состояния аккумулятора) представляет собой реле переключения закона следования системы.

Систему телефонной связи можно рассматривать как пример следящей системы, в которой мембрана приемного

телефона должна повторять колебания мембраны микрофона. Фирмой «Филлипс» разработана система самоулучшающейся телефонной связи [52]. Известно, что время соединения абонентов между собой различно и зависит от схемы телефонного коммутатора. Специальные запоминающие устройства подсчитывают число соединений каждого из абонентов с каждым другим и периодически изменяют схему коммутатора так, чтобы абоненты, часто разговаривающие между собой, были подключены поближе друг к другу и среднее время соединения было возможно меньшим.

Аналогичный вероятностный принцип может быть использован в разветвленных следящих системах, имеющих ряд датчиков и ряд приемников.

СИСТЕМЫ С САМОИЗМЕНЯЮЩИМСЯ АЛГОРИТМОМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Нелинейный функциональный преобразователь

$$U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$$

является только одним из видов широкого круга устройств, называемых преобразователями.

В более общем смысле преобразователь может осуществлять не только заданную нелинейную зависимость выходной величины от входной, но и преобразовать входную величину в выходную по определенному правилу (алгоритму).

Примером преобразователей, действующих по определенному алгоритму, могут быть преобразователи одного кода информации в другой код [40], например, десятичных цифр в двоичные и наоборот. Условно действие преобразователя кода A в код B можно записать так: $A \rightarrow \square \rightarrow B$.

Примеры правил преобразования различных цифровых кодов (десятичных, двоичных, числоимпульсных и др.) показаны на рис. 62. Задача преобразователя заключается в том, чтобы, получив на входе воздействие в виде одного кода (например, $A = 7$), выдать на выходе воздействие другого кода (например, $B = 0111$) в соответствии с таблицей, приведенной на рис. 62.

Ясно, что само правило (алгоритм) преобразования может изменяться, если это требуется. Легко представить

себе по аналогии с системами с самоизменяющимися нелинейностями такие же системы с самоизменяющимся алгоритмом преобразования одного кода в другой.

Рассмотрим пример системы с самоизменением алгоритма преобразования. Допустим оператор радиостанции *A* намерен передать определенное сообщение оператору радиостанции *B*, причем язык оператора последней не известен.

Число		Двоичный импульсный код	Двоичный код Грея	Двоичный импульсный код	Число импульсных код	Амплитудный код	Буквенный код	Код Морзе	
десятичное	двоичное							числа	буквы
0	0000	□	□	□	□	□	0	---	..
1	0001	□ Δ	□ Δ	□ Δ	Δ	▨	δ	---	---
2	0010	□ Δ Δ	□ Δ Δ	□ Δ Δ	Δ Δ	▨	в	---	---
3	0011	□ Δ Δ Δ	□ Δ Δ Δ	□ Δ Δ Δ	Δ Δ Δ	▨	г	---	---
4	0100	□ Δ Δ Δ	□ Δ Δ Δ	□ Δ Δ Δ	Δ Δ Δ Δ	▨	д	---	---
5	0101	□ Δ Δ Δ Δ	□ Δ Δ Δ Δ	□ Δ Δ Δ Δ	Δ Δ Δ Δ Δ	▨	е	---	---
6	0110	□ Δ Δ Δ Δ	□ Δ Δ Δ Δ	□ Δ Δ Δ Δ	Δ Δ Δ Δ Δ Δ	▨	ж	---	---
7	0111	□ Δ Δ Δ Δ Δ	□ Δ Δ Δ Δ Δ	□ Δ Δ Δ Δ Δ	Δ Δ Δ Δ Δ Δ Δ	▨	з	---	---
8	1000	□ Δ Δ Δ Δ Δ	□ Δ Δ Δ Δ Δ	□ Δ Δ Δ Δ Δ	Δ Δ Δ Δ Δ Δ Δ Δ	▨	и	---	---
9	1001	□ Δ Δ Δ Δ Δ	□ Δ Δ Δ Δ Δ	□ Δ Δ Δ Δ Δ	Δ Δ Δ Δ Δ Δ Δ Δ Δ	▨	к	---	---

Рис. 62. Различные способы кодирования информации (воздействий).

Конечно, для установления связи оператор станции *A* должен последовательно во времени опробовать ряд языков (статистический отбор алгоритма), начиная с наиболее вероятного. Смена языка сообщения и является сменой алгоритма преобразования смысла сообщения в некоторую определенную последовательность звуков или знаков. Показателем качества алгоритма является наличие ответа станции *B* о том, что ее оператор понимает данный язык. Если приемная станция не одна и та же, то подбор алгоритма (языка) нужно производить очень часто.

В данном случае (как и в примере гомеостата Эшби) показатель качества алгоритма имеет всего два значения «понятно» или «непонятно». Поэтому экстремальные системы поиска в данном примере не применимы, а следует использовать беспорядочный (статистический) отбор, либо отбор самоулучшающийся с учетом вероятности связи.

Мы привели пример неавтоматической системы, однако лёгко себе представить и систему с автоматическим поиском

алгоритма преобразования. Подобные системы еще совсем не разрабатывались, и потому мы почти не располагаем материалом для их иллюстрации.

КОМПЕНСАТОРЫ С САМОИЗМЕНЕНИЕМ НЕЛИНЕЙНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ И С САМОИЗМЕНЕНИЕМ АЛГОРИТМА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Представим себе схему обычного автоматического компенсатора непрерывного действия, предназначенного для измерения напряжения некоторого датчика. Измеряемое напряжение алгебраически суммируется с напряжением оппозиционной обратной связи, а разность напряжений подается на усилитель, на выходе которого включен реверсивный сервомотор, перемещающий ползунок делителя напряжения обратной связи.

При таком законе усиления компенсатор «подает» в цепь вычитания напряжений сначала малые напряжения обратной связи, затем большие и, наконец, еще большие. Короче говоря, в системе используется линейная характеристика обратной связи.

Всегда ли рационально использовать такую пропорциональную линейную компенсацию?

Для ответа на этот вопрос представим себе, что напряжение датчика может принимать только ряд конкретных значений:

$$\Psi', \Psi'', \Psi''', \dots, \Psi^n,$$

каждое из которых имеет определенную вероятность существования:

$$k', k'', k''', \dots, k^n.$$

Если вероятности сильно отличаются, например, k''' значительно больше всех других вероятностей, то целесообразно для ускорения процесса компенсации (в среднем) начинать ее со значения Ψ''' , затем перейти к следующему значению, имеющему вторую по величине вероятность и т. д. Характеристика обратной связи должна быть в этом случае нелинейной, построенной в соответствии с вероятностью появления того или иного значения управляющей величины.

Если $n \rightarrow \infty$, то получим плавную нелинейную характеристику обратной связи. Если $n < \infty$, то получим

дискретную характеристику или определенный алгоритм преобразования.

Если вероятностные характеристики не остаются постоянными, то можно применить принцип самоизменения нелинейной характеристики, или алгоритма, обратной связи.

В случае, когда для осуществления оптимальной (в смысле скорости компенсации) нелинейной характеристики потребуется характеристика с «падающими» участками, то система непрерывной компенсации может оказаться статически неустойчивой. При этом компенсация должна происходить по разомкнутой схеме, при которой воздействие обратной связи сначала записывается на запоминающем устройстве (в первом такте работы), а затем (во втором такте) подаются на цепь вычитания напряжений. В дискретных цифровых системах опасность статической неустойчивости отпадает.

САМОУЛУЧШАЮЩИЕСЯ КОМПЕНСАЦИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В технике известны многочисленные способы преобразования одного кода в другой [40]. Например, для преобразования угла поворота вала (непрерывная величина) в двоичный код электрических импульсов (дискретная величина) часто применяются фотопреобразователи.

Фотопреобразователь представляет собой диск с прорезями, сквозь которые свет электрической лампы попадает на ряд фотоэлементов, и, таким образом, каждому значению угла поворота диска отвечает вполне определенный ряд освещенных фотоэлементов и, следовательно, определенная последовательность электрических импульсов.

Некоторые типы преобразований выполняются просто и имеют высокую эксплуатационную надежность, а другие — более сложно и менее надежны в работе.

Можно указать на возможность создания простых и надежных преобразователей путем применения компенсационных схем с обратной связью, действие которых основано на следующем правиле. *Если имеется простой и надежный преобразователь кода А в код В, то для получения обратного преобразования кода В в код А достаточно включить этот преобразователь в цепь обратной связи компенсационной следящей системы, в которой в качестве элемента сравнения используется схема совпадения.*

Рис. 63 поясняет это правило. В компенсационной схеме сервомотор *СМ* до тех пор вращается, пока элемент совпадения *И* его не выключит. Это означает, что преобразователь закончил поиск требуемого преобразования.

Повышение быстродействия компенсационных преобразователей имеет большое значение. В связи с этим возникает необходимость создания *самоулучшающихся компенсационных преобразователей*.

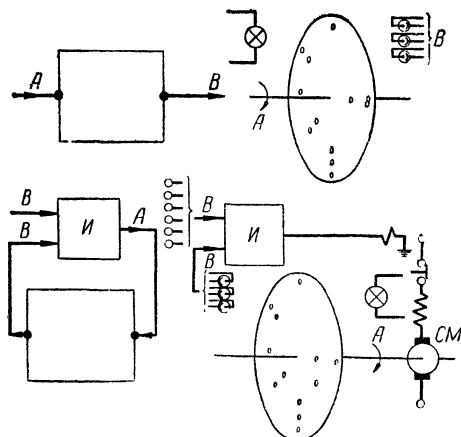


Рис. 63. Превращение преобразователя $A \rightarrow \square \rightarrow B$ в преобразователь $B \rightarrow \square \rightarrow A$.

Идея создания таких преобразователей состоит в том, что для ускорения действия преобразователя порядок подачи импульсов обратной связи периодически изменяется (в примере компенсатора, показанного на рис. 63, производится смена диска с отверстиями).

В первую очередь, на элемент совпадения *И* с выхода обратной связи подаются коды сигналов, наиболее часто встречающиеся в данной системе. Это сокращает время поиска нужного сигнала.

Представим себе компенсационный преобразователь, используемый для преобразования букв в цифры. В русском языке существует определенное распределение вероятности звуков и букв, в английском — другое и т. д. Следовательно, если преобразователь получает на вход русский текст, то с выхода обратной связи целесообразно подавать на элемент *И* сначала буквы, более часто употребляемые, а затем менее употребляемые.

При смене языка (управление по возмущению) целесообразно изменить порядок подачи букв, чтобы снова среднее время действия преобразователя (регулируемая величина) было минимальным.

Для отбора наилучшего расположения букв оптимального алгоритма может быть применено как управление по возмущению (индекс языка), так и по показателю качества (средней скорости работы компенсатора). Последнее включает в себя все перечисленные выше разновидности схемы управления.

В некоторой степени идея самоулучшающихся преобразователей может быть использована и в машинах для перевода с целью ускорения поиска нужных слов.

Об «обучающихся» системах

Системы с самоизменением или приспособлением характеристик, рассматриваемые в данной книге, можно также назвать *системами, способными к «обучению»*, или *«обучающимися» системами*. Такое название распространилось среди некоторых ученых в последнее время особенно после конференций по кибернетике в Намуре (сентябрь 1958 г.) и Теддингтоне (ноябрь 1958 г.) [69].

Действительно, как приспособление характеристик системы, так и обучение живого существа имеет своей целью учет особенностей окружающей среды для повышения определенных показателей качества: устранение ошибок, повышение точности, быстроедействие и т. п.

Модели не всегда обладают всеми свойствами оригинала. Вопрос о том, является ли указанное сходство только внешним или более глубоким, представляет собой предмет многих научных дискуссий и, несомненно, будет решен в ближайшие годы. Практически более важно то, что обычные системы, не обладающие приспособлением или обучением (например, системы стабилизации, цифрового программного управления с жесткими постоянными характеристиками), не решают задачу полной автоматизации большей части промышленности. Полная автоматизация может быть достигнута только путем применения кибернетических приспособляющихся систем.

Особенно большое сходство между процессом обучения живых существ и приспособлением систем имеется в самоулучшающихся системах, учитывающих вероятность условий. Эти системы отличаются от других (детерминиро-

ванных) систем наличием набора специальных счетчиков (накопителей информации), учитывающих опыт изменения возмущений за некоторое время.

Следует различать самоулучшающиеся, непрерывно приспособляющиеся (обучающиеся) системы и системы, использующие приспособление (обучение) только в начале своей работы. Выбор системы зависит от характера возмущений. Допустим, что мы хотим создать описанный выше компенсатор, у которого порядок подачи величин в компенсирующую цепь зависит от их вероятности. При создании такого компенсатора прежде всего должны быть определены вероятности различных входных сигналов. Для этого используется набор счетчиков, каждый из которых фиксирует определенный вид входного сигнала. Подключив такой набор на вход системы, мы через некоторое время можем узнать, каких сигналов приходит больше и каких меньше, т. е. определить интересующие нас вероятности и выбрать оптимальный порядок подачи величин в компенсирующую сеть.

Если вероятности почти не изменяются (процесс стационарный), то такой процесс обучения требуется провести *только один раз* в начале работы компенсатора. В дальнейшем набор счетчиков входных сигналов можно убрать.

Если же вероятности появления различных входных сигналов непрерывно изменяются, то набор счетчиков должен быть включен в систему и действовать непрерывно, корректируя с некоторым опозданием, свойственным всякому обучению, характеристику компенсатора.

Эти принципы можно применить как для компенсаторов, измеряющих непрерывные изменяющиеся величины (температура и др.), так и для компенсаторов дискретных сигналов (цифровые или буквенные сигналы). В первом случае вся шкала прибора должна быть разбита на ряд дискретных участков.

В простейшем случае самоулучшающаяся вероятностная система может состоять из двух частей: 1) набора счетчиков, определяющих вероятность появления сигналов данного вида, или, в общем случае, режимов системы и 2) устройства для корректирования характеристик объекта в соответствии с полученными вероятностями. В таком виде в системе будет осуществлен только принцип управления по возмущению. Можно добавить в систему еще третью часть — обратную связь (экстремальный регу-

лятор) с колебательным поиском, который реагирует на изменение показателя качества (в рассмотренном примере — скорости компенсации).

В целом, используя все три части, мы получим *комбинированную самоулучшающуюся систему* приспособления характеристик объекта к типу приходящих возмущений — сигналов.

Применение счетчиков — накопителей опыта — является основным средством разработки методики подбора характеристик объекта. Без них возможен только интуитивный или чисто беспорядочный случайный подбор, который в большинстве случаев оказывается непригодным из-за слишком большой длительности поиска оптимального решения.

Набор счетчиков, накапливающих опыт предыдущего, может оказать существенную помощь при создании машин для записи текста с голоса. Звуки человеческой речи, произнесенные отчетливо, могут быть разделены (селектированы) и записаны при помощи буквопечатающих машин. Подобного рода машины (диктофоны) уже имеются. Трудности возникают при записи обычной речи, где многие звуки произносятся неотчетливо. Здесь на помощь могут прийти вероятностные устройства, подсказывающие, например, что в данном месте буква «а» более вероятна, чем буква «о» и т. д. Так как язык обладает стационарными закономерностями, то «обучение» диктофона требуется только в начале его работы. В дальнейшем набор накопителей опыта может быть отключен и использован для других подобных задач.

Детерминированные системы с определенным, упорядоченным, отбором лишь в малой степени обладают способностью к самоулучшению, т. е. обучению. Самоулучшающиеся вероятностные системы значительно больше воспроизводят процесс обучения. Наиболее полно этот процесс моделируется в статистической модели мозга, названной ее автором, Ф. Розенблатом, *перцептроном*¹. В этой модели поля фотоэлементов (около 400 шт.) соединены случайными связями с усилителями и затем таким же образом — с сервомоторами. Усилители имеют смещения, которые можно изменять либо от руки «учителя», либо от датчиков обратной связи.

¹ См. сборник «Зарубежная радиоэлектроника», № 1, 1959.

Рассмотрим процесс обучения перцептрона. Допустим, мы хотим научить его различать буквы «А» и «Б», т. е. добиться того, чтобы при проектировании на поле фотоэлементов буквы «А» срабатывали одни сервомоторы, а от буквы «Б» — другие. Для этого мы должны дать «поощрение» в виде соответствующих смещений тем усилителям, которые включают нужные сервомоторы, и затруднить (т. е. «наказать»), но не выключить действие других, которые приводят во вращение ненужные сервомоторы. Таким образом, изменением смещений можно «научить» систему отличать буквы. Если смещения постепенно исчезают, система «забывает» урок.

Процесс «самообучения» происходит другим способом, при котором смещения изменяются не человеком, а поступают от обратных связей между сервомоторами и усилителями. Возможно совместное применение независимых смещений и обратных связей.

Обучить перцептрон чему-либо так же трудно, как и живое существо. Система вначале, пока не «закрепит» знания, может делать ошибки. Ожидаемая область применения перцептрона обширна: его можно применить для перевода с одного языка на другой, для библиографической информации, для контроля деталей на производстве, в военном деле и т. п. Преимуществом перцептрона перед детерминированными системами с жесткой программой является его универсальность: перцептрон, так же как и животное или человек, можно научить различать самые разнообразные предметы.

В ряде систем компаундирующие связи по возмущению могут быть «обучающимися». Специальные счетчики определяют вероятности данной амплитуды, частоты и возмущений, периодически изменяют варьируемые характеристики основной системы в соответствии с наиболее вероятным в данных условиях типом возмущений. «Обучающимися» могут быть и обратные связи (см. «Автоматика», № 4, 1959).

ПРИМЕРЫ СИСТЕМЫ С САМОИЗМЕНЯЮЩИМСЯ АЛГОРИТМОМ ДЕЙСТВИЯ

В литературе [66] можно найти следующее описание системы, относящейся к рассматриваемым системам:

«Как известно, в теории стрельбы существенное значение имеет так называемая классическая гипотеза о движении цели (когда предполагается, что цель движется прямо-

линейно и равномерно). Эта гипотеза часто служит отправным пунктом при разработке системы управления теми или иными средствами поражения цели. В случае самонастраивающейся системы управления (так автор называет систему с самоизменением свойств) можно представить себе, что в нее уже не будет закладываться заранее какая-либо определенная фиксированная гипотеза и что она будет вырабатываться и изменяться самой системой».

Следует только добавить, что если эти изменения алгоритма будут происходить «в зависимости от характера движения цели», то мы будем иметь систему с управлением по возмущениям, а если они будут происходить в зависимости от точности попаданий в цель, то такая система будет системой с обратной связью по показателю качества системы.

Комбинированная система соединяет оба принципа.

Примером кибернетической системы с самоизменением алгоритма действия может быть еще автоматический указатель и регулятор оптимального курса речного парохода. Как установил член-корр. АН УССР Г. Е. Павленко, существуют формулы для вычисления местоположения парохода, идущего вверх по реке, в котором расход топлива на единицу пути минимальный. При движении вдоль того берега применяется один алгоритм, а на перекатах — другой. Система указателя (советчика) или регулятора должна автоматически изменять (подбирать) алгоритм.

Другой пример можно найти в области систем программного управления металлообрабатывающими станками. В цифровой программе, задаваемой станку, содержится только сравнительно небольшое число точек. Промежуточные точки программы находятся самой системой при помощи интерполирующих и экстраполирующих устройств. Применяются различные системы интерполяции: линейная, квадратичная, интерполяция с помощью степенного ряда и др. Возможно осуществление интерполяции по производным от перемещения (ряд Тейлора).

Выбор закона интерполяции, обеспечивающего наибольшую точность, зависит от характера (спектра частот) программы. Следовательно, здесь также возникает задача о самоизменении интерполяции в зависимости от типа программы (управление по возмущению) или в зависимости от точности обработки детали (обратная связь по показателю качества).

Если закон интерполяции выражается степенной функцией

$$U_{\text{вых}} = nU_{\text{вх}}^m,$$

то задача сводится к выбору значения показателя m . Таким образом, в этом случае мы снова встречаемся с самоизменением степенной нелинейной характеристики.

СИСТЕМЫ С САМОИЗМЕНЕНИЕМ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

К системам с самоизменяющимся алгоритмом преобразования близки по идее и системы с самоизменением вероятностных характеристик. Эти системы имеют объекты со статистическими (вероятностными) характеристиками. Примером системы с самоизменением вероятностных характеристик может быть *вибрационный фидер*, служащий для отбора (сортировки модулей)¹.

Соединение модулей происходит в соответствии с их формой (пазами и выступами). Соединенные вместе модули образуют то или иное радиотехническое устройство (радиоприемник, радиомаяк и т. п.).

После изготовления модули различных форм нужно рассортировать по форме. На полностью автоматизированных заводах, изготавливающих радиоаппаратуру, сортировка модулей происходит при помощи специальных сит с отверстиями различной формы, называемых вибрационными фидерами.

На наиболее совершенных автоматических заводах число отверстий той или иной формы, имеющихся в фидере, может изменяться в соответствии с потребностью производства.

Если, например, фидер дает слишком много модулей одного типа и мало другого, то системы автоматически увеличивают число вторых и уменьшают число первых модулей. Регулирующим воздействием является распределение числа отверстий между отдельными их видами. Показателем качества является отсутствие излишних запасов модулей на выходе фидера.

¹ Модуль в данном случае — изделие из пластмассы или другого изолирующего материала, на котором наносятся линии из проводящей краски и крепятся радиодетали.

Несмотря на то, что объект регулирования обладает чисто статистическими характеристиками, для его управления могут быть использованы все указанные выше способы отбора требуемой (оптимальной) вероятностной характеристики: управление по возмущениям или по показателю качества, включающее в себя отбор одного из нескольких одновременно существующих фидеров, опробование всех вариантов распределения формы отверстия последовательно во времени, беспорядочный отбор варианта, экстремальное, упорядоченное регулирование, принципы самоулучшения и, наконец, комбинированное регулирование.

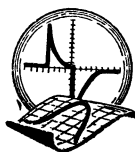
САМОУЛУЧШАЮЩИЕСЯ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ ВЕРОЯТНОСТИ СРАБАТЫВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ И СИСТЕМЫ С ПОИСКОМ ЦИКЛИЧЕСКИХ (ПОВТОРЯЮЩИХСЯ) СОСТАВЛЯЮЩИХ ЗАДАНИЯ

Проф. В. В. Солодовников [53] предложил самоулучшающиеся системы, близкие по своей идее с самоулучшающейся телефонной связью фирмы «Филлипс» [52].

Система запоминает, например, число возмущений, при которых ей приходится включать сервомотор вправо, и число возмущений, при которых ей приходится включать сервомотор влево. Если команд «вправо» больше, чем команд «влево», то система автоматически перестраивается так, что время для выполнения команды «вправо» меньше, чем время для выполнения команды «влево» и наоборот.

Практически это может быть достигнуто, например, смещением зоны нечувствительности сервомотора в одну или другую сторону в зависимости от вероятности срабатывания.

Дальнейшее развитие этих систем приводит к системам, отыскивающим регулярные (циклические) составляющие задания. Как только такая составляющая сигнала будет обнаружена, по ней осуществляется компаундирование системы и соответствующая составляющая ошибки системы полностью устраняется, а быстродействие системы увеличивается. (См. «Автоматика», № 4, 1959).



Глава VII

КИБЕРНЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С САМОИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ СТРУКТУРОЙ

ЗАДАЧИ САМОИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ

Системы с самоизменяющейся структурой являются системами автоматического регулирования и управления, в которых структура (т. е. схема) непрерывно. время от времени или периодически изменяется в зависимости от изменения внешних возмущений или внутреннего состояния системы. Напомним, что структура системы однозначно связана с видом уравнений динамики ее элементов, описывающих ее поведение в динамических и установившихся режимах. Если два элемента содержат в своих уравнениях одну и ту же переменную, это означает, что между этими элементами существует реальная связь.

На так называемых структурных схемах систем регулирования элементы изображаются квадратами, а связи — линиями, соединяющими эти квадраты [16].

Принцип самоизменения структуры схемы практически осуществляется переключением в схеме соединений или введения в нее новых элементов. Целью таких переключений (отбора структуры) является достижение лучшего решения задачи регулирования, поставленной перед данной системой.

Переключения структур (так же, как и рассмотренные выше переключения уставок, программ и параметров) могут производиться от какого-либо пускового органа, реагирующего на те или иные изменения внешних воздействий или внутреннего состояния системы.

Отбор наилучшей структуры может быть статистическим (беспорядочным), упорядоченным по какому-либо

рациональному принципу и, наконец, упорядоченно-самоулучшающимся.

Примеры систем, рассмотренные ниже, позволяют более ясно представить открывающиеся в этом направлении возможности использования самоизменения структуры.

ПРИМЕРЫ СИСТЕМ, ГДЕ ТРЕБУЕТСЯ САМОИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ

Изменение структуры соединения источников или потребителей энергии. Еще на заре развития электротехники для поддержания постоянства освещенности применялись автоматические устройства, служащие для изменения способа соединения и количества дуговых электрических ламп. Собственно, здесь впервые применялся принцип самоизменения структуры электрической системы освещения.

Многие новые источники электрической энергии, такие как ветрогенераторные установки, термогенераторы или фотогенераторы с запирающим слоем, преобразующие энергию ветра, солнца или других источников тепла и света, обладают весьма непостоянными характеристиками. В некоторой степени это относится к аккумуляторным батареям и гальваническим элементам. Например, напряжение фотогенератора сильно колеблется в зависимости от его освещенности солнечным светом, т. е. от времени суток, состояния (облачности) неба и т. д.

Следует также учесть, что и сопротивление нагрузки, питаемой от перечисленных выше генераторов, не остается постоянным, а чаще всего изменяется непрерывно. Если батарея источников тока (генераторов) должна отдавать наибольшую мощность, то ее внутреннее сопротивление согласно так называемому правилу согласования сопротивлений должно быть равно сопротивлению нагрузки.

Указанные выше причины приводят к тому, что это правило непрерывно нарушается.

Описываемые ниже самоорганизующиеся системы решают задачу выбора типа соединений генераторов в условиях непрерывного (но сравнительно медленного) изменения режима работы и колебаний сопротивления нагрузки с тем, чтобы в системе поддерживались условия максимальной отдачи мощности.

Представим себе, например, ряд источников тока, напряжение которых по условиям работы непрерывно изменяется. Такими источниками тока могут быть, например, фотогенераторы, использующие солнечную энергию. Простейшая система с самоизменением структуры может решать задачу автоматического подключения нагрузки (потребителя электроэнергии) к источнику, который в данный момент развивает наибольшее напряжение или напряжение которого менее всего отличается от заданной величины.

Более сложная система может автоматически переключать эти источники тока последовательно, смешанным способом или параллельно так, чтобы получить наибольшее или заданное напряжение. Эта система в отличие от предыдущей должна содержать ряд запоминающих устройств, чтобы путем проб быстро пройти все возможные переключения, запомнить результаты, сравнить их между собой и выбрать требуемое соединение.

Если переключение в реальных объектах (в данном примере переключение генераторов) недопустимо, то придется заменять их в пробной системе моделями или, что еще более сложно, производить вычисление напряжений для каждого типа соединения и сравнивать между собой не реальные напряжения, а результаты вычислений.

Для поддержания постоянства скорости движения (или потребляемой мощности) на электрических железных дорогах применяется переключение числа работающих двигателей, регулирующих сопротивление и изменение способа их соединения (структуры схемы).

Среди систем с самоизменением структуры можно назвать систему, отыскивающую оптимальное (например, с точки зрения достижения максимума отдачи мощности) соединение потребителей электроэнергии или наилучшее (с точки зрения потребления мощности или достигаемой скорости) соединение двигателей электрических железных дорог, соединение между собой отдельных систем регулирования, расположение рабочих органов машин, схему соединения сложной энергосистемы и некоторые другие примеры.

Отличительным признаком этих систем, как указывалось выше, является наличие переключений в структурной схеме как источников, так и потребителей энергии в той или иной ее форме.

Изменение структуры систем автоматического регулирования. Благодаря использованию усилителей системы автоматического регулирования отличаются от других динамических цепей наличием свойства детектирования сигналов (воздействия передаются только в одном направлении). Изменение структур систем автоматического регулирования может быть рекомендовано с целью улучшения их характеристик:

а) в случае наличия в системе переменных параметров и характеристик, изменяющихся независимо от нас в ходе производственного процесса;

б) для достижения оптимального соотношения параметров системы и параметров спектральных характеристик основных возмущений при отсутствии помех, действующих на систему;

в) то же, но при наличии указанных помех.

Таким образом, самоизменение структуры систем регулирования может быть полезно в тех же случаях, когда применяется самоизменение нелинейностей и параметров, рассмотренных в предыдущих главах.

В первом из указанных трех случаев изменение структуры системы стабилизации может иметь целью повышение надежности системы. Так, например, известно, что дуговая электрическая печь как объект регулирования обладает весьма переменными характеристиками. В период пуска печи целесообразно с точки зрения точности применить одну систему регулирования, а при длительной работе — другую, более простую. Отключение части узлов повышает надежность системы, в частности, благодаря сокращению среднего числа часов работы этих узлов.

В системах регулирования шахтного подъема характеристика объекта также значительно изменяется при спуске клетки в шахту. Переключение в структуре системы управления здесь также может быть полезным для сохранения постоянства степени устойчивости системы.

Аналогичное положение имеется в системе регулирования ракет. При полете на небольшой высоте в плотной воздушной среде требуется одна система стабилизации, а при высоте более десяти километров — другая. Переключение структуры системы стабилизации курса повышает надежность и качество регулирования.

Отбор структуры в программных системах позволяет

более точно выполнить программу с меньшими динамическими ошибками.

В следящих системах переключение структур повышает точность выполнения закона следования, а в экстремальных системах — быстродействие и точность достижения экстремума.

С а м о о р г а н и з у ю щ и е с я с и с т е м ы. В этих системах переключение структуры имеет целью сохранение устойчивости системы при различного рода нарушениях нормальной работы (например, в аварийных режимах).

Задачей одной из разновидностей самоорганизующихся систем является отыскание величины коэффициента и знака обратных связей, которые определяются таким образом, чтобы сохранить статически устойчивую работу системы. В случае нарушения ряда связей система ищет новые пути сохранения статической устойчивости.

Значение таких самоорганизующихся систем, отыскивающих устойчивую работу, становится особенно ясным, если вспомнить, что до сих пор во многих системах в моменты пуска, остановки агрегатов и особенно в моменты аварий автоматика обычно обслуживающим персоналом отключается, так как в аварийных режимах она часто действует неправильно.

Чтобы понять задачу систем, отыскивающих устойчивую работу, достаточно вспомнить демонстрировавшийся у нас польский фильм «Ирена, домой!». В этом фильме, между прочим, рассказывается о том, как автолюбитель в своем мотоцикле переставил все рукоятки управления. Другой человек, сев на этот мотоцикл, к своему удивлению, обнаружил, что при повороте рукоятки от себя («уменьшить ход») мотоцикл увеличивает скорость и т. д. Будучи «системой самоорганизующейся», человек вскоре усвоил новые правила управления этим мотоциклом и благополучно приехал к месту назначения.

Такие же действия требуются от самоорганизующегося регулятора. Он должен действовать согласно правилам, заданным ему конструктором. Если же при изменившихся условиях эти правила оказываются недействительными, регулятор должен путем переключения в своей схеме выработать новые правила своего поведения («обучиться») так, чтобы правильно действовать и при этих новых условиях. Система автоматического регулирования должна хорошо работать не только в спокойной обстановке, но и в моменты

аварий, пусков, остановок оборудования, т. е. действовать так, как действовал бы человек.

Задачу самоорганизации системы можно решить (как и задачи других кибернетических систем) двумя различными способами: при помощи упорядоченного, детерминированного, поиска или по принципу статистического, беспорядочного, поиска требуемых свойств системы.

Американский ученый Эшби в 1948 г. сконструировал аппарат, который получил название гомеостата Эшби, и опытным путем доказал, что создание статистической или вероятностной системы, отыскивающей устойчивую работу, вполне возможно. Связанные с этим явления повышения структурной устойчивости физики называли ультраустойчивостью и мультиустойчивостью [66] и [70].

Гомеостат Эшби состоит из четырех магнитных систем, имеющих перекрестные обратные связи. Каждая связь регулируется при помощи кольцевого реостата, имеющего 25 отводов. В случае больших отклонений переключатели начинают вращаться и тем самым система статистически (без определенного порядка) ищет значение и знаки связей, отвечающих устойчивости. Всего в системе возможно $25^4 = 390\ 625$ сочетаний положений переключателей.

Если магниты связать механически, то система поиска вступает в действие и отыскивает новое положение реостатов, при котором работа снова становится устойчивой.

Ученые Ферми и Кларк в 1954 г. повторили опыт Эшби на счетной машине и получили в основном такое же подтверждение принципа ультраустойчивости системы.

В настоящее время обсуждается вопрос создания автопилота, практически осуществляющего ультраустойчивость самолета.

Давно используемая в следящих системах комбинация сельсинов точного и грубого отсчета является прообразом самоорганизующейся системы. Допустим, что вся шкала системы имеет 6000 делений. Поворот от нуля до полного согласования на 6000 делений должен соответствовать повороту сельсина грубого отсчета в пределах от -90 до $+90^\circ$, так как только при этом система будет статически устойчива. В этом диапазоне, как известно, характеристика сельсина такова, что напряжение в зависимости от угла поворота имеет один и тот же знак угла наклона. Допустим далее, что передаточное число между сельсином

грубого и точного отсчета равно 1 : 60, тогда статическая устойчивость системы точного отсчета обеспечивается только в пределах от $-1,5$ до $+1,5^\circ$.

Самоорганизация системы состоит в том, что, как только отклонение превысит зону устойчивости точного канала, она автоматически переключается на работу грубого канала и, наоборот, при подходе к нулю угла рассогласования система (в указанных пределах) снова включает в работу точный канал.

Обратим внимание, что здесь вместо беспорядочного, статистического, поиска (как в гомеостате Эшби) применено детерминированное управление по возмущению — углу рассогласования.

Основным недостатком статистического поиска является его большая продолжительность, хотя Эшби [70] показал, что при оценке продолжительности статистического поиска допускаются часто ошибки в сторону увеличения времени, необходимого для него. Во всяком случае упорядоченный поиск решает ту же задачу значительно быстрее.

В гомеостате Эшби свойство универсальности статистических систем не используется. В этом смысле данная машина не рациональна, не использует своих возможностей и действует по принципу, отличному от принципа действий человека. Задачу поиска устойчивого состояния многоконтурной системы более рационально решать при помощи создания упорядоченной, детерминированной, машины.

С точки зрения общей теории кибернетических систем в задаче самоорганизации мы имеем случай вырожденной характеристики объекта: характеристика объекта $\varphi = f(\mu)$ (где μ — номер структуры) имеет всего два значения (устойчива и неустойчива), из которой желательна только одно значение. В экстремальных системах, как уже отмечалось, показатель качества φ может принимать много значений.

Выше мы указали на возможность искусственного формирования экстремальной характеристики объекта в случае, когда дискретному множеству значений регулирующего воздействия $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ отвечает некоторое множество значений показателя качества $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ (см. главу третью). В сравнительно редких случаях объекты таковы, что не удается формировать экстремальную характеристику. Примером может быть гомеостат Эшби (где применен,

как известно, беспорядочный, статистический, поиск), в котором показатель качества φ принимает всего два значения (устойчиво и неустойчиво). Располагая только двумя значениями φ , нельзя формировать экстремальную характеристику $\varphi = f(\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_n)$. Однако и здесь можно применить упорядоченный поиск, основанный на других алгоритмах (правилах) поиска.

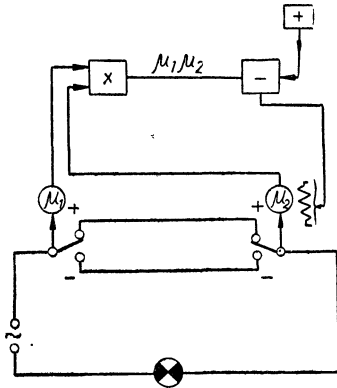


Рис. 64. Схема упорядоченного поиска включенного состояния лампы при произвольном положении переключателя.

Рассмотрим, например, систему из двух реле, питающих лампы, в которой φ также может принимать только два значения («горит» и «не горит»). Положения реле являются регулирующими воздействиями μ_1 и μ_2 , а ток лампы — показателем качества φ (рис. 64).

В данном простом примере удается найти величину $\mu' = \mu_1\mu_2$, знак которой совпадает со знаком φ (табл. 6).

Для получения $\varphi > 0$ необходимо измерять произведение $\mu_1\mu_2$ и подбирать одно из регулирующих воздействий так, чтобы $\mu_1\mu_2 > 0$.

Вторым примером может служить одноконтурная динамическая система, состоящая из n усилителей, включенных в кольцо (аналог одноконтурной системы регулирования).

Для удовлетворения условий *статической* устойчивости такой системы необходимо и достаточно, чтобы нечетное число усилителей имело падающую характеристику $\mu_{\text{вых}} = -\alpha\mu_{\text{вх}}$. Остальные усилители должны иметь возрастающую характеристику $\mu_{\text{вых}} = \alpha\mu_{\text{вх}}$.

Допустим, что каждый усилитель снабжен переключателем, изменяющим знак усиления. Положение переключателя

Таблица 6
Алгоритм действия схемы рис. 64

φ	μ_1	μ_2	$\mu' = \mu_1\mu_2$
+1	+1	+1	+1
-1	+1	-1	-1
-1	-1	+1	-1
+1	-1	-1	+1

чателей снова будем считать регулирующими воздействиями и обозначим буквами $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$. Каждое из них может принимать только два значения: при возрастающей характеристике $+1$, а при падающей -1 . Легко обнаружить алгоритм упорядоченного управления переключателями. Для устойчивости знак одного из регулирующих воздействий должен подбираться так, чтобы произведение всех регулирующих воздействий было отрицательным.

В гомеостате, где, кроме основного последовательного контура, имеются и перекрестные связи, выбор алгоритма упорядоченного поиска более сложен, но все же возможен. Алгоритм упорядоченного поиска устойчивости непосредственно вытекает из аналитического выражения условия статической устойчивости гомеостата.

СИСТЕМЫ, СОСТОЯЩИЕ ИЗ БОЛЬШОГО ЧИСЛА ОДИНАКОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Если система состоит из очень большого числа (ассамблей) элементов (усилителей и связей между ними) и если в ней нет специальных чувствительных элементов, измеряющих помехи, то такую систему иногда называют «биологической». При этом имеется в виду сходство структуры такой системы со структурой мозга живых существ в смысле их однородности.

В «биологической» системе нельзя указать точно, где именно находится «устройство ввода информации», «арифметическое устройство», «устройство памяти», «блок питания», «устройство вывода» — обычные устройства для больших вычислительных машин. Имеются только области элементов, которым та или иная функция свойственна в большей степени в данное время. В другой обстановке функции элементов самопроизвольно изменяются.

Рассмотрим пример. Допустим, что цифровая вычислительная машина, состоящая из германиевых триодов, сопротивлений и других элементов, установлена на кибернетической «черепахе», способной перемещаться по залу. Измерительным органом «черепахи» пусть будет не фотоэлемент, а устройство, измеряющее качество действия вычислительной машины (точность). Ясно, что эта «черепаха» будет искать такое место в зале, где температура, освещение и другие помехи менее всего влияют на параметры вычислительной машины. Человек, решающий задачу, ищет место, где помехи меньше. То же выполняет указанная

выше система. Обратим внимание на то, что система в целом не имеет специальных воспринимающих элементов, измеряющих помехи. Она чувствует их всем своим объемом, что и дало повод отнести систему к «биологическому» типу. В одном месте зала изменение температуры действует на одну часть вычислительной машины, а в другом — на другую.

В «биологических» системах, состоящих из большого числа одинаковых элементов, как мы видели на примере, разделение внешних возмущений на основные возмущения и помехи теряет смысл, так как эти системы реагируют на то и на другое. В рассмотренном выше примере к основным возмущениям можно лишь условно отнести входной сигнал вычислительной машины, а к помехам — влияние температуры, света и т. п.

Так как «биологические» системы приспособляются к окружению, то часто говорят [69], что они способны к «обучению», как гомеостаты и перцептроны.

Ученые Эшби, а затем Ван-Форстер построили экспериментальные модели систем, состоящих из большого числа одинаковых усилителей и связей между ними. В этих системах наблюдаются определенные закономерности. Установлено, что такие системы имеют большое число устойчивых состояний. При разрыве некоторых связей система устанавливает новые, причем наблюдается упорное сопротивление системы к нарушению устойчивости. Система путем автоматических переключений отыскивает устойчивую структуру. Объяснение этого явления дано Винером в статье «Машина умнее своего создателя»¹. Неустойчивые сочетания элементов быстро разрушаются, и мы почти всегда наблюдаем только длительно существующие устойчивые структуры. Чем больше элементов содержит система, тем больше она имеет устойчивых состояний, тем вероятнее устойчивые состояния по сравнению с неустойчивыми, трудно обнаруживаемыми наблюдателем.

Чем больше элементов и чем сложнее система, тем больше ее способность к генерированию, переработке информации. Напомним, что самовоспроизводящиеся системы, у которых изделие не отличается от производящей его машины, могут быть осуществлены только при очень сложной структуре (теорема Неймана).

¹ Н. В и н е р, «Кибернетика», М., 1958.

КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ С САМОИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ СТРУКТУРОЙ

Классификацию систем с самоизменяющейся структурой будем производить, пользуясь конкретным примером. Таким примером может служить схема соединения источников энергии для стабилизации какой-либо регулируемой величины с самоизменением структуры.

Принцип самоизменения структуры системы для стабилизации регулируемой величины может осуществляться разнообразными способами. Проще всего этот принцип применить в гидравлических, пневматических или электрических цепях, где изменение структуры выражается в переключении элементов из последовательного в смешанное, а затем в параллельное соединение и наоборот.

Рассмотрим систему регулирования напряжения переменного тока потребителя электроэнергии, действующую путем переключения некоторого числа небольших вольтодобавочных трансформаторов. Напряжение этих трансформаторов может как добавляться, так и вычитаться из напряжения основного питающего трансформатора.

Назначение таких систем стабилизации и методику расчета параметров простейших из них нами было рассмотрено ранее [24].

В данном случае нас интересует не столько актуальность, простота или надежность систем, сколько выяснение всевозможных способов решения подобных задач. Рассмотрение систем помогает ясно представить различные способы решения как данной, так и других разнообразных задач самоизменения структуры.

Способы переключения электрической цепи такие же, как и способы переключения гидравлических или пневматических цепей, или такие же, как способы переключения участков производства, потоков пассажиров или потребителей, потоков денежных средств и т. д.

Так как подобные задачи широкого плана еще не решались, то на данном этапе изучения самоорганизующихся систем ограничимся классификацией основных принципиальных схем системы стабилизации напряжения (рис. 65). Эта система автоматически отыскивает структуру соединения питающих трансформаторов, при которой выходное напряжение меньше всего отличается от заданного.

Задача переключения источников или потребителей тока может решаться различными способами.

Если заранее известен ход изменения условий работы источников, то их переключение можно осуществить по программе в функции времени. Однако значительно точнее будут работать системы, непрерывно или периодически отыскивающие наилучшее соединение схемы. В свою очередь, такие системы имеют ряд разновидностей, которые мы здесь и рассмотрим.

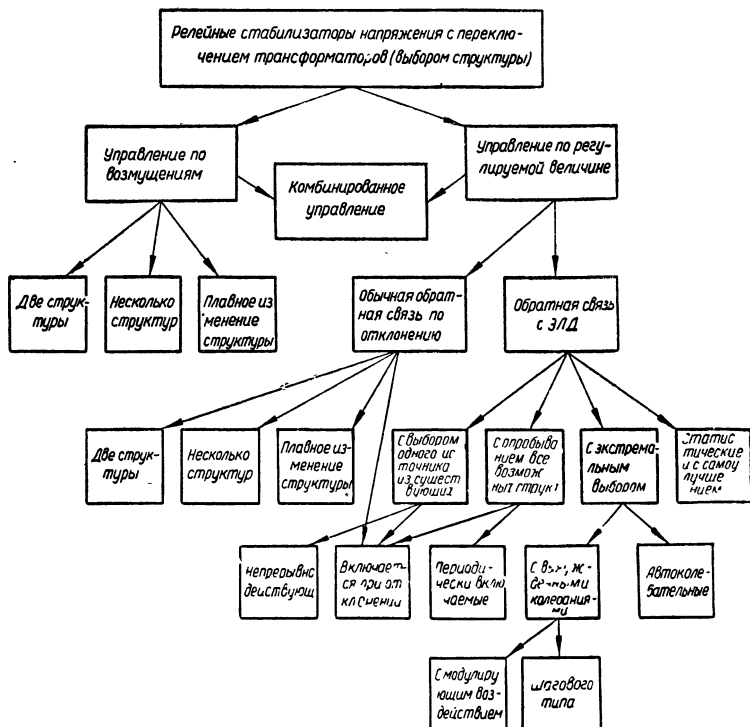


Рис. 65. Классификация основных принципиальных схем системы, отыскивающей структуру включения трансформаторов.

По аналогии с рассмотренными выше кибернетическими системами возможно создание систем стабилизации, отличающихся по принципу управления:

- а) по возмущениям,
- б) по регулируемой величине.

Соединение этих двух принципов дает возможность создания наиболее совершенных *комбинированных систем*.

Системы разомкнутые с управлением по возмущениям

Одним из основных возмущений в данной системе является изменение входного питающего напряжения $\lambda = U_1(t)$.

Управление по возмущению U_1 можно осуществить по нескольким вариантам.

На рис. 66, а показана схема, в которой поддержание постоянства напряжения $U = \text{const}$ достигается с помощью переключения всего только двух структур. Характеристика, приведенная рядом со схемой, показывает, как автоматически изменяется коэффициент трансформации напряжения $k = \frac{U_2}{U_1}$ при изменении входного напряжения.

Для уменьшения частоты переключений контактора характеристика $k = f(U_1)$ имеет небольшую «зону затягивания» ($10\% U_1$). Для этой же цели [24] иногда применяют реле времени.

На рис. 66, б показана более сложная, но и более точная схема стабилизации напряжения, имеющая несколько переключений структуры. Здесь коммутатор переключает соединение группы вольтодобавочных трансформаторов в функции входного напряжения.

Располагая четырьмя трансформаторами, можно получить семь ступеней напряжения (последовательное, смешанное, параллельное соединение добавочных трансформаторов при синфазном и противофазном их включении позволяют получить шесть ступеней напряжения, а седьмая ступень получается при отключении трансформаторов).

Наличие «зоны затягивания» в характеристике $k = f(U_1)$, как и в предыдущей схеме, обеспечивает более спокойную работу релейного распределителя.

Наконец, на рис. 66, в дана хорошо известная схема пропорционального регулирования коэффициента трансформации $k = \frac{U_2}{U_1}$ в функции U_1 . Эту схему можно рассматривать как предельную систему с очень большим числом переключаемых структур или, условно говоря, с плавным изменением структуры.

Системы стабилизации схемы, которые изображены на рис. 66, а, б и в, являясь разомкнутыми системами, обладают тем положительным свойством, что в них не возникают автоколебания. Каждому значению U_1 отвечает определенная схема соединения (структура) питания. Системы осуществляют *заранее заданную характеристику* $k = f(U_1)$.

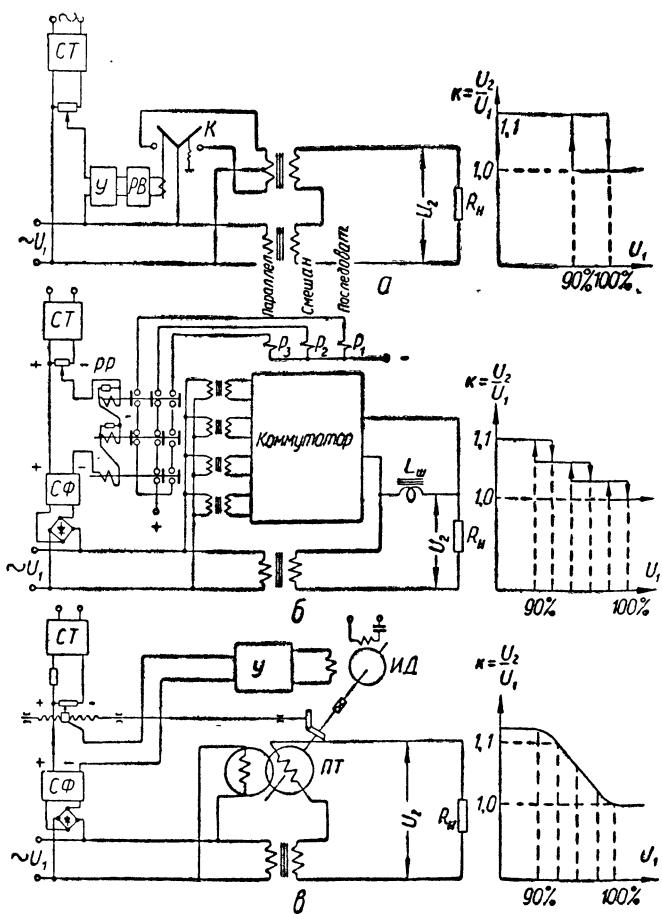


Рис. 66. Стабилизаторы напряжения, управляемые по возмущению:

а — с переключением двух структур; **б** — с переключением нескольких структур; **в** — с плавным изменением коэффициента трансформации; CT — стабилизатор, $У$ — усилитель, $PВ$ — реле выдержки времени, K — контактор, PP — релейный распределитель, CF — сглаживающий фильтр, $ПТ$ — поворотный трансформатор, $ИД$ — исполнительный двигатель, R_H — сопротивление нагрузки, $L_{ш}$ — шунтирующий дроссель.

Отбор (поиск) структуры в системах с управлением по возмущениям не требуется. Принципиальным недостатком рассмотренных систем с управлением по возмущению является то, что они стабилизируют выходное напряжение только при изменении одного возмущения (в приведенных примерах входного напряжения U_1). Другие возмущения, например, изменение сопротивления нагрузки, изменение характеристик оборудования (в частности, характеристики срабатывания контактора), по которым нет компаундирующих связей, не компенсируются. Чтобы система реагировала и на изменения нагрузки и характеристик оборудования, нужно применить другие измерительные элементы и компаундирующие связи.

Можно провести полную аналогию между свойствами экстремальных систем, управляемых по возмущению (см. рис. 17), и свойствами систем с самоизменяющейся структурой, также управляемых по возмущению (рис. 65). Единственным отличием является то, что в экстремальных системах регулирующие воздействия иногда изменяются непрерывно, а в системах с самоизменяющейся структурой, как и в системах с самоизменением программы, чаще всего регулирующее воздействие имеет ряд дискретных значений.

Напомним, что в рассматриваемом примере *регулируемой величиной*, или *показателем качества структуры*, φ является отклонение выходного напряжения от заданного значения.

Основными возмущающими воздействиями λ_1 и λ_2 являются изменения входного напряжения и сопротивления (или проводимости) нагрузки.

Регулирующим воздействием μ можно считать номер структуры (номер комбинации соединения элементов системы регулирования).

Приводимая нами классификация может быть иллюстрирована и другими примерами систем регулирования с переключением их структурной схемы. Известно, например, описание самонастраивающейся следящей системы [71], в схеме которой автоматически производятся переключения в зависимости от наличия ускорения. При ускорении больше определенной величины система работает по одной схеме, а при его отсутствии — по другой.

Аналогичная по принципу система была разработана и нами [16].

Системы с обратной связью с управлением по регулируемой величине

Системы с обычными обратными связями. В ряде систем автоматического управления по регулируемой величине можно применить как обычную обратную связь, такую как, например, в системах стабилизации, так и колебательную обратную связь с ЭЛД. Это нашло свое отражение и в проводимой нами классификации систем (см. рис. 17 и 65). Возможность применения неколебательных обратных связей в кибернетических системах автоматического регулирования рассматривалась в главе третьей.

Системы с обычной обратной связью представлены на рис. 67. Для объяснения действия этих систем достаточно сравнить рис. 66 и 67. Отличие систем состоит в выборе места отбора регулирующих импульсов.

Из рассмотрения схем (рис. 67) можно сделать вывод, что при регулировании по отклонению регулируемой величины теоретически можно создать схемы такие же, как и при регулировании по возмущению:

- а) с переключением двух структур;
- б) с переключением нескольких структур;
- в) с плавным изменением коэффициента трансформации.

Однако из практики автоматического регулирования хорошо известно, что из-за дискретного характера изменения закона усиления только последняя схема (рис. 67, в) может быть устойчивой. Первые две схемы не могут иметь статического установившегося режима. По-видимому, применение обычных обратных связей в системах регулирования по отклонению регулируемой величины возможно только в случаях, когда допустим колебательный характер работы системы.

Системы с обратной связью с ЭЛД. Более перспективными являются системы регулирования по отклонению регулируемой величины с обратными связями, в которых применяются элементы логического действия.

Преимуществом систем с обратной связью с ЭЛД по сравнению с системами с обычной обратной связью, рассмотренными выше, является повышенная помехоустойчивость. Эти системы по характеру отбора оптимальной структуры можно разделить на следующие пять групп (см. рис. 65):

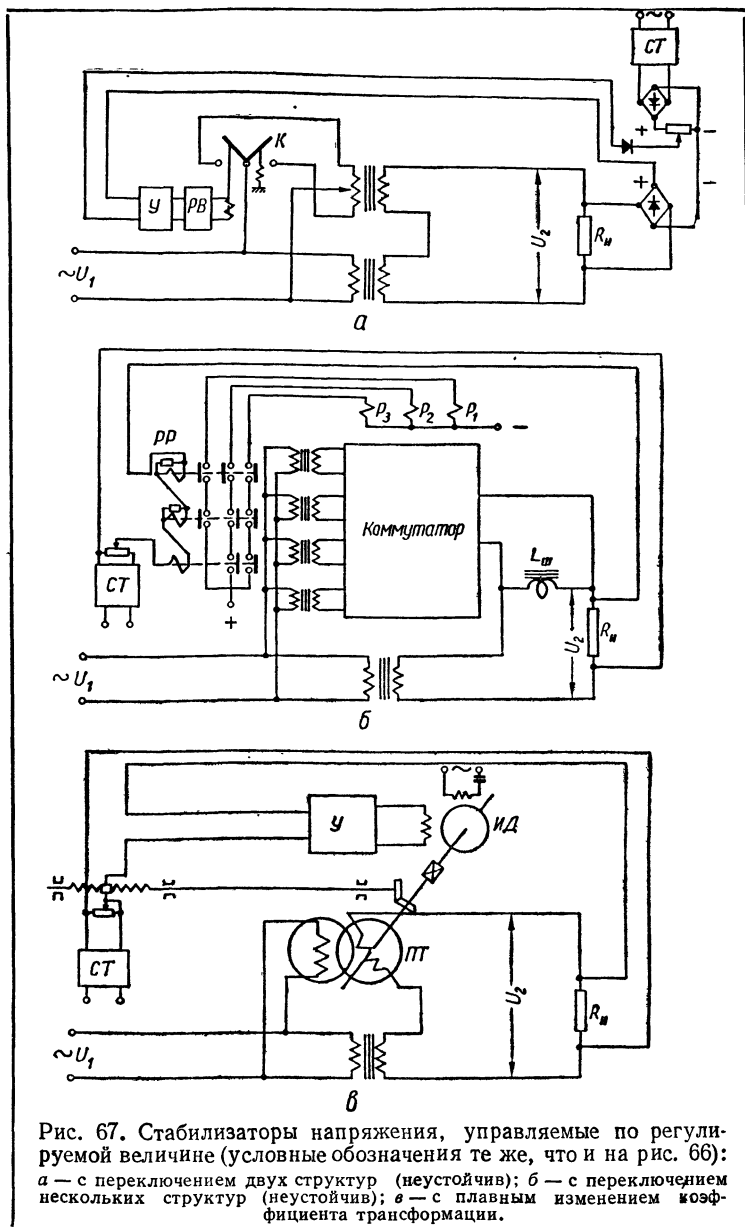


Рис. 67. Стабилизаторы напряжения, управляемые по регулируемой величине (условные обозначения те же, что и на рис. 66): *a* — с переключением двух структур (неустойчив); *б* — с переключением нескольких структур (неустойчив); *в* — с плавным изменением коэффициента трансформации.

- а) с отбором одного источника из нескольких одновременно существующих;
 - б) с опробованием всех возможных структур последовательно во времени;
 - в) со статистическим, беспорядочным, отбором требуемой структуры (также последовательно во времени);
 - г) с упорядоченным (главным образом экстремальным) отбором требуемой структуры;
 - д) с самоулучшающимся отбором требуемой структуры.
- Рассмотрим конкретные системы с обратной связью с ЭЛД.

Система с отбором одного источника из нескольких одновременно существующих представлена на рис. 68.

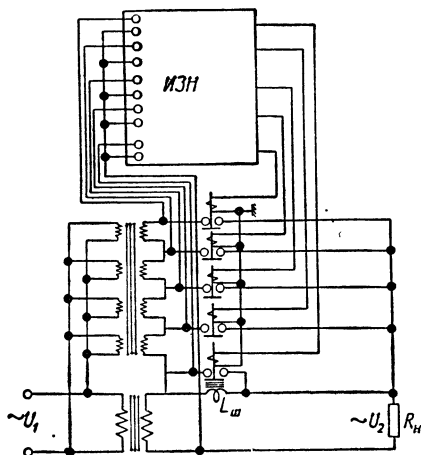


Рис. 68. Стабилизатор с логическим управлением непрерывного действия, выбирающий источник, напряжение которого меньше всего отличается от заданного значения.

Индикатор заданного напряжения ИЭН (схему которого мы рассмотрели выше) позволяет быстро найти источник с требуемым напряжением и присоединить к нему потребитель электроэнергии. При этом источник должен быть достаточно мощным, таким, чтобы его напряжение незначительно снижалось при присоединении потребителя. В противном случае в системе могут возникнуть автоколебания.

Система с опробованием всех возможных структур

последовательно во времени изображена на рис. 69.

Система выбирает такое соединение, при котором напряжение U_2 , подаваемое на нагрузку, имеет наибольшую величину. Максимальное напряжение на нагрузке получается при выполнении правил согласования сопротивлений. Сопротивление нагрузки должно быть равно сопротивлению источника тока, и поэтому при последовательном

соединении источников обязательно создается максимальное напряжение. Чем точнее выполняется согласование сопротивлений, тем большая мощность, отдаваемая генераторами.

В схеме имеется часовой механизм ЧМ и генератор импульсов ГИ, которые изредка (например, один раз в 10—20 мин.) генерируют серию из пяти импульсов. Возможны и другие системы пуска генератора импульсов

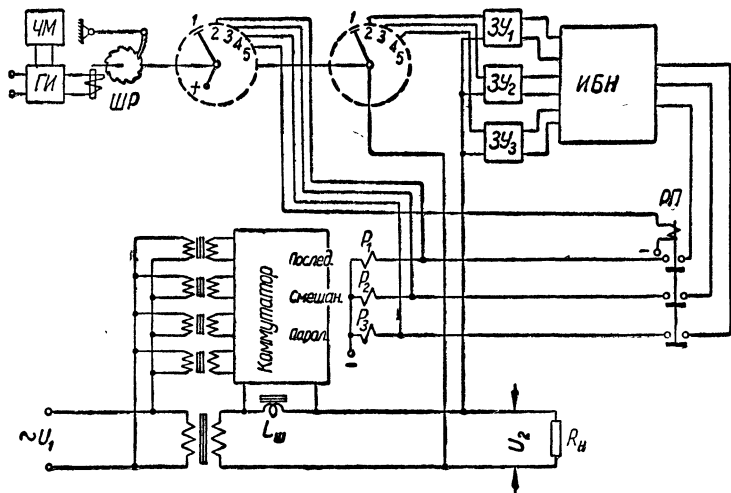


Рис. 69. Стабилизатор с логическим управлением, включаемый периодически и опробующий все структуры.

(например, при снижении напряжения ниже определенной нормы и др.). Эти пять импульсов поступают на шаговый распределитель ШР, переключающий пять контактов. Первый контакт включает реле, стирающее все записи напряжений на запоминающих устройствах ЗУ₁, ЗУ₂ и ЗУ₃ (для упрощения схемы цепи стирания на рис. 69 не показаны). Второй контакт распределителя включает реле P₁, осуществляющее последовательное соединение вторичных обмоток дополнительных трансформаторов. Одновременно производится запись напряжения U₂, получающегося при этом на запоминающем устройстве ЗУ₁. Третий контакт включает реле P₂, которое обеспечивает смешанное соединение трансформаторов и регистрирует напряжение при помощи запоминающего устройства ЗУ₂. Четвертый кон-

такт включает реле P_3 , осуществляющее параллельное соединение генераторов, и записывает полученное при этом напряжение на запоминающем устройстве $ZУ_3$.

Напряжения с выхода запоминающих устройств непрерывно поступают на схему указателя наибольшего напряжения *ИБН*. Эта схема подготавливает цепи включения одного из реле P_1 , P_2 и P_3 , дающего такое соединение трансформаторов, при котором получается наибольшее напряжение U_2 .

Наконец, пятый контакт искателя через реле *РП* и P_1 , P_2 и P_3 осуществляет включение генераторов на наилучшее в данных условиях соединение и блокирует включенное реле.

На этом процесс самоорганизации системы заканчивается.

Через некоторое время процесс поиска наилучшего соединения благодаря действию часового механизма или другого пускового органа снова повторяется.

Возможны следующие разновидности систем:

Система с переключением вспомогательных источников (моделей). Недостатком систем, описанных выше, является наличие разрывов в цепи питания нагрузки, а также наличие периодов (хотя и очень кратковременных), в течение которых нагрузка получает пониженное напряжение (по сравнению с тем, которое возможно получить при данной нагрузке). Чтобы уменьшить этот недостаток, можно составить систему, в которой периодически происходит поиск наилучшего соединения небольших вспомогательных источников электроэнергии, условия работы которых такие же, как и у основных источников. Особенностью такой системы является то, что она не производит поисковых переключений в цепях основных источников, а только переключает их в соответствии с результатом поиска наилучшего соединения вспомогательных источников. Для этого пятый импульс командного генератора используется для снятия блокировки и включения исполнительного реле основной системы.

Основное затруднение при создании системы с переключением вспомогательных источников состоит в необходимости моделировать сопротивление нагрузки. Сопротивление нагрузки вспомогательных источников R'_n должно в некотором масштабе повторять все изменения сопро-

тивления нагрузки основных источников R_n . Для этого необходимо применить ту или иную следящую систему.

Система с вычислительными устройствами. Можно представить себе систему, у которой вспомогательные источники (модели) заменены вычислительными устройствами. Эти вычислительные устройства, пользуясь информацией, получаемой от различных датчиков, производят вычисление величины напряжения, которое получилось бы при всех указанных выше переключениях основных источников. Таким образом, поиск наилучшего соединения заменяется его вычислением.

Система со статистическим, беспорядочным, отбором требуемой структуры. В такой системе сравнение результатов, даваемых той или иной структурой, производится лишь до тех пор, пока какая-либо из них не даст достаточного результата. После этого поиск структуры прекращается на определенное время или до появления слишком большого отклонения регулируемой величины. Последнее, собственно, и обуславливает наличие обратной связи по отклонению регулируемой величины.

Система с упорядоченным (экстремальным) отбором требуемой структуры. Если число возможных переключений источников (число структур) весьма велико, то процесс опробования *всех* структур и их сравнение может быть недопустимо длительным. Тогда во многих случаях переключения производят не хаотически, а в таком порядке, при котором регулируемый параметр (напряжение) непрерывно возрастает. Дойдя до структуры, при которой достигается максимум отдачи мощности (или заданное значение напряжения), система прекращает опробование и в дальнейшем непрерывно сравнивает между собой только данную структуру с двумя соседними, убеждаясь всякий раз, что данная структура лучше. Только в случае, когда в процессе непрерывного изменения характеристики объекта одна из соседних структур оказывается лучше, система производит переключение на эту структуру. В таком виде система с самоизменением структуры мало отличается как по принципу работы, так и по схеме от систем экстремального регулирования. Отличие состоит лишь в том, что указанная система действует на показатель экстремума путем изменения структуры, а другие системы с само-

улучшением — путем изменения величины уставки, программы, параметров или нелинейностей. Все правила построения экстремальных систем применимы к рассматриваемым системам.

Соответствующим подбором (расположением или нумерацией) сравниваемых структур легко выбрать такой порядок их сравнения, при котором формируется характеристика экстремального типа

$$\varphi = f(\mu),$$

где φ — отклонение выходного напряжения от требуемого значения;

μ — номер сравниваемых структур.

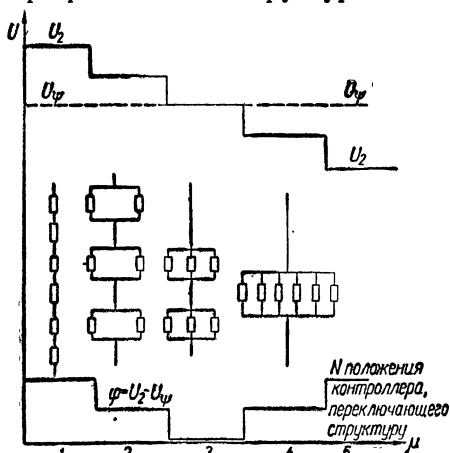


Рис. 70. Переключение структур в порядке, позволяющем получить характеристики, пригодные для стабилизации U_2 и экстремального регулирования φ .

Для примера на рис. 70 показано формирование экстремальной характеристики системы, имеющей шесть источников тока.

Как только образована экстремальная характеристика, становится возможным применение всех четырех вариантов схемы экстремального регулирования.

На рис. 71 дана схема экстремального регулирования структуры шагового типа. Действие подобных систем подробно рассматривалось выше. Как и во всех других схемах экстремального регулирования, принципиально

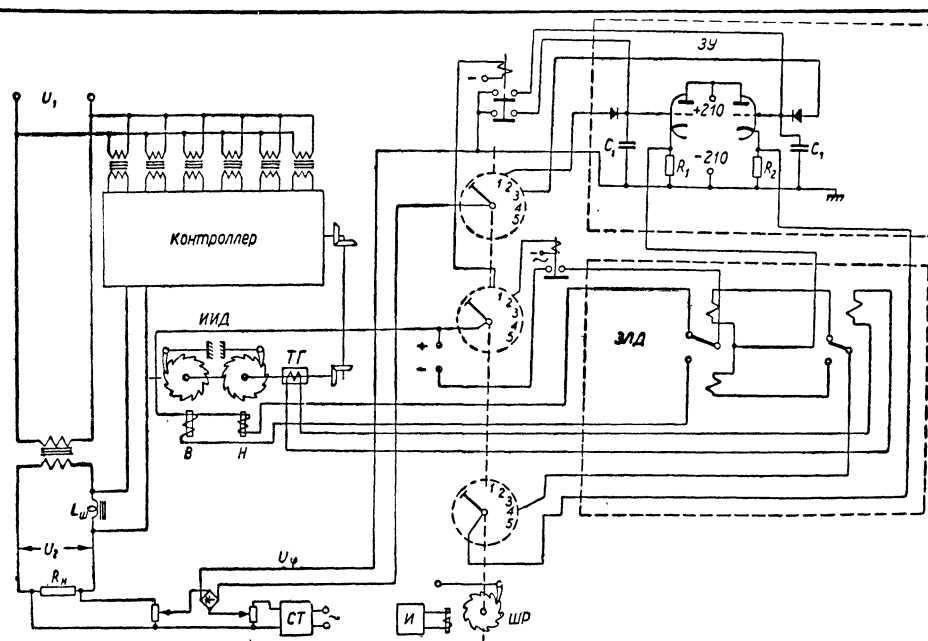


Рис. 71. Стабилизатор с логическим управлением экстремального типа, опробуемый две-три близкие по свойствам структуры: ИИД — импульсный исполнительный двигатель (остальные обозначения те же, что и на предыдущих рисунках).

важно присутствие в схеме того или иного элемента, позволяющего учесть направление движения системы (тахогенератор $TГ$).

Системы с самоулучшающимся отбором требуемой структуры. Самоулучшающиеся системы являются дальнейшим развитием самоорганизующихся систем. Они весьма разнообразны. Главной целью этих систем является повышение быстродействия.

Выше мы говорили, что поиск наилучшей настройки и наилучшей структуры производится сравнением ряда вариантов. В самоулучшающейся системе сравниваются не все возможные варианты, а в первую очередь те, которые *вероятнее* всего дают нужное решение. Таким образом, в самоулучшающейся системе должен быть элемент, ведущий учет включений и определяющий вероятность того, что это включение дает требуемый результат. Вероятность определяется по опыту предыдущей работы как среднее число включений данной структуры в течение некоторого времени (см. раздел «Обучающиеся системы»).

Комбинированные системы с самоизменяющейся структурой

В качестве объекта регулирования рассмотрим электролизный цех для гальванической обработки деталей, оборудованный шестью ваннами. Все ванны в цехе (по условиям задачи) должны быть загружены полностью. Детали, различные по размеру, должны находиться в ваннах в течение одного часа. В каждой из шести ванн можно разместить не более 10 деталей самого крупного размера и до 60 деталей наименьшего размера. Чтобы при изменении размера деталей сохранить производительность цеха на максимальном уровне (экстремальная задача), целесообразно производить переключение потоков обрабатываемых деталей по таким правилам.

1. При поступлении самых крупных деталей последние должны распределяться *параллельно* на шесть потоков, поступать в ванны по 10 шт/час и выдерживаться в каждой из ванн в течение 1 часа. Производительность цеха при этом будет равна 60 деталям в час.

2. При поступлении самых мелких деталей ванны целесообразно соединить *последовательно*, подавая по 60 деталей в ванну и выдерживая в каждой из них детали по 10 мин. Производительность цеха при этом возрастает до

$60 \times 6 = 360$ деталей в час и все ванны оказываются снова загруженными полностью.

При промежуточном размере деталей (для простоты допускаем, что размер деталей изменяется сразу для всей загрузки) нужно соединять ванны по способу *смешанного* соединения. При шести ваннах можно получить только два варианта *смешанного* соединения (см. рис. 70).

Показателем качества (экстремума) φ в данной задаче может быть число полностью загруженных ванн или какой-либо другой показатель их загрузки. Регулирующим воздействием μ является номер структуры (схемы) соединения ванн, а возмущающим воздействием λ системы — размер деталей, поступающих в цех (другие возмущения мы для простоты не рассматриваем).

При переключении движения потоков деталей непосредственно по размеру деталей получим самоизменение структуры по основному возмущению (принцип управления по возмущению). Если мы применим один из указанных выше способов поиска максимального значения показателя качества структуры φ , получим систему с принципом управления по регулируемой величине, т. е. систему с обратной связью с ЭЛД. Одновременное использование двух принципов дает представление о комбинированной системе самоизменения структуры.

Применение комбинированной системы целесообразно только там, где требуется большая точность решения задачи. В данном примере комбинированное регулирование целесообразно при очень большом числе ванн и при учете ряда возмущений их работы.

Можно привести многочисленные примеры задачи полного или лучшего использования оборудования, для решения которой требуется переключение структуры соединения отдельных узлов производственного процесса. Так, например, в химическом производстве (в частности, в цехе конверсий) в ряде случаев потоки того или иного продукта распределяются по ряду параллельных цепей — ниток. Здесь возникает задача оптимального распределения материальных потоков между нитками. Регулятор должен загружать полностью в первую очередь хорошо работающие нитки, а затем — работающие с более низкими показателями. Очевидно, что такая задача проще, чем предыдущая, и также может быть решена с помощью системы регулирования по возмущениям или по показателям ка-

чества, либо, наконец, с помощью комбинированной системы регулирования.

Системы, использующие «принцип прироста». Если среди регулирующих воздействий, изменяемых кибернетическим регулятором для повышения показателя качества, имеются такие, которые приводят к изменению размеров системы или объема ее памяти, то говорят, что система использует «принцип прироста». Этот принцип легко продемонстрировать на системе с самоизменением структуры. В такой системе в процессе приспособления отключаются и присоединяются различные элементы, т. е. происходит процесс убывания или прироста размеров системы.

Весьма наглядную модель системы этого типа разработал английский ученый Гордон Паск [69]. Его система, прежде чем подключить новый элемент, выбирает его из ряда других элементов, находящихся в специальном запасе. При движении системы в другую сторону элемент отключается и снова попадает в запас. Здесь могут быть использованы все указанные способы подбора, начиная от беспорядочного, статистического, и кончая экстремальным, упорядоченным или самоулучшающимся.



Глава VIII

ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ КИБЕРНЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

АНАЛОГИЯ КИБЕРНЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И ВОЗМОЖНОСТЬ СОЗДАНИЯ ДЛЯ НИХ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ

Системы автоматического регулирования докибернетического периода были направлены на решение только трех задач регулирования: а) стабилизации, б) программных систем, в) следящих систем. Системы имели постоянную уставку, программу, параметры, нелинейности, структуру, характеристики и др., которые выбирались и устанавливались человеком при пуске системы в ход.

Кибернетика в применении к автоматике обогатила и расширила круг задач регулирования: появились задачи самоизменения характеристик системы для приспособления ее к изменению условий работы. Как указывалось в начале книги, мы называем кибернетическими все системы автоматического регулирования, предназначенные для решения более сложных задач регулирования, чем классические задачи стабилизации, программного и следящего регулирования.

По типу задачи регулирования кибернетические системы могут быть разделены на системы с самоизменением: 1) уставки, 2) программы, 3) параметров, 4) нелинейностей, 5) структуры, 6) алгоритмов действия (программы), 7) вероятностных характеристик, 8) области действия (самоограничения), 9) формы или кода импульсных воздействий и некоторых других характеристик.

С другой стороны, по типу принципиальной схемы кибернетические системы управления по возмущениям,

разомкнутые системы при $\lambda \neq f(\varphi)$ с одним показателем качества¹ могут быть разделены на системы:

- 1) с одним переключением регулирующего воздействия;
- 2) с несколькими переключениями;
- 3) с плавным изменением регулирующего воздействия.

Системы управления по регулируемой величине с обратной связью по типу принципиальной схемы могут быть разделены на системы:

- 1) с отбором одного режима из многих одновременно существующих;
- 2) с опробованием всех режимов по очереди, последовательно во времени;
- 3) со статистическим, беспорядочным, опробованием режимов, до первого удовлетворительного;
- 4) с упорядоченным отбором (главным образом экстремальным);
- 5) с самоулучшающимся отбором:
 - а) с ускорением поиска в зависимости от удаления системы от экстремума;
 - б) с опробованием в первую очередь наиболее *вероятных* решений и некоторые другие.

Перечисленные системы могут быть применены для решения всех указанных выше кибернетических задач регулирования.

Для наглядности можно составить следующую таблицу классификации кибернетических систем: по горизонтали указать разделение систем по принципу управления и по типу схем, а по вертикали — по задаче регулирования (табл. 7). Оказывается, что *большинство квадратов такой таблицы удается заполнить примерами конкретных схем кибернетических систем*. Эту таблицу сравнения мы не можем рассмотреть полностью, так как пришлось бы указать не менее $9 \times 10 = 90$ примеров схем. Эта работа частично выполнена в предыдущих главах книги.

Таким образом, сравнением принципиальных схем удается показать полную аналогию различных по назначению кибернетических систем.

Многочисленные примеры кибернетических систем автоматического регулирования, рассмотренные выше, убедительно показывают существование аналогии принципи-

¹ Мы ограничиваемся рассмотрением систем с одним показателем качества φ .

Таблица 7

Классификация кибернетических систем автоматического регулирования

По принципу управления и по схеме	По возмущениям			По регулируемой величине									Комбинированные системы
	с одним переключением	со ступенчатой характеристикой	с плавной характеристикой ком- паундирования	с отбором одного из нескольких одновременно существующих значений	с опробованием всех значений последовательно во времени	со статистическим отбором значения до первого удовлетворительного	с упорядоченным экстремальным отбором					с самоулучшающимся отбором	
							по производным $P\dot{\varphi}$ и $P\ddot{\varphi}$	удерживающие максимум	шаговые	с модулирующим сигналом			
Самоизменение уставки	Рис. 18,а	Рис. 18,б	Рис. 18,в	—	Рис. 19	Рис. 20	Рис. 80	Рис. 83	Рис. 22, 23 и 91	Рис. 24 и 89	—	Рис. 25	
Программы	Рис. 30,а	Рис. 30,б	Рис. 30,в	Рис. 32 и 33	—	—	Рис. 34	—	Рис. 34	—	—	Рис. 36	
Параметров	Рис. 49,а	Рис. 49,б	Рис. 48, 49,в и 104	—	—	—	Рис. 50,а	—	Рис. 105	Рис. 50,б	—	—	
Нелинейностей	—	—	Рис. 58 и 59	—	—	—	—	—	Рис. 60	—	—	—	

По принципу управления и по схеме	По возмущениям			По регулируемой величине								Комбинированные системы	
	с одним переключением	со ступенчатой характеристикой	с плавной характеристикой коммутирования	с отбором одного из нескольких одновременно существующих значений	с опробованием всех значений последовательно во времени	со статистическим отбором значения до первого удвоительного	с упорядоченным экстремальным отбором						с самолучшающимся отбором
							по производным P_f и P_r	удерживающие максимум	шаговые	с модулирующим сигналом			
По задаче регулирования													
Алгоритмов	В данной работе не рассматривались												
Импульсных воздействий													
Вероятностных характеристик													
Области самоограничения													
Структуры	Рис. 66,а	Рис. 66,б	Рис. 66,в	Рис. 68	Рис. 69	—	—	—	Рис. 71	—	—	—	

альных схем этих систем. Этого и следовало ожидать, так как все системы автоматического регулирования как кибернетические, так и некибернетические, обычные, основаны на одних и тех же общих принципах управления:

а) принципе управления по возмущениям или б) принципе управления по регулируемой величине (показателю качества). Наиболее совершенными, как мы увидим ниже, являются комбинированные системы, использующие оба принципа управления одновременно.

Заметим, что, как и всякая другая аналогия, данное сходство схем не означает их полное тождество. Бывают отдельные кибернетические системы, не вписывающиеся в табл. 7. Например, известны системы с самоизменением программы действия с контролем программы по отдельным этапам. Такая система осуществлена, в частности, в химической промышленности, где она регулирует температурный режим сложного химического агрегата, полностью заменив человека-оператора.

Для системы самоизменения программы с контролем по этапам до сих пор не удалось подыскать аналога среди схем других кибернетических систем, очевидно, потому, что системы с несколькими показателями качества еще почти не разрабатывались.

Аналогия принципиальных схем дает возможность сделать следующий важный вывод.

Все кибернетические системы автоматического регулирования с одним показателем качества могут иметь *общую теорию*, не исключаящую некоторых особенностей для каждой кибернетической задачи. Основные вопросы этой общей теории мы и рассмотрим в данной главе.

Условимся об ограничениях области исследований кибернетических систем, принятых нами ниже. При выборе ограничений, учитывая большое разнообразие систем, следует выбрать главные из них.

Как мы видели выше, в некоторых кибернетических задачах возможно применение неколебательных обратных связей (поисковых колебаний нет), в других — возможны только колебательные обратные связи с ЭЛД (поисковые колебания обязательны).

Если не учитывать этого небольшого различия, то все кибернетические регуляторы хотя и разнообразны по устройству, но применимы для всех типов объектов кибернетического управления. Например, экстремальный

регулятор, служащий для самоизменения уставки, в принципе с таким же успехом может быть использован для самоизменения программы, варьируемых параметров или нелинейностей, структуры и т. д.

Главное отличие систем состоит не в устройстве регуляторов, а в различии свойств объектов управления. Выше рассматривались объекты четырех типов: 1) с постоянными параметрами, 2) с изменением параметров, 3) с изменением нелинейностей, 4) с переключением структуры.

В системах с самоизменением уставки и программы динамические процессы, вызываемые в объекте регулирования, ничем не отличаются от хорошо изученных процессов, вызываемых изменением уставки (от процессов перенастройки регуляторов). Здесь объект управления обладает постоянными параметрами и часто описывается линейным уравнением.

В отличие от этого в системах с самоизменением параметров динамические процессы вызываются именно плавным изменением его параметров в функции входной величины или в функции времени, а следовательно, такие системы должны изучаться при помощи уравнений с переменными коэффициентами или в некоторых случаях — при помощи нелинейных уравнений.

Если системы с переменными параметрами могут быть иногда линейными, то системы с самоизменением нелинейностей уже требуют специальных нелинейных методов изучения (метод гармонического баланса, фазовые плоскости и др.).

Наконец, системы с переменной структурой можно в большинстве случаев свести к задаче с переменными (в функции входной величины или времени) коэффициентами, изменяемыми, однако, не плавно, а скачками от одного значения к другому (принимаящие в частном случае и нулевые значения).

Итак, различные типы кибернетических задач требуют разработки своего математического аппарата исследования, главным образом, из-за различия способов влияния регулятора на объект регулирования, или, короче говоря, *из-за различия свойств объектов* кибернетического управления.

Но так ли велико значение различий кибернетических систем? Обратимся к опыту современной теории регулирования. Хорошо известны, например, регуляторы напря-

жения, изображенные на рис. 72. Схема (рис. 72,а) имеет измерительный элемент разностного типа, схема (рис. 72,б)— плавно изменяемое угольное сопротивление, а схема

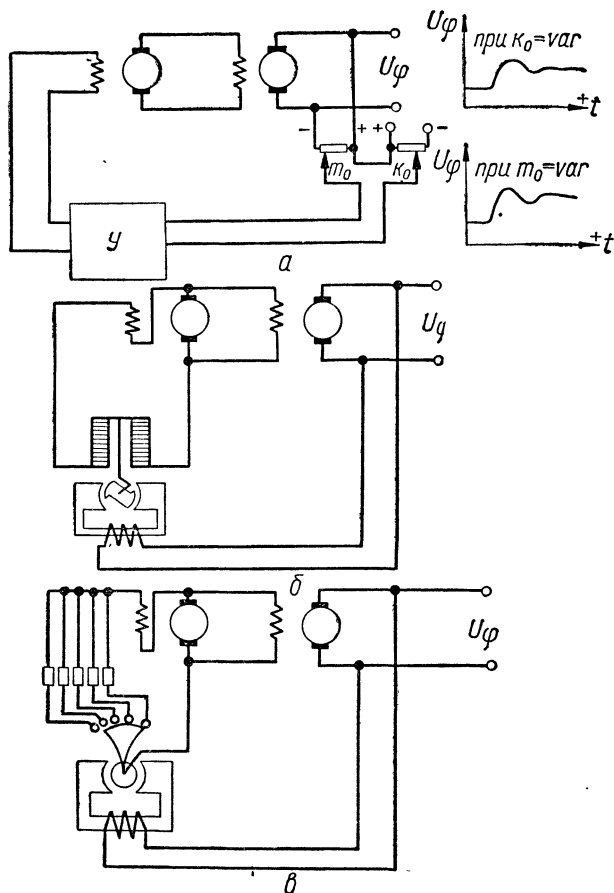


Рис. 72. Системы регулирования напряжения с переменными параметрами, которые успешно изучаются при помощи уравнений с постоянными коэффициентами.

(рис. 72,в) — сопротивление, изменяемое скачками. В то же время осциллограммы переходных процессов показывают, что во всех трех системах, схемы которых изображены на рис. 72, процессы настолько подобны, что невозможно по

осциллограмме определить, на какой из систем она получена. Процессы перенастройки, вызываемые небольшим перемещением движка реостата k_0 , почти не отличаются по форме от процессов, вызываемых небольшим перемещением движка реостата m_0 .

В то же время при изменении сопротивления реостата m_0 изменяется коэффициент усиления системы (объект имеет переменный параметр α_p), а при изменении сопротивления k_0 изменяется так называемая уставка (объект имеет постоянные параметры).

Осциллограммы показывают, что динамические процессы в системах регулирования, вызванные небольшим изменением коэффициента усиления (или других параметров), не отличаются по форме от процессов, вызванных небольшим изменением уставки. Различие в форме процессов наблюдается только при достаточно больших амплитудах изменений. Поэтому описание объектов уравнениями с постоянными коэффициентами можно рассматривать как *первое приближение* для систем с самоизменением характеристик и в то же время как *точный способ описания систем с самоизменением уставки*. Такое положение имеется и в кибернетических системах. Несмотря на то, что объекты этих систем относятся к перечисленным выше четырем различным типам, процессы в них при достаточно малых отклонениях весьма сходны. Например, всегда удается подобрать некоторое изменение уставки, которое эквивалентно заданному изменению параметров (например, коэффициенту усиления).

Ниже мы будем излагать общую теорию кибернетических систем для случая наиболее простого типа объекта — объекта с постоянными параметрами, регулируемого изменением уставки¹.

Движения центра колебаний системы с самоизменением уставки точно описываются линейными уравнениями в обычных производных или конечных разностях с постоянными коэффициентами. Для других систем (например, с переменными параметрами) эти уравнения являются первым приближением тем более точным, чем меньше отклонения центра колебаний от установившегося положения.

¹ Начало изучения специфических свойств оптимальных систем с переменными параметрами положено Бутоном в 1951 г. (см. экспресс-информацию, серия АУ, выпуск 52, № 68—70, 1958) [91].

Условимся еще об одном ограничении: любой упорядоченный поиск имеет значительные преимущества в смысле быстрогодействия перед статистическим, беспорядочным, отбором режима. Наиболее распространенным видом упорядоченного поиска является экстремальный отбор. Так как в большинстве кибернетических систем можно обнаружить или искусственно формировать экстремальную характеристику, то ниже мы ограничимся рассмотрением только вопросов теории экстремальных систем с одним показателем качества и не будем рассматривать вопросы теории систем со статистическими или другими видами отбора.

АСТАТИЧЕСКАЯ И СТАТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМБИНИРОВАННОЙ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Аналогия принципиальных схем различных кибернетических систем автоматического регулирования имеет большое значение, она дает возможность построить общую теорию кибернетических систем с одним показателем качества.

Многие вопросы теории комбинированных кибернетических систем (в первую очередь экстремальных систем) удобно излагать, пользуясь аналогией между этой теорией и теорией комбинированных систем стабилизации. Ниже мы воспользуемся таким приемом изложения.

В теории установившихся режимов систем стабилизации хорошо известны такие понятия, как *требуемая астатическая характеристика* системы, определяемая техническими условиями на систему, и *действительная статическая характеристика*. Требуемой характеристикой в большинстве систем является астатическая характеристика $O_2 O'_2 O''_2$, а действительной — статическая $AA'A''$. Характеристика системы стабилизации в координатах $\Phi - M$ показана на рис. 73.

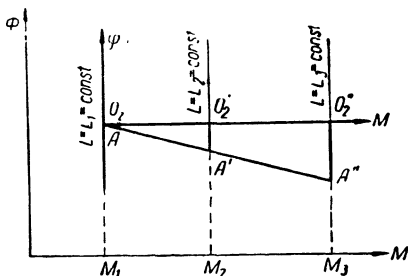


Рис. 73. Характеристики установившихся режимов системы стабилизации:

$O_2 O'_2 O''_2$ — астатическая характеристика, $AA'A''$ — статическая характеристика, точка A — режим без статической ошибки.

В кибернетических экстремальных системах роль требуемой астатической характеристики выполняет геометрическое место экстремумов O_2, O_2', O_2'' , а роль действительной — геометрическое место точек работы или центров колебательной системы A, A', A'' (рис. 74 и 75). Статическая и астатическая характеристики могут быть построены как в координатах $\Phi - M$, так и в координатах $\Phi - L$ или $M - L$ (при $\Sigma_{21} = M$).

Буквами Φ, M и L мы обозначаем абсолютные значения регулируемой величины, регулирующего воздействия и основного возмущения, а через φ, μ и λ — отклонения этих величин от положения в конце переходного процесса.

Установившаяся в данном случае (статическая) ошибка системы определяется разностью ординат точек O_2 и A, O_2' и A', O_2'' и A'' и т. д. Таким образом, на рис. 74,а и 75 показаны примеры, относящиеся к системам с одним режимом без статической ошибки. В нелинейных системах возможны случаи существования систем с двумя, тремя или бесчисленным множеством режимов без статических ошибок.

В последнем случае характеристики $AA'A''$ и $O_2O_2'O_2''$ совпадают.

Основные положения теории установившихся режимов комбинированных систем стабилизации, изложенные в [16], почти без изменений относятся и к комбинированным системам экстремального регулирования. Для большей ясности изложения ниже приведены схемы двух конкретных

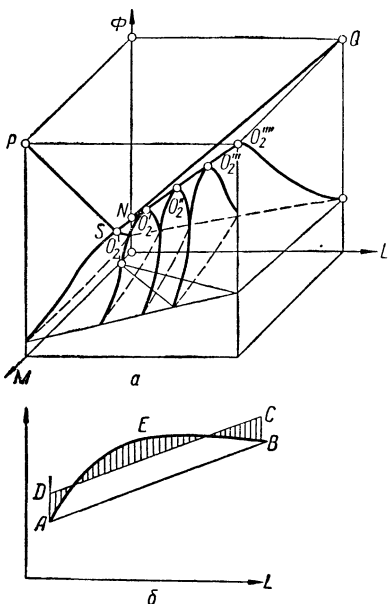


Рис. 74. Характеристики установившихся режимов:

а — экстремальные характеристики и астатическая характеристика $O_2O_2'O_2''$ объекта управления (при $\Sigma_{21} = M$); б — способы усреднения нелинейной характеристики компаундирования [AEB — нелинейная характеристика, DC — усредненная при $L \neq f(\Phi)$, AB — усредненная при $L = f(\Phi)$].

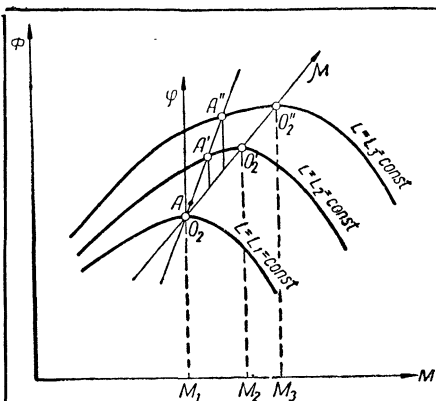


Рис. 75. Характеристика установившихся режимов экстремальной системы (при $\Sigma_1 = M$):

O, O', O'' — аstaticкая характеристика, $AA'A''$ — staticкая характеристика точка A — режим без staticческой ошибки.

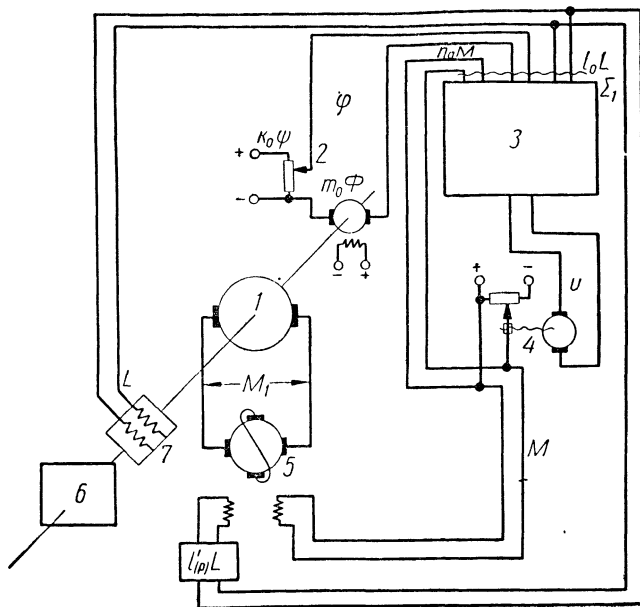


Рис. 76. Комбинированная система стабилизации скорости электродвигателя (аналог экстремальной системы, изображенной на рис. 77):

1 — регулируемый электродвигатель, 2 — измерительный элемент отклонения скорости (показателя экстремума), 3 — усилитель, 4 — сервомотор, 5 — электромашинный усилитель, 6 — нагрузка привода, 7 — измерительная муфта момента нагрузки; Φ — скорость вращения электродвигателя 1, M — уставка скорости вращения, L — момент нагрузки механизма 6.

систем: комбинированной системы стабилизации скорости электродвигателя (рис. 76) и экстремальной системы регулирования температуры топки (рис. 77). Отметим, что аналогия способов исследования систем стабилизации и экстремальных

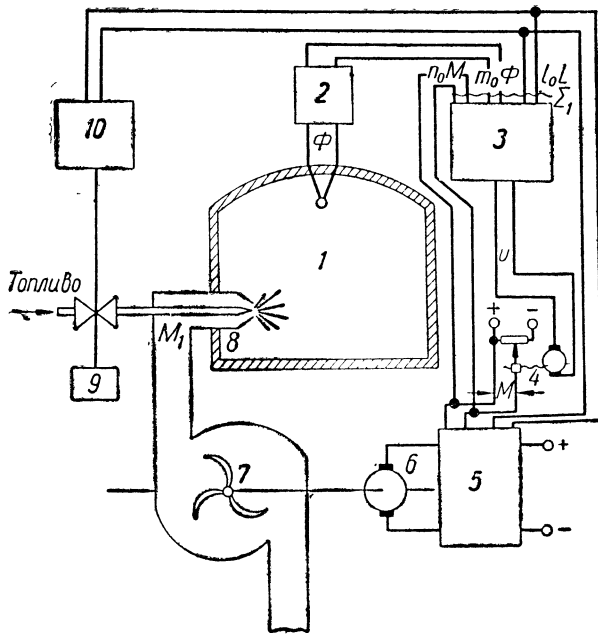


Рис. 77. Комбинированный экстремальный регулятор температуры топки со связью по основному возмущению и с обратной связью с ЭЛД:

1 — регулируемая топка печи или котла, 2 — измерительный элемент температуры (показателя экстремума), 3 — усилитель, 4 — сервомотор экстремального регулятора, 5 и 6 — регулируемый электропривод, 7 — вентилятор, 8 — форсунка, 9 — регулятор, изменяющий подачу топлива (по давлению или по нагрузке), 10 — измерительный элемент количества топлива; Φ — температура топки 1, M — установка скорости вращения вспомогательного электропривода, M_1 — подача топлива.

систем существует только в отношении астатических систем стабилизации, имеющих сервомотор, так как обратные связи экстремальных регуляторов также имеют сервомотор пропорциональной или постоянной скорости. Задачей системы, схема которой изображена на рис. 76, является стабилизация скорости вращения, а задачей системы

на рис. 77 — поддержание температуры топки на максимальном уровне путем подбора количества воздуха, подаваемого в топку.

Изменение подачи топлива производится специальным регулятором 9 в зависимости от нагрузки топки (или по давлению пара в котле).

Составим линеаризованные уравнения статики исследуемых систем, причем пренебрежем поисковыми колебаниями. Под величинами Φ и M будем понимать координаты неподвижного в установившемся состоянии центра поисковых колебаний. Имея в виду качественный характер исследования, аппроксимируем экстремальную характеристику семейством парабол.

Исходные уравнения статики системы стабилизации и экстремальной системы сведены в табл. 8.

Таблица 8

Уравнения статики систем стабилизации и экстремальной системы

Уравнения статики	Для системы стабилизации	Для экстремальной системы
Закон регулирования	$\sum_1 = -m_0\Phi - n_0M + l_0L + k_0\Psi$	$\sum_1 = -m_0\Phi - n_0M + l_0L$
Регулятор пропорциональной скорости сервомотора	$\rho M = \alpha_2 \sum_1 = 0$	$\frac{d \sum_1}{dM} = 0$
Объект регулирования	$\Phi = \alpha_1 \sum_2 - \beta L,$ где $\sum_2 = M + l'_0L$	$\Phi - \Phi_0 = -a \left(\sum_{21} - \sum_{20} \right)^2,$ где $\Phi_0 = b_0 + b_1L,$ $\sum_{21} = M + l'_0L,$ $\sum_{20} = c_0 + \beta L$

Пользуясь этими уравнениями, получаем уравнения статических характеристик системы (табл. 9).

Как известно из аналитической геометрии, линия в трехмерном пространстве описывается любыми двумя из полученных трех уравнений (например $M = f_1(L)$ и $\Phi = f_2(M)$ и др.).

Таблица 9

Уравнения статических характеристик систем стабилизации и экстремальной системы

Статическая характеристика	Система стабилизации	Экстремальная система
В координатах $M - L$	$M = \xi_0 + \xi_1 L, \quad (1)$ <p>где $\xi_0 = \frac{k_0}{\alpha_1 m_0 + n_0} \Psi$;</p> $\xi_1 = \frac{m_0 (\beta - \alpha_1 l'_0) + l_0}{\alpha_1 m_0 + n_0}.$	$M = \xi_0 + \xi_1 L, \quad (1)$ <p>где $\xi_0 = \frac{n_0}{2m_0 a} + c_0$;</p> $\xi_1 = -(l'_0 - \beta) = \beta - l'_0$
В координатах $\Phi - M$	$\Phi = \sigma_0 + \sigma_1 M, \quad (2)$ <p>где</p> $\sigma_0 = \frac{k_0 (\beta - \alpha_1 l'_0)}{m_0 (\beta - \alpha_1 l'_0) - l_0} \Psi;$ $\sigma_1 = \frac{n_0 (\beta - \alpha_1 l'_0) - \alpha_1 l_0}{m_0 (\beta - \alpha_1 l'_0) - l_0}$	$\Phi = \sigma_0 + \sigma_1 M, \quad (2)$ $b_0 \xi_1^2 - b_1 \xi_1 \xi_0 -$ $-a [c_0 \xi_1 + \xi_0 (l'_0 - \beta)]^2;$ <p>где $\sigma_0 = \frac{-a [c_0 \xi_1 + \xi_0 (l'_0 - \beta)]^2}{\xi_1^2}$;</p> $\sigma_1 = \frac{b_1 \xi_1 + 2a (\xi_1 + l'_0 - \beta) [c_0 \xi_1 + \xi_0 (l_0 - \beta)]}{\xi_1^2}$
В координатах $\Phi - L$	$\Phi = \gamma_0 + \gamma_1 L, \quad (3)$ <p>где $\gamma_0 = \frac{\alpha_1 k_0}{\sigma_1 m_0 + n_0} \Psi$;</p> $\gamma_1 = \frac{n_0 (\beta - \alpha_1 l'_0) - \alpha_1 l_0}{\alpha_1 m_0 + n_0}$	$\Phi = \gamma_0 + \gamma_1 L, \quad (3)$ <p>где $\gamma_0 = b_0 - a (\xi_0 - c_0)^2$;</p> $\gamma_1 = b_1 - 2a (\xi_1 + l'_0 - \beta) \cdot (\xi_0 - c_0)$

Изменение коэффициентов измерительной связи n_0 и непосредственной компаундирующей связи¹ l'_0 , а также смещения c_0 является средством в значительной степени произвольного изменения месторасположения и наклона статической характеристики системы $AA'A''$ относительно астатической $O_2 O_2' O_2''$ (не зависящей от нас и задаваемой свойствами объекта либо формируемой искусственным

¹ Измерительные связи действуют на вход усилителя регулятора, а непосредственные компаундирующие—на объект регулирования. В системах с сервомотором эти связи нужно различать (см. рис. 76 и 77).

путем). Измерительная компаундирующая связь l_0 в экстремальных системах малоэффективна, но в системах стабилизации действует сильно.

Рассмотрение полученных выражений позволяет сделать следующие выводы.

1. Для того чтобы статическая характеристика системы стабилизации была горизонтальна и во всех точках совпадала с астатической, достаточно выполнить условие $n_0 = 0$ и $l_0 = 0$. При этом коэффициенты статизма $\sigma_1 = 0$ и $\gamma_1 = 0$. В экстремальных системах статическая и астатическая характеристики $AA'A''$ и $O_2O_2'O_2''$ совпадают и $\frac{d\Sigma_1}{dM} = \frac{d\Phi}{dM} = 0$, если $n_0 = 0$, $l_0 = 0$, $b_1 = 0$ и $c_0 = 0$.

В этих условиях статическая ошибка систем с сервомотором Δ_1 тождественно равна нулю, а степень точности системы s [16] — бесконечности.

2. Принципиально другим способом изменения положения статической характеристики есть использование измерительной и непосредственной компаундирующих связей l'_0 и l_0 . Здесь удастся устранить статическую ошибку Δ_1 только в ряде «режимов без ошибки» [16], где $l'_0 = \beta$ (или для обычных систем $l'_0 = \frac{\beta}{a_1}$) при $l_0 = 0$ и $b_1 = 0$. Для того чтобы получить $\Delta_1 = 0$ во всех точках характеристики, требуется, в общем случае, нелинейная связь $l'_0(L)$.

Первый способ связан с изменением знаменателя выражения для коэффициента статизма, а второй — с изменением числителя этой дроби.

Эти правила являются общими как для комбинированных систем стабилизации, так и для комбинированных экстремальных систем с сервомоторами.

На практике не всегда требуется, чтобы статическая ошибка системы была равна нулю $\Delta_1 = 0$, т. е. чтобы характеристика $AA'A''$ совпадала с характеристикой $O_2O_2'O_2''$. Часто ставятся требования работы системы вблизи экстремума, но не на самом экстремуме. Например, известно применение экстремального регулирования двигателей внутреннего сгорания для различного рода кораблей на минимум удельного расхода топлива на единицу пути. При этом практически желательно отклониться от экстремума в сторону повышения скоростей движения.

Таким образом, пользуясь теорией комбинированных систем, мы нашли способы удовлетворения практических требований к статической ошибке.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПАУНДИРОВАНИЯ В СИСТЕМЕ С ОДНИМ ОСНОВНЫМ ВОЗМУЩАЮЩИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

В предыдущем разделе мы исходили из того, что непосредственная компаундирующая связь (слагаемое $l'_0 L$) линейна и показали, что эта связь сильно влияет на положение действительной статической характеристики $A A' A''$. Однако только при помощи специально подобранной нелинейной компаундирующей связи можно добиться того, чтобы действительная характеристика $A A' A''$ совпадала с требуемой характеристикой $O_2 O'_2 O''_2$ во всех точках, *даже при отсутствии обратной связи* ($m_0 = 0$). Такую нелинейную компаундирующую связь мы условились называть *оптимальной характеристикой компаундирования*.

Если характеристики системы заданы в виде графиков, то определение оптимальной характеристики компаундирования как линии $M = f(L)$ или поверхности $M = f(L_1, L_2)$, отвечающей астатической характеристике $O_2 O'_2 O''_2$, не вызывает затруднений.

Аналитический метод определения оптимальной характеристики компаундирования в координатах Φ_1, Σ_{21}, L и ее осуществление в системах с одним основным возмущающим воздействием L также прост. Он состоит в следующем.

Допустим, задано уравнение объекта регулирования. Ограничимся требованием, чтобы характеристика объекта была аналитической функцией и имела один экстремум:

$$\Phi = f(\Sigma_{21}, L), \text{ например, } \Phi - \Phi_0 = -a(\Sigma_{21} - \Sigma_{20})^2,$$

$$\text{где } \Phi_0 = b_0 + b_1 L;$$

$$\Sigma_{21} = M + l'(L);$$

$$\Sigma_{20} = c_0 + \beta L.$$

Должно быть известно уравнение астатической характеристики $O_2 O'_2 O''_2$. Оно может быть получено из уравнения $\frac{d\Phi}{d\Sigma} = 0$ при $L = \text{const}$ [мы полагаем здесь, что $M = 0$ и $\Sigma_{21} = l'(L)$]. Астатическая характеристика в

данном случае является линией, которую определяют любые два из следующих трех уравнений проекций:

$$\begin{aligned}\Sigma_{21} &= f_1(L); \\ \Phi &= f_2(\Sigma_{21}); \\ \Phi &= f_3(L).\end{aligned}$$

Например, для параболической экстремальной характеристики получим

$$\Sigma_{21} = 2(c_0 + \beta L).$$

Уравнения проекций совместны. Исключая величину Φ из уравнений $\Phi = f_2(\Sigma_{21})$ и $\Phi = f_3(L)$, находим, что искомая нелинейная оптимальная характеристика компаундирования отвечает проекции $\Sigma_{21} = f_1(L)$.

Если оптимальные характеристики компаундирования выполняются для всех возмущений, то статическая ошибка равна нулю ($\Delta_1 = 0$). Поэтому уравнение оптимальной характеристики компаундирования можно считать аналогом условия инвариантности установившегося режима системы стабилизации [16].

В общей постановке задача выбора нелинейности связей по возмущениям может показаться сложной, но при переходе к конкретным случаям ее решение не вызывает затруднений. Покажем это, взяв для примера характеристики, изображенные на рис. 74,а. Уравнение проекции NQ астатической характеристики $O_2 O_2' O_2''$ на плоскость ΦL будет определяться выражением

$$\Phi = \Phi_0' + k''L,$$

а уравнение проекции SP характеристики $O_2 O_2' O_2''$ на плоскость ΦM — выражением

$$\Phi = \Phi_0' + k'\Sigma_{21}.$$

Исключая из полученных выражений Φ , находим оптимальную характеристику компаундирования

$$\Sigma_{21} = \frac{\Phi_0'' - \Phi_0'}{k'} + \frac{k''}{k'}L.$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПАУНДИРОВАНИЯ В СИСТЕМЕ С НЕСКОЛЬКИМИ ОСНОВНЫМИ ВОЗМУЩАЮЩИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ

Применим изложенный выше метод к определению оптимальной характеристики компаундирования в координатах Φ , Σ_{21} , L_1 , L_2 в случае наличия двух основных возмущающих воздействий L_1 и L_2 (в примере, приведенном на рис. 43, $L_1 = A$ и $L_2 = k$).

Характеристика объекта в этом случае будет

$$\Phi = f(\Sigma_{21}, L_1, L_2).$$

Уравнение $\frac{d\Phi}{d\Sigma_{21}} = 0$ даёт астатическую характеристику. Последняя в данном случае является не кривой, а поверхностью, которую определяют проекции:

$$\Phi = f_1(\Sigma_{21}, L_1);$$

$$\Phi = f_2(\Sigma_{21}, L_2).$$

Исключив из полученных уравнений Φ , получим искомую зависимость

$$\Sigma_{21} = f_4(L_1, L_2).$$

Распространение метода на системы с большим числом основных возмущающих воздействий не вызывает особых затруднений. Так, например, в системе с тремя возмущениями L_1 , L_2 и L_3 получим характеристику вида

$$\Sigma_4 = f_4(L_1, L_2, L_3).$$

Здесь астатическая характеристика является пространством с тремя измерениями и т. д.

СУММИРОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ НЕСКОЛЬКИХ КОМПАУНДИРУЮЩИХ СВЯЗЕЙ

Осуществление нелинейной компаундирующей связи $\Sigma_{21} = f_1(L)$ при наличии в системе лишь одного основного (поддающегося измерению) возмущения обычно несложно.

При наличии двух основных возмущающих воздействий требуется осуществление нелинейной зависимости $\Sigma_{21} = f_4(L_1, L_2)$, что также в ряде случаев практически осуществимо. Так, например, в экстремальном регуляторе угла поворота μ лопастей гидротурбины, разработанном

В. А. Богомоловым и В. А. Бениным [5], [6] и [9], для поддержания к. п. д. турбины φ на максимальном уровне учитывается как напор воды L_1 , так и изменение нагрузки турбины L_2 . Связь $\Sigma_{21} = f(L_1, L_2)$ осуществляется при помощи коноида (клинкомбинатора).

Уже при наличии двух основных возмущений, а тем более при большем их числе на практике возникает задача замены сложного устройства

$$\Sigma_{21} = f(L_1, L_2, L_3, \dots, L_n)$$

более простым рядом отдельных компаундирующих связей

$$\Sigma_{21} = f_1(L_1) + f_2(L_2) + f_3(L_3) + \dots + f_n(L_n).$$

Такую упрощающую замену можно произвести в следующих случаях:

а) если возмущения действуют на систему не одновременно, а по очереди;

б) если проекции астатической характеристики являются прямыми линиями.

Допустим, например, что в системе с двумя основными возмущениями мы получили следующие линейные проекции астатической характеристики на координатные плоскости:

$$\Phi = k'_0 + k'_1 M + k'_2 L_1;$$

$$\Phi = k''_0 + k''_1 M + k''_2 L_2.$$

Исключая из них Φ , находим линейную оптимальную характеристику, которую можно осуществить при помощи постоянного смещения и двух отдельных линейных компаундирующих связей *по каждому возмущению в отдельности*

$$\begin{aligned} M &= \left(\frac{k'_0 - k''_0}{k'_1 - k''_1} \right) - \left(\frac{k'_2}{k'_1 - k''_1} \right) L_1 + \left(\frac{k''_2}{k'_1 - k''_1} \right) L_2 = \\ &= l_0 + l'_0 L_1 + l''_0 L_2. \end{aligned}$$

Линейные связи могут быть применены и при нелинейных проекциях, однако при этом уход системы от астатической характеристики (при отсутствии обратной связи с ЭЛД) неизбежен.

Как выбрать коэффициенты линейных компаундирующих связей в этом случае?

При расчете линейных связей указанные выше проекции астатической характеристики (или характеристики компаундирования) заменяются средними простыми линиями. Чем меньше отклоняются усредняющие прямые от проекции, тем меньше уход системы от астатической характеристики.

Прежде чем применять усреднение, нужно внимательно изучить возможности органического спрямления нелинейных характеристик системы при помощи нелинейных преобразователей со специально подобранной характеристикой, включаемых последовательно с измерительными элементами.

Вопрос о способах усреднения нелинейных компаундирующих связей достаточно изучен в теории комбинированных систем [16]. Напомним основные выводы этой теории по этому вопросу.

Если объект таков, что данное основное возмущение не зависит от небольших изменений регулируемой величины $L \neq f(\Phi)$, то связь по возмущению является разомкнутой, не влияет на устойчивость и не может быть причиной возникновения автоколебаний. В этом случае среднюю линейную характеристику можно провести так, чтобы суммарная площадь, ограниченная линейной и нелинейной характеристиками, равнялась нулю (см. рис. 74,б)

$$S = \int_0^{\infty} (M_{нл} - M_{л}) dL = 0.$$

В противном случае, если связь через объект существует $L = f(\varphi)$, то компаундирующая связь по данному возмущению является замкнутой и может быть причиной неустойчивости. При этом перекомпенсация, хотя бы в некоторых режимах, опасна, так как может привести к потере устойчивости системы. В этом случае усредненную линейную характеристику следует выбрать так, чтобы она во всех своих точках лежала ниже реальной нелинейной характеристики (см. рис. 74,б).

$$M_{нл} > M_{л} \text{ при } 0 < L < L_{\text{макс.}}$$

Ошибка системы при таком способе усреднения немного увеличивается по сравнению с предыдущим способом, потому что во всех режимах в системе будет только недокомпенсация.

Заметим, что в рассмотренном выше примере регулирования угла поворота лопастей гидротурбины связь между L_1 и Φ [$L_1 = f(\Phi)$] через объект существует только тогда, когда площадь водохранилища мала и небольшие колебания скорости турбины заметно влияют на напор воды. В. А. Богомолов [5] и [6] утверждает, что такая связь имеет существенное значение и может привести к автоколебаниям.

Обратим внимание на то, что в нелинейных системах при одновременном действии ряда возмущений рационально применять линейные усредненные связи по возмущениям вместо более сложных нелинейных.

СОСТАВЛЯЮЩИЕ ОШИБКИ СИСТЕМ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

В литературе неоднократно высказывалось мнение о том, что методы исследования экстремальных систем должны быть в корне отличными от методов исследования, применяемых для обычных систем регулирования. Это мнение является неверным. Для тех и других систем можно применить одни и те же методы изучения статики и динамики, включая условия инвариантности и правила компромиссной настройки или настройки по статистическим методам.

Известная методика исследования точности следящих систем обычного типа с постоянными характеристиками использует условное разделение ошибки системы на составляющие. Эта методика вполне применима и к экстремальным системам, где также можно указать основные составляющие ошибки: 1) статическая ошибка Δ_1 ; 2) переходная ошибка Δ_2 ; 3) ошибка от поисковых колебаний Δ_3 ; 4) ошибка следования Δ_4 и др. Необходимость компромиссной настройки экстремальной системы связана с противоречием между способами уменьшения переходной ошибки и ошибки следования. Приходится сознательно идти на некоторое увеличение ошибки следования Δ_4 для снижения переходной ошибки Δ_2 .

Для систем экстремального регулирования можно (на том же основании и для той же цели, что и для систем стабилизации) принять гипотезу о мгновенном изменении одного из основных возмущающих воздействий на постоянную величину $\lambda = [1]$. При этом динамический процесс в системе носит переходный характер. Система из одной точки статической характеристики $A A'A''$ переходит в другую

ее точку. Напомним, что для систем с колебательной обратной связью характеристика $AA'A$ является геометрическим местом центров поисковых колебаний и речь, следовательно, идет о *движении центра колебаний*.

Полная ошибка системы равна расстоянию (в пространстве $\Phi, M, L_1, L_2, \dots, L_n$) от характеристической точки, отвечающей состоянию системы в данный момент, до вершины экстремальной характеристики системы $\Phi = f(M)$, определяемой значениями L_1, L_2, \dots, L_n в конце переходного процесса. При гипотезе толчка возмущения ошибка системы имеет три составляющих соответственно уравнению

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3,$$

где Δ_1 — установившаяся статическая ошибка, вызываемая тем, что действительная характеристика $AA'A$ может не совпадать с астатической характеристикой $O_2O'_2O''_2$, $\Delta_1 = 0$, если в системе нет жестких связей ($n_0 = 0, l'_0 = 0, l_0 = 0$), в том числе и связей по возмущениям; $\Delta_1 = 0$ также и в том случае, когда компаундирующие связи осуществлены по всем возмущениям в соответствии с оптимальными характеристиками компаундирования;

Δ_2 — переходная ошибка, возникающая при толчке возмущения, в результате перехода системы из одной точки характеристики $AA'A$ к другой ее точке. Ошибка Δ_2 существует только в переходных режимах. В установившемся режиме (при $L = \text{const}$) $\Delta_2 = 0$. Если $\Delta_2 = 0$ и в переходном режиме, то это означает, что центр колебаний системы всегда находится на астатической характеристике $O_2O'_2O''_2$;

Δ_3 — установившаяся ошибка от поисковых колебаний («потеря на колебания»). Эта составляющая ошибки системы возникает благодаря наличию колебаний в контуре обратной связи. Она объясняется тем, что среднее значение показателя экстремума при наличии колебаний всегда меньше максимального. В системе без колебательной обратной связи $\Delta_3 = 0$.

Если бы мы приняли не гипотезу скачка, а какую-либо другую гипотезу о законе изменения возмущения, то изменились бы и составляющие ошибки. Так, например, при непрерывном линейном изменении возмущения $L = kt$ при $t > 0$ легко определить еще и аналог ошибки следо-

вания следящих систем Δ_4 . Эта ошибка представляет собой смещение центра колебаний системы, измеряемое от точки, где он находится при длительном отсутствии изменений возмущений, т. е. в конце переходных процессов. Ошибка следования пропорциональна скорости изменения возмущения и зависит от структуры и параметров системы. Связь по производной от возмущения позволяет произвольно изменять величину Δ_4 и, в частности, сделать ее равной нулю.

При допущении непрерывного изменения возмущения по неопределенному закону можно говорить и об аналоге так называемой *динамической ошибки экстремальных систем*, равной разности между положением экстремума и положением центра колебаний системы в условиях непрерывного изменения возмущений и т. д.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ КОМБИНИРОВАННЫХ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Существует большое сходство (аналогия) теории установившихся режимов комбинированных систем стабилизации и комбинированных экстремальных систем.

Действительно, как показано выше, средства устранения или произвольного изменения статической ошибки систем, способы перехода от астатического регулирования к статическому в тех и других системах весьма сходны. Сходны также и способы усреднения характеристик, как и оценка влияния компаундирующих связей на устойчивость.

Напомним кратко некоторые другие положения теории комбинированных систем, изложенные в работе [16].

Энергетические преимущества комбинированных систем в установившихся режимах

Выходная мощность обратной связи (корректора) в комбинированной системе при одних и тех же возмущениях может быть взята приблизительно в пять раз меньше, чем в системе без компаундирующих связей по возмущению. Исследование [16] показывает, что чем больше требования к жесткости и точности, тем больше преимущества комбинированных систем с точки зрения уменьшения мощности, стоимости и габаритов корректора. Для систем с малой жесткостью и точностью применять комбинированное управление не выгодно.

Если непосредственные компаундирующие связи выполнены нелинейными в соответствии с указанными выше оптимальными характеристиками компаундирования, то в установившемся статическом режиме на долю обратной связи остается устранение ошибок, вызываемых второстепенными возмущениями, по которым нет компаундирующих связей. Это приводит к уменьшению мощности контура обратной связи и к повышению быстродействия и точности комбинированных систем, имеющих как компаундирующие, так и обратные связи.

Чем ближе лежат статическая и астатическая характеристики системы без обратной связи, тем меньше требуется мощность от контура обратной связи для того, чтобы обеспечить полное совпадение этих характеристик. Мощность выходного элемента контура обратной связи при наличии компаундирующей связи по данному возмущению L_1 расходуется как на покрытие перемещений, вызываемых другими возмущениями и помехами, так и неточностями выполнения связей по этому возмущению.

Уменьшение мощности контура обратной связи и повышение быстродействия системы являются основными преимуществами комбинированных систем экстремального регулирования.

Увеличение быстродействия объясняется в первую очередь тем, что комбинированная система никогда не имеет большой ошибки, т. е. начальные отклонения малы, и для компенсации этих отклонений достаточно сделать лишь одно-два включения сервомотора. Компаундирующие разомкнутые связи, как известно, обладают исключительно высоким быстродействием по сравнению с обратными связями. Только в случае, когда в системе по техническим условиям можно допустить значительную ошибку (такой, например, случай может быть, когда объект имеет не острую экстремальную характеристику), можно ограничиться одними связями по возмущениям, без обратной связи с ЭЛД.

Преимуществом систем по возмущениям является их простота. В частности, в отличие от комбинированных систем в них нет необходимости применять измерительный элемент регулируемой величины (показателя качества) Φ . Однако необходимо измерять возмущения L_1, L_2, \dots, L_n .

Возможно применение колебательных экстремальных систем (с обратной связью) и без компаундирующих связей

по возмущениям. Быстродействие при этом падает и нужно увеличивать мощность выходного элемента и сервомотора. Кроме того, необходимо измерять показатель экстремума.

Кибернетические преимущества комбинированных систем в установившихся режимах

В комбинированных системах стабилизации облегчается настройка и расширяются ее пределы. Действительная статическая характеристика системы $AA'A''$ отличается от астатической $O'_2 O''_2 O'''_2$. Возможна работа системы с отрицательным статизмом (что требуется для компенсации падения напряжения или давления в линии), а также работа с большим статизмом при большой жесткости (что необходимо при параллельной работе объектов).

Так как экстремальные системы имеют сервомотор, то ближайшим их аналогом являются системы стабилизации, также снабженные сервомотором. Роль астатической характеристики в экстремальных системах выполняет геометрическое место экстремумов $O'_2 O''_2 O'''_2$, а роль действительной характеристики — геометрическое место точек работы или центров поисковых колебаний системы $AA'A''$ на плоскости Φ и M .

Число режимов без установившейся ошибки (равное числу точек пересечения характеристик $AA'A''$ и $O'_2 O''_2 O'''_2$) зависит от числа жестких связей в системе. Располагая, например, двумя линейными связями n_0 и l'_0 , можно получить не менее двух режимов без установившейся ошибки (две точки совпадения характеристик).

Возмущения, действующие на систему, обычно удобно разделить на основные, резко влияющие на регулируемую величину, и второстепенные (помехи).

Полное совпадение характеристик $AA'A''$ и $O'_2 O''_2 O'''_2$ (если оно требуется) мы можем получить при помощи нелинейных компаундирующих связей по всем (основным и второстепенным) возмущениям, действующим на систему. Нелинейности компаундирующих связей должны быть выбраны в соответствии с оптимальными характеристиками компаундирования.

Если компаундирующие связи осуществлены не по всем возмущениям или когда некоторые из них выполнены неточно (например, нелинейные связи заменены линейными), то система может отойти от экстремальной астатической

характеристики и, следовательно, появится статическая ошибка ($\Delta_1 \neq 0$), что часто недопустимо. Чтобы этого не случилось, к системе компаундирующих связей следует добавить еще обратную связь с ЭЛД по показателю экстремума φ (корректор или собственно поисковый экстремальный регулятор). Так мы приходим к идее комбинированной экстремальной системы, в которой принцип управления по возмущению сочетается с принципом управления по регулируемой величине.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ КОМБИНИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Экстремальные системы с обратной связью подобны системам стабилизации при наличии интегрального управления (т. е. системам с сервомотором). При отсутствии жестких связей ($n = 0$, $l'_0 = 0$, $l_0 = 0$) они астатичны: $\Delta_1 = 0$ и характеристики $A A' A''$ и $O_2 O'_2 O''_2$ в них совпадают.

Показателем точности установившегося режима комбинированных астатических систем (т. е. систем с сервомотором) в отношении основного возмущения является ошибка следования Δ_4 или добротность системы (отношение скорости изменения возмущения к ошибке следования). Ошибка следования, вызываемая основным возмущением, может быть произвольно изменена при помощи связи по производной от этого воздействия. Для уменьшения ошибки следования, вызываемой второстепенными возмущениями, по которым нет компаундирующих связей, приходится настраивать систему по правилу так называемой компромиссной настройки.

Методика расчета параметров комбинированных систем экстремального регулирования существенно не отличается от методики расчета параметров комбинированных систем стабилизации с астатизмом 1-го порядка (т. е. с сервомотором). Она состоит в том, что уравнения равномерного движения системы пишут столько раз, сколько имеется отдельных слагаемых в выражении для добротности системы. В полученной таким образом системе уравнений коэффициенты связей являются искомыми неизвестными. Переменным же величинам задают постоянные значения, отвечающие требуемым предельным режимам работы системы, в которых добротность равна заданной величине. Число таких задан-

ных режимов должно быть равно числу уравнений. Тогда коэффициенты уравнений определяются однозначно [16] и [24].

Рассмотрим примеры расчета параметров комбинированных систем.

Пример 1. Составим линеаризованные уравнения динамики системы стабилизации скорости вращения двигателя, изображенной на рис. 76:

закон регулирования

$$\Sigma_1 = -m_0 \Phi - n_0 M + l_0 L + k_0 \Psi;$$

усилитель

$$U = \alpha_1 \Sigma_1;$$

сервомотор

$$\rho M = \alpha_2 U;$$

амплидин

$$(\tau_1 \rho + 1)(\tau_2 \rho + 1) M_1 = \alpha_3 M - (l'_0 + l'_1 \rho) L;$$

двигатель

$$(\tau_3 \rho + 1) \Phi = \alpha_4 M_1 - \beta_0 L,$$

где Φ — число оборотов двигателя, об/мин;

L — нагрузка, кгм;

Ψ — задание, в;

M — регулирующее воздействие, в;

M_1 — напряжение двигателя, в.

Исключая промежуточные переменные, находим уравнение динамики всей системы в целом

$$\begin{aligned} & \{\tau_1 \tau_2 \tau_3 \rho^4 + (\tau_1 \tau_2 + \tau_2 \tau_3 + \tau_1 \tau_3 + \alpha_1 \alpha_2 n_0 \tau_1 \tau_2 \tau_3) \rho^3 + [\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \\ & + \alpha_1 \alpha_2 n_0 (\tau_1 \tau_2 + \tau_1 \tau_3 + \tau_2 \tau_3)] \rho^2 + [1 + \alpha_1 \alpha_2 n_0 (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3)] \rho + \\ & + \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 m_0 + \alpha_1 \alpha_2 n_0\} \Phi = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 k_0 \Psi - \{\beta_0 \tau_1 \tau_2 \rho^3 + (\beta_0 \tau_1 + \beta_0 \tau_2 + \\ & + \alpha_4 l'_1 + \beta_0 \tau_1 \tau_2) \rho^2 + [\beta_0 + \alpha_4 l'_0 + \alpha_1 \alpha_2 \alpha_4 n_0 l'_1 + \beta_0 \alpha_1 \alpha_2 n_0 (\tau_1 + \tau_2)] \rho + \\ & + \alpha_1 \alpha_2 \alpha_4 n_0 l'_0 + \alpha_1 \alpha_2 n_0 \beta_0 - \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 l'_0\} L. \end{aligned}$$

Полагая

$$(\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 m_0 + \alpha_1 \alpha_2 n_0) \Phi = (\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 m_0 + \alpha_1 \alpha_2 n_0) \varphi + \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 k_0 \Psi$$

и подставив Φ , найденное из этого выражения, в уравнение динамики, получим уравнение следующего вида:

$$(\rho^4 + a_3 \rho^3 + a_2 \rho^2 + a_1 \rho + a_0) \varphi = - (b_3 \rho^3 + b_2 \rho^2 + b_1 \rho + b_0) L.$$

Для определения ошибки следования примем гипотезу равномерного изменения возмущения

$$L = \omega_1 t;$$

производная по времени от возмущения

$$\rho L = \omega_1.$$

Установившееся движение системы ищем в виде:

$$\varphi = g t - \Delta_4; \quad \rho \varphi = g.$$

Подставив это выражение в уравнение динамики системы, находим

$$a_1 g + a_0 (g t - \Delta_4) = b_1 \omega_1 + b_0 \omega_1 t.$$

Приравнявая члены, содержащие время, получим

$$a_0 g t = b_0 \omega_1 t \text{ или } g = \frac{b_0}{a_0} \cdot \omega_1.$$

Остальные члены составляют уравнение

$$a_1 g - a_0 \Delta_4 = b_1 \omega_1,$$

откуда установившаяся ошибка следования Δ_4 и добротность системы по скорости g_v соответственно равны:

$$\Delta_4 = \frac{a_1 \cdot \frac{b_0}{a_0} - b_1}{a_0} \cdot \omega_1,$$

$$g_v = \frac{\omega_1}{\Delta_4} = \frac{a_0}{a_1 \cdot \frac{b_0}{a_0} - b_1},$$

где

$$a_0 = \frac{\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 m_0 + \alpha_1 \alpha_2 n_0}{\tau_1 \tau_2 \tau_3} \left[\frac{1}{\text{сек}^4} \right];$$

$$a_1 = \frac{1 + \alpha_1 \alpha_2 n_0 (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3)}{\tau_1 \tau_2 \tau_3} \left[\frac{1}{\text{сек}^3} \right];$$

$$b_0 = \frac{\alpha_1 \alpha_2 n_0 \alpha_4 l'_0 + \alpha_1 \alpha_2 n_0 \beta_0 - \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 l_0}{\tau_1 \tau_2 \tau_3} \left[\frac{\text{об/мин}}{\text{кгм} \cdot \text{сек}^4} \right];$$

$$b_1 = \frac{\beta_0 + \alpha_4 l'_0 + \alpha_1 \alpha_2 \alpha_4 n_0 l'_1 + \beta_0 \alpha_1 \alpha_2 n_0 (\tau_1 + \tau_2)}{\tau_1 \tau_2 \tau_3} \left[\frac{\text{об/мин}}{\text{кгм} \cdot \text{сек}^3} \right].$$

До сих пор мы пользовались линеаризованными уравнениями. Известно, что численные значения коэффициентов уравнения динамики системы зависят от выбора точек линеаризации.

Для дальнейшего хода расчета должны быть известны численные значения некоторых коэффициентов в так называемых *предельных режимах* работы системы (применяемых в качестве точек линеаризации). Допустим, задано, что в режиме наибольшей скорости, где $\Phi = \Phi_{\text{макс}}$:

$$\tau_1 + \tau_2 = 1 \text{ сек.}; \quad \tau_3 = 2 \text{ сек.}; \quad \alpha_1 = 100; \quad \frac{n_0}{m_0} = 50 \left[\frac{\text{об/мин}}{\text{г}} \right]; \quad l_0 = 0;$$

$$n_0 = 5; \quad \beta_0 = 20 \left[\frac{\text{об/мин}}{\text{кгм}^2} \right].$$

Для $L = 0$:

$$\alpha_1 \alpha_2 = 0,03 \cdot \frac{n_0}{m_0} \left[\frac{1}{\text{сек}} \right];$$

$$\alpha_3 = 10;$$

$$\alpha_4 = 3,33 \left[\frac{\text{об/мин}}{\text{г}} \right].$$

Для $L = L_{\text{макс}}$:

$$\alpha_1 \alpha_2 = 0,03 \frac{n_0}{m_0} \left[\frac{1}{\text{сек}} \right];$$

$$\alpha_3 = 10;$$

$$\alpha_4 = 2 \left[\frac{\text{об/мин}}{\text{г}} \right].$$

В режиме минимальной скорости, в котором $\Phi = 0,4 \Phi_{\text{макс}}$:

$$\tau_1 + \tau_2 = 1,2 \text{ сек.}; \quad \tau_3 = 2 \text{ сек.}; \quad \alpha_1 = 100; \quad \frac{n_0}{m_0} = 50 \left[\frac{\text{об/мин}}{\epsilon} \right];$$

$$l_0 = 0; \quad n_0 = 5; \quad \beta_0 = 20 \left[\frac{\text{об/мин}}{\text{кгм}} \right].$$

Для $L = 0$:

$$\alpha_1 \alpha_2 = 0,03 \cdot \frac{n_0}{m_0} \left[\frac{1}{\text{сек}} \right];$$

$$\alpha_3 = 10;$$

$$\alpha_4 = 3,33 \left[\frac{\text{об/мин}}{\epsilon} \right].$$

Для $L = L_{\text{макс}}$:

$$\alpha_1 \alpha_2 = 0,03 \cdot \frac{n_0}{m_0} \left[\frac{1}{\text{сек}} \right];$$

$$\alpha_3 = 10;$$

$$\alpha_4 = 2 \left[\frac{\text{об/мин}}{\epsilon} \right].$$

Некоторые статические характеристики элементов системы, отвечающие данным предельным режимам, показаны на рис. 78. Поясним способ определения коэффициентов

$$\frac{\alpha_1 \alpha_2 m_0}{n_0}, \quad \alpha_3 \text{ и } \alpha_4.$$

Для линеаризации проводим касательные к характеристикам элементов в точках линеаризации, отвечающих заданным режимам. Получим следующие уравнения для режима максимальной скорости $\Phi = \Phi_{\text{макс}}$ (при $\Psi = 280 \epsilon$):

электромашинный усилитель

$$1) M_1 = 20 + 10M;$$

$$2) M_1 = 10M;$$

двигатель

$$1) \Phi = 500 + 3,33M_1;$$

$$2) \Phi = 500 + 2M_1;$$

усилитель-сервомотор

$$1) M = 43 - 0,03\Phi;$$

$$2) M = 47 - 0,03\Phi.$$

Для минимальной скорости (при $\Psi = 20 \epsilon$):

электромашинный усилитель

$$1) M_1 = 20 + 10M;$$

$$2) M_1 = 10M;$$

двигатель

$$1) \Phi = 230 + 5M_1;$$

$$2) \Phi = 190 + 5,35M_1;$$

усилитель-сервомотор

$$1) M = 11 - 0,03\Phi;$$

$$2) M = 12,6 - 0,03\Phi.$$

Сравнивая эти уравнения с уравнениями статики элементов, находим значения коэффициентов

$$\frac{\alpha_1 \alpha_2 m_0}{n_0}, \quad \alpha_3 \text{ и } \alpha_4.$$

Добротность системы для данных двух режимов примем равной

$$g_v = \frac{\omega_1}{\Delta_4} = 100.$$

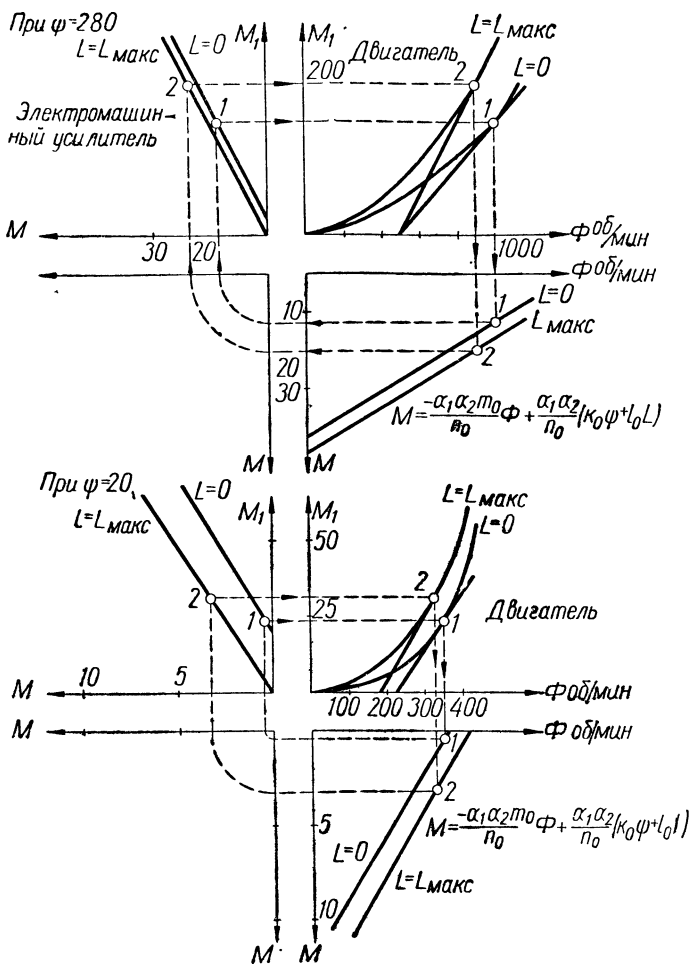


Рис. 78. Статические характеристики элементов системы стабилизации.

Написав выражение для добротности два раза (по числу предельных режимов) получим систему из двух уравнений, которую можно использовать для определения численных значений любых на выбор двух коэффициентов линейных связей, например l'_0 и l'_1

$$l'_0 = 4,6 \left[\frac{\theta}{\text{кгм}} \right]; \quad l'_1 = 20,9 \left[\frac{\theta \cdot \text{сек}}{\text{кгм}} \right].$$

Пример 2. Рассмотрим расчет коэффициентов связей комбинированной системы экстремального регулирования температуры топки со связью по основному возмущению и с обратной связью с ЭЛД. Составим уравнения динамики системы, изображенной на рис. 77 и 85:

закон регулирования

$$\Sigma_1 = -m_0 \Phi - n_0 M + l_0 L;$$

дифференциатор

$$x = p \Sigma_1;$$

элемент логического действия

$$U = \frac{x}{y} \text{ при отсутствии переключений сервомотора } y = 1;$$

сервомотор

$$pM = a_1 U.$$

Инерционная часть объекта регулирования

$$(\tau_2 p + 1) M_1 = a_2 \dot{M} + (l'_0 + l'_1 p) L;$$

Нелинейная часть объекта регулирования:

$$\begin{aligned} \Phi - \Phi_0 &= -Za(\Sigma_{21} - \Sigma_{20}); & Z &= 1 \text{ при } \Sigma_{21} > \Sigma_{20} \\ & & Z &= -1 \text{ при } \Sigma_{21} < \Sigma_{20}, \\ \Phi_0 &= b_0 + b_1 L; & \Sigma_{21} &= M_1; & \Sigma_{20} &= c_0 + \beta L, \end{aligned}$$

где Φ — температура топки, град.;

M — уставка скорости вращения вспомогательного привода, θ ;

M_1 — количество воздуха, кг_B ;

L — подача топлива, кг_T .

Исключая промежуточные переменные, находим уравнение динамики всей системы в целом:

$$[(\alpha_1 n_0 + 1) \tau_2 p + \alpha_1 n_0 - \alpha_1 \alpha_2 m_0 Z a + 1] \Phi = \{[(\alpha_1 n_0 + 1)(b_1 + Z a \beta) \tau_2 - Z a l'_1] p + (\alpha_1 n_0 + 1)(b_1 + Z a \beta) - l'_0 Z a + \alpha_1 \alpha_2 l_0 Z a\} L$$

или

$$(a_1 p + a_0) \Phi = -(\gamma_1 p + \gamma_0) L,$$

где

$$a_0 = \alpha_1 n_0 - \alpha_1 \alpha_2 m_0 Z a + 1;$$

$$a_1 = (\alpha_1 n_0 + 1) \tau_2 [\text{сек.}];$$

$$\gamma_0 = (\alpha_1 n_0 + 1)(b_1 + Z a \beta) - Z a l'_0 + \alpha_1 \alpha_2 Z a l_0 [^\circ\text{C}/\text{кг}_T];$$

$$\gamma_1 = (\alpha_1 n_0 + 1)(b_1 + Z a \beta) \tau_2 - Z a l'_1 \left[\frac{^\circ\text{C} \cdot \text{сек}}{\text{кг}_T} \right].$$

Для определения ошибки следования примем гипотезу равномерного изменения возмущения

$$L = \omega_1 t; \quad pL = \omega_1.$$

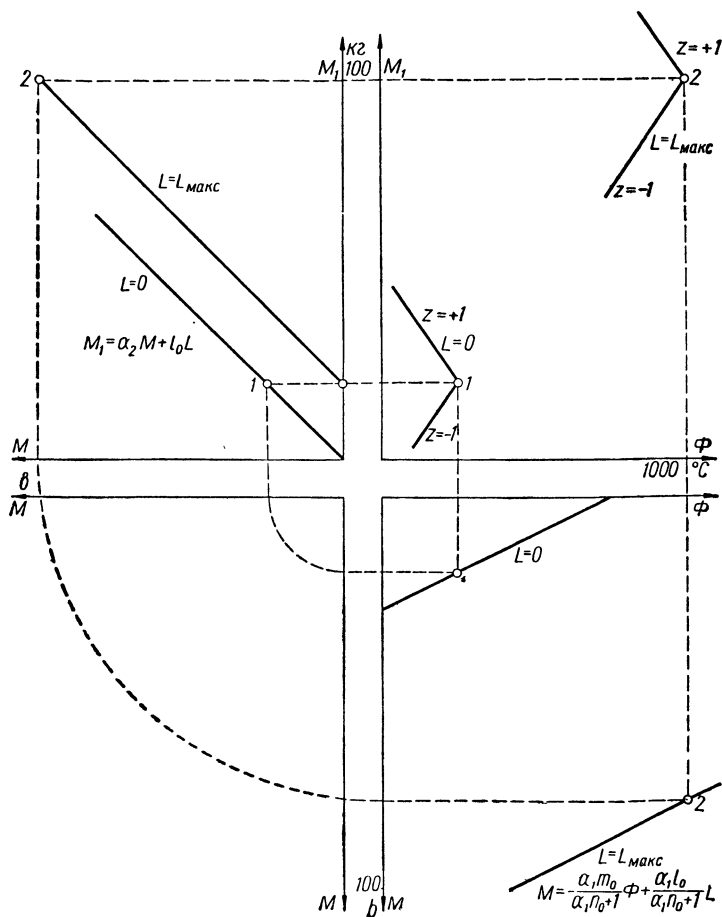


Рис. 79. Статические характеристики элементов экстремальной системы регулирования температуры топки.

Установившееся движение системы ищем в виде:

$$\Phi = gt - \Delta_4; \quad p\Phi = g.$$

Подставив это выражение в уравнение динамики системы, находим

$$a_1 g + a_0 (gt - \Delta_4) = \gamma_1 \omega_1 + \gamma_0 \omega_1 t.$$

Приравнивая члены, содержащие время, получим

$$a_0 g t = \gamma_0 \omega_1 t \text{ или } g = \frac{\gamma_0}{a_0} \omega_1.$$

Остальные члены дают уравнение

$$a_1 g - a_0 \Delta_4 = \gamma_1 \omega_1.$$

откуда установившаяся ошибка следования Δ_4 и добротность системы по скорости g_v соответственно равны:

$$\Delta_4 = \frac{a_1 \cdot \frac{\gamma_0}{a_0} - \gamma_1}{a_0} \cdot \omega_1;$$

$$g_v = \frac{\omega_1}{\Delta_4} = \frac{a_0}{a_1 \cdot \frac{\gamma_0}{a_0} - \gamma_1}.$$

Численные значения коэффициентов линеаризованных уравнений, которыми мы пользовались, зависят от выбора точек линеаризации. Определим численные значения некоторых коэффициентов в так называемых предельных режимах работы системы. Допустим, что в режиме наибольшей температуры $\Phi = \Phi_{\text{макс}}$ заданы следующие параметры:

$$\tau_2 = 5 \text{ сек.}; \quad n_0 = 0,5; \quad b_1 = 100 \left[\frac{^\circ\text{C}}{\kappa z_T} \right]; \quad a = 8,5 \left[\frac{^\circ\text{C}}{\kappa z_B} \right];$$

$$\beta = 2 \left[\frac{\kappa z_B}{\kappa z_T} \right];$$

$$l_0 = 0; \quad \alpha_2 = 1 \left[\frac{\kappa z_B}{\vartheta} \right]; \quad m_0 = 0,1 \left[\frac{\vartheta}{^\circ\text{C}} \right]; \quad \frac{a_1 m_0}{a_1 n_0 + 1} = 0,04 \left[\frac{\vartheta}{^\circ\text{C}} \right].$$

В режиме минимальной температуры, где $\Phi = 0,25\Phi_{\text{макс}}$:

$$\tau_2 = 6 \text{ сек.}; \quad n_0 = 0,5; \quad b_1 = 100 \left[\frac{^\circ\text{C}}{\kappa z_T} \right]; \quad \beta = 2 \left[\frac{\kappa z_B}{\kappa z_T} \right]; \quad l_0 = 0;$$

$$m_0 = 0,1 \left[\frac{\vartheta}{^\circ\text{C}} \right]; \quad \frac{a_1 m_0}{a_1 n_0 + 1} = 0,04 \left[\frac{\vartheta}{^\circ\text{C}} \right].$$

Некоторые статические характеристики элементов системы, отвечающие данным предельным режимам, показаны на рис. 79.

Поясним способ определения коэффициентов

$$\frac{a_1 n_0}{a_1 n_0 + 1}, \quad \alpha_2 \text{ и } a.$$

Для линеаризации проводим касательные к характеристикам элементов в точках линеаризации, отвечающих заданным режимам. Получим следующие уравнения для режима максимальной температуры $\Phi = \Phi_{\text{макс}}$ (при $L = L_{\text{макс}}$):

объект регулирования

$$\Phi = 420 - Z \cdot 8,5M_1 \text{ при } Z = +1,$$

$$\Phi = 80 - Z \cdot 8,5M_1 \text{ при } Z = -1;$$

измеритель-сервомотор

$$M = 30 - 0,04\Phi;$$

сервомотор-вентилятор

$$M_1 = M.$$

Для режима минимальной температуры $\Phi = \Phi_{\text{мин}}$ (при $L = 0$):
объект регулирования

$$\Phi = 1850 - Z \cdot 8,5M_1 \text{ при } Z = +1,$$

$$\Phi = 150 - Z \cdot 8,5M_1 \text{ при } Z = -1;$$

измеритель-сервомотор

$$M = 120 - 0,04\Phi;$$

сервомотор-вентилятор

$$M_1 = 20 + M.$$

Сравнивая эти уравнения с уравнениями статики элементов, находим значения коэффициентов

$$\frac{\alpha_1 n_0}{\alpha_1 n_0 + 1}, \quad \alpha_2 \text{ и } a.$$

Добротность системы для данных двух режимов примем равной

$$g_0 = \frac{\omega_1}{\Delta_4} = 100.$$

Как и в первом примере, написав выражение для добротности два раза (по числу предельных режимов), получим систему из двух уравнений, которую можно использовать для определения численных значений любых двух коэффициентов линейных связей, например, l'_0 и l'_1

$$l'_0 = 5,28 \left[\frac{\kappa_{\Sigma B}}{\kappa_{\Sigma T}} \right], \quad l'_1 = 4,28 \left[\frac{\kappa_{\Sigma B} \cdot \text{сек}}{\kappa_{\Sigma T}} \right].$$

Мы приняли $Z = +1$, так как величина L изменяется монотонно в сторону увеличения.

АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНАЯ ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ СИСТЕМА С РЕГУЛИРОВАНИЕМ ПО ПРОИЗВОДНЫМ ОТ ПОКАЗАТЕЛЯ ЭКСТРЕМУМА И РЕГУЛИРУЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Пример схемы экстремальной системы автоколебательного типа с регулированием по производным от показателя экстремума $p\phi$ и от регулирующего воздействия $p\mu$ дан на рис. 80. Здесь измерительный элемент 2 вырабатывает напряжение, пропорциональное показателю экстремума φ

(максимум которого требуется поддерживать); дифференциатор 4 дает производную $r\varphi$ от показателя экстремума по времени; тахогенератор 6 дает производную $r\mu$ от регулирующего воздействия по времени. Производные $r\varphi$ и $r\mu$ поступают на элемент логического действия 5, являющийся элементом логической операции равнозначности.

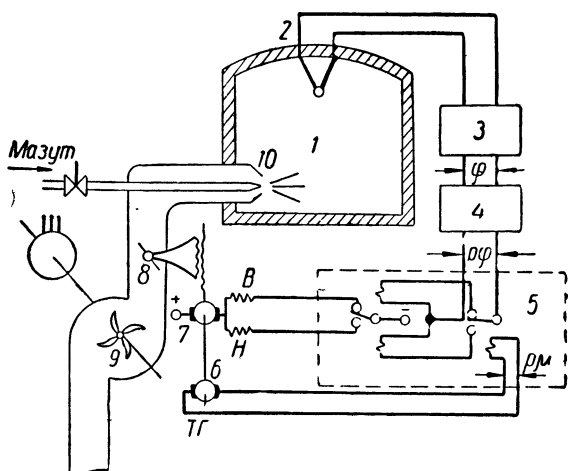


Рис. 80. Экстремальный регулятор температуры топки по производным $r\varphi$ и $r\mu$:

1 — топка, 2 — измерительный элемент показателя экстремума, 3 — усилитель, 4 — дифференциатор $r\varphi$, 5 — ЭЛД, 6 — тахогенератор $r\mu$, 7 — сервомотор, 8 — исполнительный элемент, 9 — вентилятор, 10 — форсунка.

Работа элемента логического действия объясняется на рис. 81, где изображено четыре положения якорей реле этого элемента, отвечающие четырем возможным комбинациям знаков производных $r\varphi$ и $r\mu$.

Легко убедиться, что только первое и четвертое положения якорей ЭЛД являются устойчивыми, так как при этих положениях якорей движущий момент сервомотора и скорость направлены в одну и ту же сторону. В первом положении $r\varphi > 0$ и $r\mu > 0$ в четвертом $r\varphi > 0$, $r\mu < 0$.

Пользуясь экстремальной характеристикой объекта (рис. 74,а и 75), нетрудно проверить, что указанные выше устойчивые, т. е. длительно существующие, движения системы направлены к достижению экстремального значения в точке O_2 .

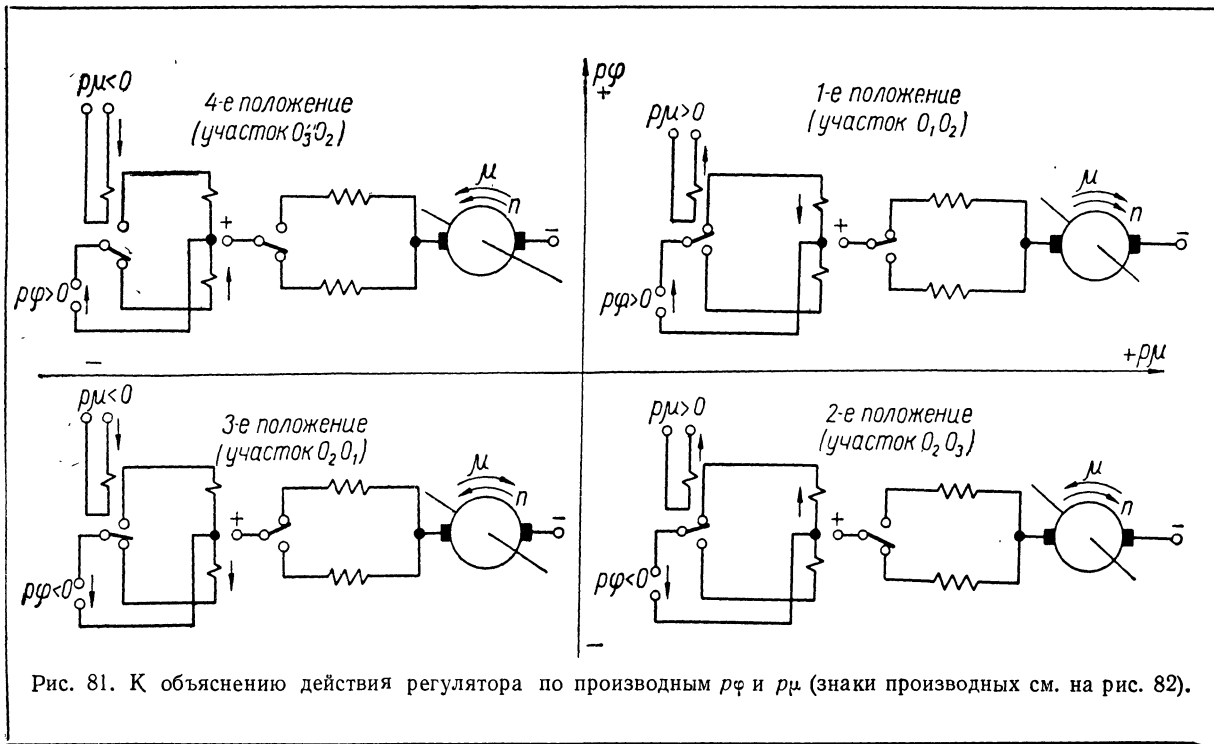


Рис. 81. К объяснению действия регулятора по производным $r\varphi$ и $r\mu$ (знаки производных см. на рис. 82).

В отличие от систем стабилизации в системах экстремального регулирования необходимо учитывать не только величину производной $r\varphi$, но и направление движения системы (т. е. производную $r\mu$), так как при движении в сторону увеличения μ производная положительна слева от экстремума O_2 , а при движении в сторону уменьшения μ , наоборот, производная $r\varphi$ положительна справа от экстремума O_2 (рис. 75). Если этого не учитывать и осуществить

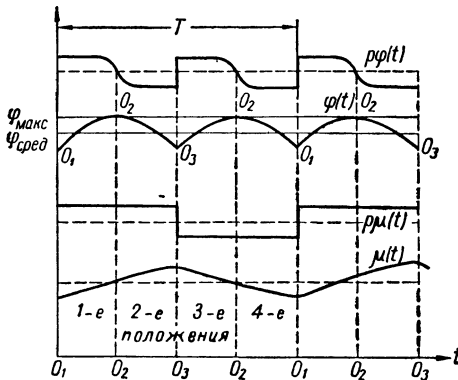


Рис. 82. Форма автоколебаний в экстремальной системе с регулированием по производным $r\varphi$ и $r\mu$.

систему, реагирующую только на производную $r\varphi$, то получим систему, статически неустойчивую в одном из двух возможных направлений движения системы (при $r\mu > 0$ либо при $r\mu < 0$). Необходимость учета направления движения и вызывает применение элементов логического действия и тахогенератора. В некоторых схемах тахогенератор, как показано на рис. 22 и 23, может заменяться переключателем или фазовым дискриминатором.

Для обеспечения статической устойчивости регулятору мало «знать», увеличивается величина φ или уменьшается, он должен также учитывать, в какую сторону изменяется величина μ . Учитывая производные $r\varphi$ и $r\mu$, элемент логического действия обеспечивает устойчивость только тех движений, которые направлены к достижению экстремального значения φ .

На рис. 82 показана примерная форма автоколебаний. Из рисунка видно, что при колебаниях всегда имеется

ошибка (потеря на поисковые колебания)

$$\Delta_3 = \varphi_{\max} - \varphi_{\text{ср}}$$

При наличии поисковых автоколебаний среднее значение показателя экстремума $\varphi_{\text{ср}}$ всегда меньше максимально возможного. Поэтому следует стремиться к всемерному уменьшению амплитуды колебаний.

Ошибка, вызванная колебаниями, может быть значительно снижена в системах с вынужденными колебаниями, которые мы рассмотрим ниже.

АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНАЯ ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ СИСТЕМА, УДЕРЖИВАЮЩАЯ ПИКОВОЕ ЗНАЧЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ЭКСТРЕМУМА

В качестве дифференциатора показателя экстремума по времени $r\varphi$ можно использовать специальную следящую

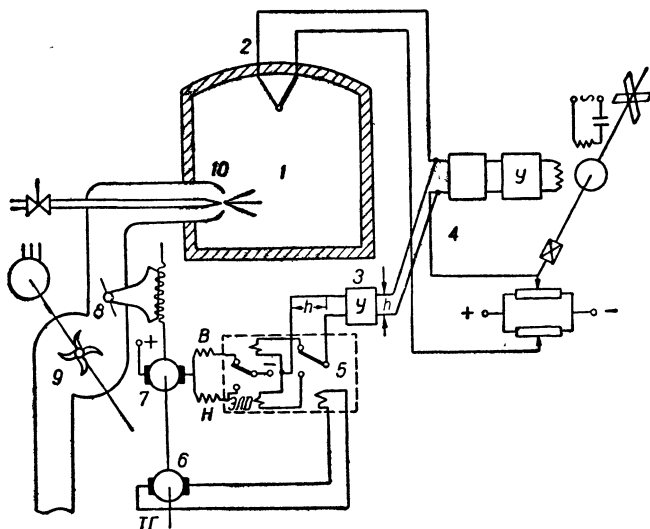


Рис. 83. Экстремальный регулятор температуры топки, удерживающий максимальное значение показателя экстремума φ (условные обозначения те же, что и на рис. 80).

систему релейного или пропорционального действия, так как известно, что *ошибка следования следящей системы совпа-*

дает по знаку с производной $p\varphi$, а в пропорциональных системах она, кроме того, пропорциональна этой производной [16].

Если ошибка следования велика, то получим систему, удерживающую пиковое значение показателя экстремума, пример которой дан на рис. 83. Объяснение действия этой системы дано на рис. 84. Из этого рисунка видно, что действительная ошибка следования h может быть использована для переключения сервомотора и получения таким образом поисковых колебаний. Благодаря наличию запаздываний система после переключения реле еще некоторое время движется в прежнем направлении, потом переходит через экстремальное значение в точке O_2 и затем начинает возвращаться к нему с другой стороны. Таким образом, происходят автоколебания.

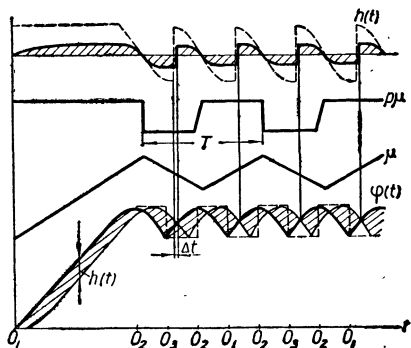


Рис. 84. К объяснению действия регулятора, удерживающего пиковое значение показателя экстремума:

Δt — запаздывание переключения сервомотора (пунктирной линией показано действие релейной, а сплошной — пропорциональной следящей системы).

Если в качестве дифференциатора используется следящая система пропорционального действия, то принципиальное сходство системы с регулированием по производным (рис. 80) и системы, удерживающей пиковое значение (рис. 83), особенно наглядно.

Когда вместо дифференциатора используется какая-либо релейная следящая система или более простое запоминающее устройство, сходство систем менее очевидно, так как при этом ошибка следования только по знаку совпадает с $p\varphi$. Но этого достаточно для переключения реле. Таким образом, оба типа автоколебательных систем принципиально не отличаются друг от друга.

Главными достоинствами экстремальных регуляторов автоколебательного типа с удержанием максимума являются их простота и сравнительно высокое быстродействие: после изменения нагрузки система приближается к новому экстре-

муму не шагами, а при помощи одного включения сервомотора на полную скорость. Недостатком является сравнительно малая помехоустойчивость.

УРАВНЕНИЯ ДИНАМИКИ СИСТЕМ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОГО ТИПА

Уравнения динамики системы автоколебательного типа, структурная схема которой дана на рис. 85, приведены в табл. 10. Каждая из

указанных в таблице трех форм записи уравнений динамики системы может быть применена для определенного круга задач.

Многие системы кибернетического управления, работа которых происходит на склоне характеристики (например, в точке A' , рис. 75),

где $\alpha_1 = \left(\frac{\partial \Psi}{\partial M_1} \right)_{L=\text{const}} = \text{const}$, при малых отклонениях описываются линейными уравнениями с постоянными коэффициентами (например, системы с переменной уставкой или программой). Для некоторых из

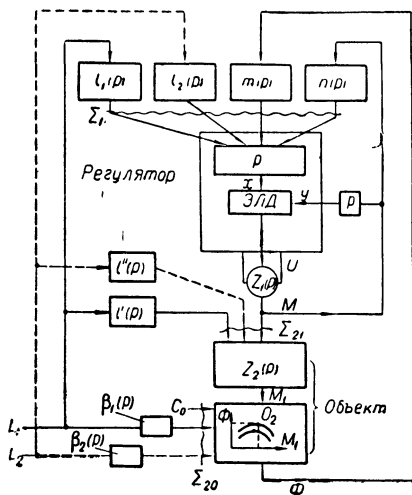


Рис. 85. Структурная схема комбинированной автоколебательной экстремальной системы по производным $p\varphi$ и $p\mu$.

них, строго говоря, следует применить уравнения с переменными коэффициентами. Однако, как показывает опыт, динамические процессы (осциллограммы) в тех и других типах систем весьма сходны (рис. 72). Поэтому мы ограничимся более простым математическим описанием системы регулирования, строго справедливым только для части экстремальных систем. Для других экстремальных систем его можно рассматривать как первое приближение.

Уравнения формы A с абсолютным отсчетом переменных от нуля являются наиболее общими, они могут быть использованы для исследования переходных процессов с учетом

Таблица 10

Уравнения динамики автоколебательной экстремальной системы

Элементы системы	С учетом поисковых колебаний		Без учета поисковых колебаний, только для центра колебаний
	A	B	C
	Уравнения в общем виде	Упрощенные уравнения в отклонениях от экстремума	Упрощенные уравнения в отклонениях от начального положения центра колебаний, находящегося на склоне характеристики
Суммирование воздействий на входе дифференциатора	$\Sigma_1 = -m(p)\Phi - n(p)M + l(p)L$	$\Sigma_1 = -m_0\varphi$ (при $n_0 = 0; l_0 = 0$)	$\Sigma_1 = -m_0\varphi - n_0\mu + l_0\lambda$
Дифференциатор	$x = Y_4(p) p \Sigma_1$	$x = p \Sigma_1 = -m_0 p \varphi$	$x = p \Sigma_1$
Тахогенератор	$y = Y_5(p) p \mu$	$y = p \mu$	
Элемент логического действия без зоны нечувствительности	При релейном ЭЛД $U = U_0 \operatorname{sign} \frac{x}{y}$ или при пропорциональном ЭЛД $U = \frac{x}{y}$	При релейном ЭЛД $U = U_0 \operatorname{sign} \mu_1$ или при пропорциональном ЭЛД $U = \frac{x}{y} = \frac{-m_0 p \varphi}{p \mu} = \frac{2am_0\mu_1 \cdot \frac{p\mu}{\tau_2 p + 1}}{p\mu}$ откуда $(\tau_2 p + 1) U = 2am_0\mu_1$	$U = U_0 \operatorname{sign} x$ или $U = x$
Сервомотор	$Z_1(p) M = \frac{1}{p} U$	$\mu = \frac{1}{p} U$	$\mu = \frac{1}{p} U$
Инерционная часть объекта	$Z_2(p) M_1 = \Sigma_{21}$, где $\Sigma_{21} = M + l'(p)L$	$(\tau_2 p + 1) \mu_1 = \mu$	$(\tau_2 p + 1) \varphi = \alpha \mu - [\beta(p) - l'_0(p)] \lambda$

Элементы системы	С учетом поисковых колебаний		Без учета поисковых колебаний, только для центра колебаний
	A	B	
		Уравнения в общем виде	Упрощенные уравнения в отклонениях от экстремума
Нелинейная часть объекта	$\Phi = f(M_1, L),$ например, $\Phi + \Phi_0 = -a(\Sigma_{21} - \Sigma_{20})^2,$ где $\Phi_0 = b_0 + b_1 L;$ $\Sigma_{20} = c_0 + \beta L$	$\varphi = a\mu_1^2,$ или $\varphi = \begin{cases} +\alpha_1\mu_1 & \text{при } \mu_1 > 0 \\ -\alpha_1\mu_1 & \text{при } \mu_1 < 0 \end{cases}$	

нелинейности системы, т. е. при больших толчках основного возмущения L , а также при линейном его изменении (в частности, для определения Δ_4).

Для исследования уравнений могут быть применены методы фазовых пространств, разработанные в современной теории колебаний, либо графические методы интегрирования и вычислительные машины.

Положение центра колебаний в установившемся режиме определяется уравнениями статики:

$$\Sigma_1 = -m_0\Phi - n_0M + l_0L;$$

$$\frac{p\Sigma_1}{pM} = 0;$$

$$\Phi - \Phi_0 = -a(\Sigma_{21} - \Sigma_{20})^2,$$

где

$$\Sigma_{21} = M + l'_0L,$$

$$\Phi_0 = b_0 + b_1L,$$

$$\Sigma_{20} = c_0 + \beta L.$$

Этими уравнениями мы пользовались выше.

Уравнения формы B составлены в отклонениях от конечного состояния системы. Они могут быть использованы:

а) для исследования автоколебаний системы вокруг точки экстремума; б) для исследования свободных движений системы, например, процессов установления автоколебаний, вызванных начальным отклонением (при $t = 0$, $\varphi = \varphi_0$ и $\mu = \mu_0$).

Благоприятными для упрощения исследования являются два обстоятельства: во-первых, система является астатической, т. е. в установившемся состоянии колеблется только вокруг экстремума (если нет измерительных связей $n_0 = 0$ и $l_0 = 0$ или при $l'_0 = \beta$). В астатических системах свободные движения, вызванные заданными определенными начальными условиями, имеют такую же форму, как и переходные процессы, вызванные толчком основного возмущения. Таким образом, сложное исследование переходных процессов может быть заменено более простым исследованием свободных движений. Влияние величины толчка возмущения мы можем определить, как обычно, путем вычисления начальных условий, эквивалентных заданному толчку, пользуясь уравнениями статики системы.

Во-вторых, структура уравнений весьма облегчает их решение. Действительно, уравнения сервомотора, инерционной части объекта и элемента логического действия образуют (при пропорциональном сервомоторе) *замкнутую систему из трех линейных уравнений* (с переменными μ , μ_1 и U). В случае релейного сервомотора уравнения, хотя и нелинейны, но легко интегрируются по участкам, а также исследуются по методу гармонического баланса [41].

Определив изменение μ_1 , легко затем, пользуясь характеристикой объекта, найти изменение показателя экстремума во времени или на фазовой плоскости [34].

Уравнения формы С составлены в отклонениях от начального состояния системы. Как указывалось, они применимы при исследовании процессов, вызванных небольшими толчками возмущения (или плавным его изменением во времени), когда рабочая точка системы все время находится на одном и том же склоне характеристики объекта. При пользовании этими уравнениями мы снова пренебрегаем поисковыми колебаниями; здесь φ и μ — координаты центра колебаний реальной системы.

При малых толчках возмущения (или, что в данной задаче одно и то же, при малых начальных отклонениях)

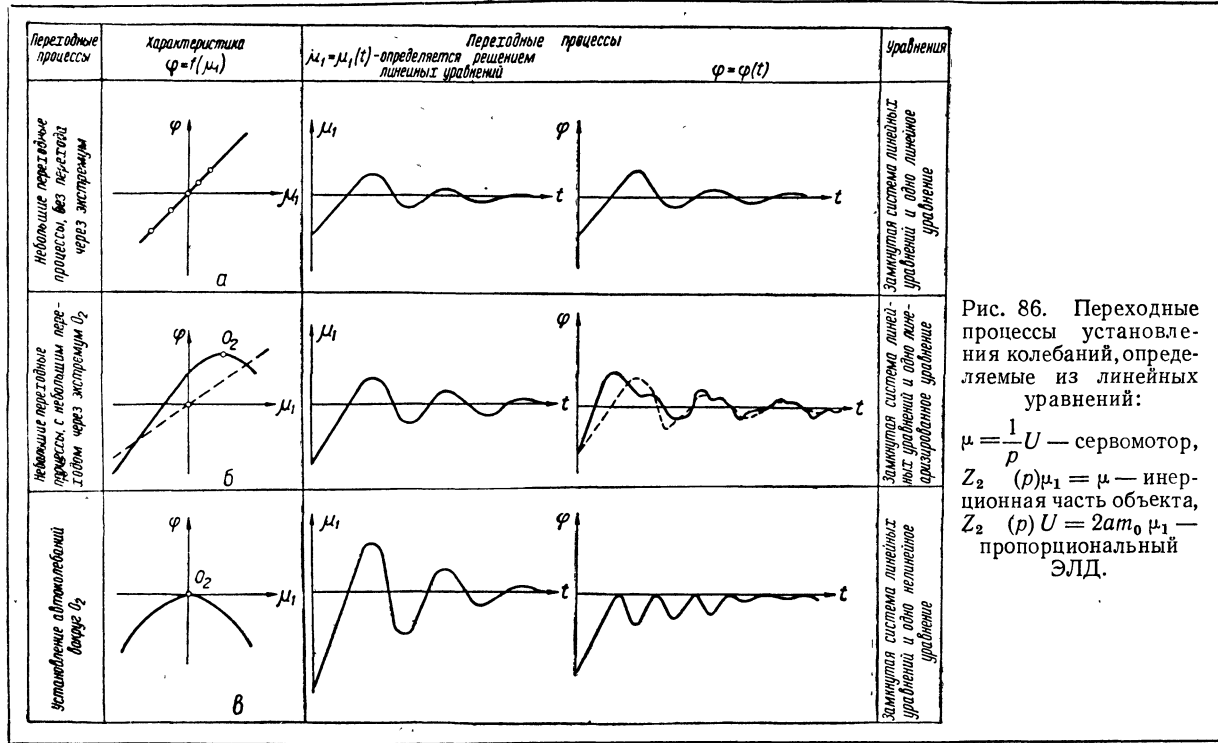


Рис. 86. Переходные процессы установления колебаний, определяемые из линейных уравнений:

$$\mu = \frac{1}{p}U \text{ — сервомотор,}$$

$$Z_2(p)\mu_1 = \mu \text{ — инерционная часть объекта,}$$

$$Z_2(p)U = 2at_0\mu_1 \text{ — пропорциональный ЭЛД.}$$

и при работе системы на склоне характеристики уравнение объекта является линейным (система уравнений С, рис. 86,а).

При толчках средней величины (с небольшим переходом через экстремум) характеристику объекта можно приближенно линеаризировать, например по методу гармонического баланса (рис. 86,б).

При больших толчках и при многократном переходе через экстремум, а также при автоколебаниях следует учитывать нелинейность характеристики объекта, причем ее удобно заменить либо параболой, либо двумя отрезками прямых.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПОИСКОВЫХ АВТОКОЛЕБАНИЙ СИСТЕМЫ

Отличие установившихся режимов некоторых экстремальных систем с обратной связью являются поисковые колебания, которые могут быть как автоколебаниями (в системах по производным $p\varphi$ и $p\mu$), так и вынужденными колебаниями (в шаговых системах и системах с модуляцией).

Автоколебательные системы с пропорциональным сервомотором описываются замкнутой системой линейных уравнений и одним нелинейным. При пропорциональности элементов действительны следующие уравнения динамики: дифференциатор

$$x = -m_0 p\varphi; \quad (1)$$

тахогенератор

$$y = p\mu_1 = \frac{p}{Z_2(p)} \mu; \quad (2)$$

ЭЛД

$$U = \frac{x}{y} = -m_0 \frac{p\varphi}{p\mu_1} = -2am_0\mu_1; \quad (3)$$

сервомотор

$$\mu = \frac{1}{p} U; \quad (4)$$

инерционная часть объекта

$$Z_2(p) \mu_1 = \mu + l'(p) L; \quad (5)$$

нелинейная часть объекта

$$\varphi = a\mu_1^2, \quad \frac{p\varphi}{p\mu_1} = 2a\mu_1. \quad (6)$$

Линейные уравнения (3), (4) и (5) образуют замкнутую систему с переменными U , μ и μ_1 . Определив $\mu_1(t)$, легко найти $\varphi(t)$ (рис. 86, в).

Амплитуда и частота автоколебаний с учетом нелинейности реле и сервомотора устанавливается как методом прямого интегрирования по участкам, так и методом гармонического баланса.

Как показывает анализ уравнений динамики, система совершает поисковые автоколебания вокруг точки экстремума O_2 . На рис. 87 показаны типичные осциллограммы автоколебаний системы.

Составим уравнения, описывающие эти автоколебания по отдельным участкам движения. При этом будем учитывать инерцию объекта регулирования (постоянную времени τ), напряжение ΔU срабатывания реле в ЭЛД, включающего сервомотор.

Уравнения будут иметь вид:

для отрезка O_1O_2 , где $0 < t < \frac{T}{4}$,

$$(\tau p + 1) \varphi = +\alpha_1 \mu, \quad p\mu = +\alpha_2;$$

для отрезка O_2O_3 , где $\frac{T}{4} < t < \frac{T}{2}$,

$$(\tau p + 1) \varphi = -\alpha_1 \mu, \quad p\mu = +\alpha_2;$$

для отрезка O_3O_2 , где $\frac{T}{2} < t < \frac{3T}{4}$,

$$(\tau p + 1) \varphi = +\alpha_1 \mu, \quad p\mu = -\alpha_2;$$

для отрезка O_2O_1 , где $\frac{3T}{4} < t < T$,

$$(\tau p + 1) \varphi = -\alpha_1 \mu, \quad p\mu = -\alpha_2.$$

Кроме того, известно, что

$$\Delta U = kp^2\varphi\Delta t,$$

где Δt — время запаздывания переключения реле.

Мы заменили экстремальную характеристику объекта двумя прямыми, совпадающими с ее склонами и имеющими наклон $+\alpha_1$ и $-\alpha_1$. Интегрируя уравнения по участкам и приравнявая значения μ , $p\varphi$ и $p\mu$ в точках сопряжения интегральных кривых (метод Б. А. Рябова [19]), получаем следующие расчетные формулы:

период колебаний

$$T = \frac{8\Delta U\tau}{k\alpha_1\alpha_2};$$

частота колебаний

$$f = \frac{1}{T} = \frac{k\alpha_1\alpha_2}{8\Delta U\tau};$$

амплитуда колебаний величины μ

$$A_\mu = \mu_2 = -\mu_1 = \frac{4\Delta U\tau}{k\alpha_1};$$

амплитуда колебаний величины φ

$$A_\varphi \approx \frac{4\Delta U\tau}{k}.$$

Эти формулы позволяют провести качественный анализ автоколебательной системы, т. е. ответить на вопрос о влиянии выбора параметров системы на амплитуду и частоту автоколебаний.

Инерция объекта регулирования τ уменьшает частоту и увеличивает амплитуду колебаний, т. е. снижает эффективность действия экстремального регулятора. Обострение экстремальной характеристики (увеличение α_1), наоборот, увеличивает частоту и уменьшает амплитуду μ (это также подтверждается экспериментом со следящей системой, описанным ниже). В противоположность этому в обычных неэкстремальных системах увеличение коэффициента усиления увеличивает амплитуду колебаний.

Увеличение скорости сервомотора α_2 повышает частоту, *но не влияет* на амплитуду колебаний μ . Следовательно, его нельзя рекомендовать для улучшения системы. Экстремальный регулятор может быть медленно действующим.

Амплитуда колебаний показателя экстремума φ не зависит ни от α_1 , ни от α_2 , а только от величин ΔU и τ .

Чем меньше произведение этих величин, тем меньше амплитуда.

Исследование системы уравнений формы B по методу гармонического баланса, выполненное в работе В. М. Кунцевича и П. И. Акинина [41], дает для этого примера следующую расчетную формулу для периода колебаний:

$$T = k_1 \frac{\tau\Delta U}{\alpha_1\alpha_2},$$

что качественно совпадает с формулой, полученной нами другим методом.

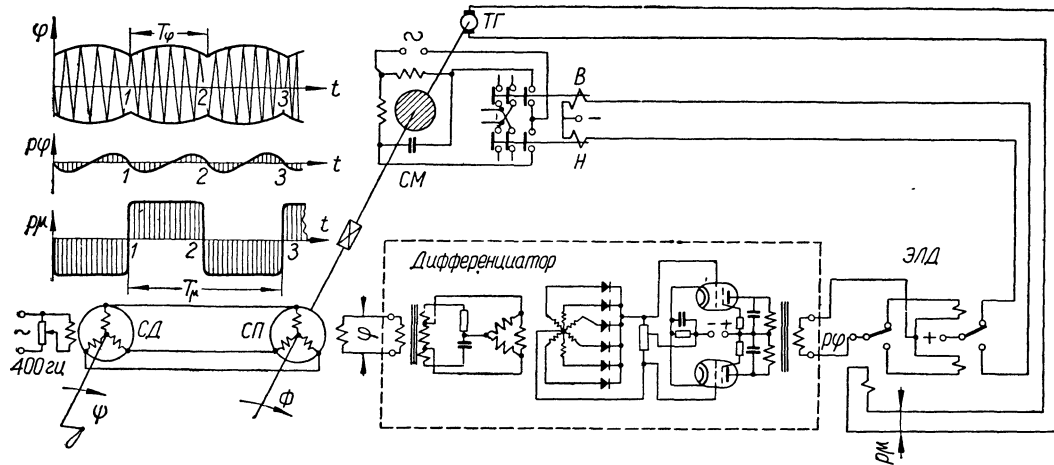


Рис. 87. Следящая система с автоколебательным экстремальным управлением и осциллограммы установившихся поисковых колебаний:

СД — сельсин-датчик, СП — сельсин-приемник, ЭЛД — элемент логического действия, СМ — сервомотор, ТГ — тахогенератор, В — вперед, Н — назад.

При наличии поисковых колебаний установившаяся ошибка имеет, по крайней мере, три составляющих

$$\Delta_{уст} = \Delta_1 + \Delta_3 + \Delta_4,$$

где Δ_1 — статическая составляющая;

Δ_3 — ошибка от поисковых колебаний;

Δ_4 — ошибка следования (скоростная ошибка).

Если все точки экстремальной характеристики $\Phi(M)$ существуют одновременно (как в задаче поиска самого глубокого места дна реки), то необходимость в поисковых колебаниях отпадает. Выше указан еще ряд схем обратной связи без поисковых колебаний. Системы, действующие по возмущениям, работают без колебаний при $\Delta_3 = 0$.

Экспериментальная проверка формул

Так как формулы для частоты и амплитуды колебаний выведены приближенно, то для их проверки был поставлен эксперимент.

Измерение частоты и амплитуда поисковых автоколебаний производились на следящей системе, изображенной на рис. 87. Принцип действия системы описан в работе [16]. В схеме применен оригинальный дифференциатор огибающей переменного тока $p\varphi$ [25]. Осциллограммы напряжений, приведенные на рис. 87, поясняют процессы, происходящие в системе. Из них, например, видно, что период изменения φ в два раза меньше, чем период p .

Из табл. 11, составленной на основании таких осциллограмм, снятых при различных значениях коэффициента усиления системы, следует, что с увеличением коэффициента усиления повышается также и частота колебаний.

Эти опытные данные можно рассматривать, как подтверждение формулы, указывающей на то, что частота автоколебаний пропорциональна первой степени коэффициента усиления системы.

Другие выводы, вытекающие из приведенных выше фор-

Таблица 11
Зависимость частоты автоколебаний от коэффициента усиления

Коэффициент усиления (в %)	Частота автоколебаний $f_{\varphi} = \frac{1}{T_{\varphi}}$ (в $\frac{1}{сек}$)
100	1,02
80	0,90
65	0,80
50	0,61
30	0,42

мул, также подтверждаются экспериментом с точностью около $\pm 15\%$, что допустимо.

Экспериментальное исследование следящей системы с колебательным поиском показало также ее *повышенную помехоустойчивость* по отношению к высокочастотным знакопеременным наводкам. Составляющие, создаваемые этими помехами на входе, после выпрямления и фильтрации практически исчезают и, таким образом, не действуют на систему.

Нелинейный обостритель экстремальной характеристики

Для уменьшения амплитуды автоколебаний регулирующего воздействия μ в автоколебательной системе желатель-

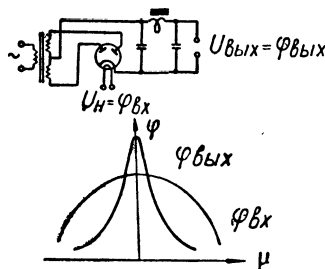


Рис. 88. Нелинейный обостритель экстремальной характеристики, применяемый для уменьшения амплитуды колебаний регулирующего воздействия μ .

но, чтобы экстремальная характеристика объекта регулирования была возможно острее. Для ее обострения можно применить нелинейный преобразователь. В качестве такого нелинейного преобразователя может быть использован обычный кенотронный выпрямитель, схема которого показана на рис. 88. Входом обострителя является нить накала кенотрона, а выходом — фильтр выпрямителя. Так как напряжение на выходе кенотронного выпрямителя приблизительно пропорционально кубу напряжения накала $U_{\text{вых}} = k(U_n^3)$,

то этим и достигается значительное изменение экстремальной характеристики в требуемую сторону.

Следует учесть, что данный обостритель имеет небольшую, но заметную инерционность, снижающую его эффективность при наличии большой частоты колебаний. Обостритель включается на входе экстремального регулятора последовательно с обмоткой входного реле.

Введение второй производной от показателя экстремума в закон регулирования системы

Среднее значение показателя экстремума при наличии колебаний всегда меньше максимально возможного. По-

этому следует стремиться к всемерному уменьшению амплитуды колебаний φ , т. е. к уменьшению ΔU . Другое средство уменьшения амплитуды φ состоит во введении в закон регулирования второй производной $p^2\varphi$.

Амплитуда колебаний показателя экстремума может быть уменьшена, если вместо $p\varphi$ на один из входов элемента логического действия подавать сумму $m_0p\varphi + m_1p^2\varphi$ [19]. При этом $Y_4(p) = \alpha_4 + \alpha_{41}p$. Влияние второй производной на работу системы проще всего объяснить, пользуясь частотным методом [41]. Более сложные выражения для $Y_4(p)$ еще никем не рассматривались.

СИСТЕМА С ВЫНУЖДЕННЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ С НЕПРЕРЫВНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ (ПОИСКОВЫМ СИГНАЛОМ)

Систему с непрерывной модуляцией в полной мере можно отнести к системам с вынужденными колебаниями, если в ней выполняются условия устойчивости для центра колебаний. Частота вынужденных колебаний строго постоянна и определяется частотой модулирующего воздействия. Пример системы с модулирующим воздействием дан на рис. 89. Промежуточные реле на схеме не показаны. Эта система по существу не отличается от рассмотренной нами ранее системы с модулирующим воздействием (см. рис. 24), поэтому мы не будем повторять описание ее схемы. Действие системы объяснено на рис. 90. Из этого рисунка видно, что фаза колебаний показателя экстремума φ зависит от того, с какой стороны от экстремальной точки находится система. При прохождении через экстремум фаза меняется на противоположную. Фазовый дискриминатор (он же, как мы увидим ниже, является и коррелятором или синхронным детектором, уменьшающим действие помех на систему) улавливает это изменение фазы и при помощи реле или при помощи пропорционального усилителя изменяет среднее значение регулирующего воздействия так, чтобы оно отвечало экстремуму O_2 .

Таким образом, *задача экстремального регулирования сводится к хорошо изученной задаче стабилизации фазы на нулевом значении*. В отличие от других схем с колебаниями здесь основной сервомотор 7 (рис. 89) не участвует в поисковых колебаниях: он включается только в том случае, когда система уходит от точки O_2 . Другие примеры неколебательных (устойчивых) обратных связей, применяемых в экстремальных системах, рассмотрены в гл. III.

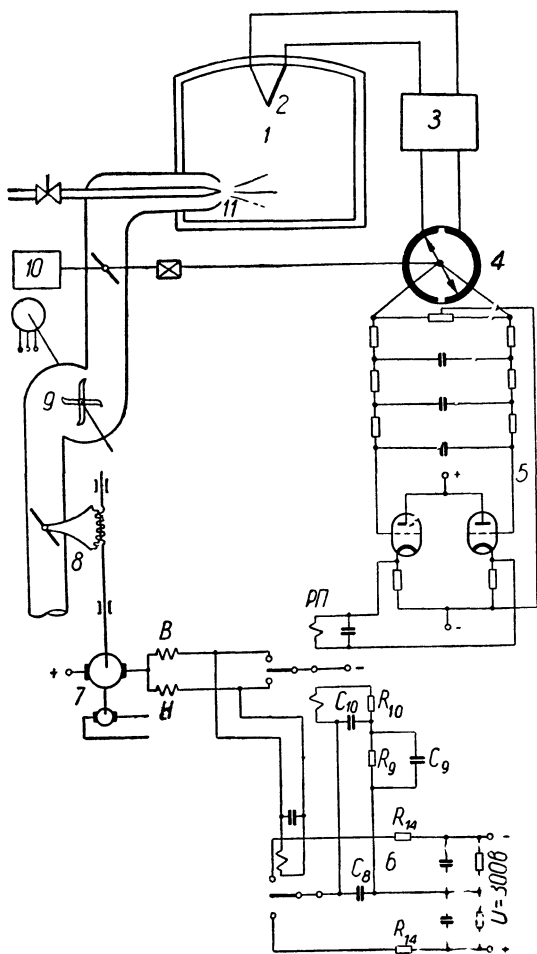


Рис. 89. Экстремальный регулятор температуры точки с модулирующим воздействием:

1 — печь, 2 — термопара, 3 — усилитель, 4 — синхронный детектор, 5 — коррелятор, 6 — устройство форсировки, 7 — сервомотор постоянной скорости, 8 — исполнительный элемент, 9 — вентилятор, 10 — двигатель постоянной скорости, 11 — форсунка.

В регуляторе с модулирующим воздействием можно применить как сервомотор с пропорциональной, так и с постоянной скоростью вращения. В последнем случае для ускорения переходных процессов весьма эффективно использовать устройство форсировки (называемое иногда изодромом), описание и метод расчета которого можно найти в работе [16].

СИСТЕМА С ВЫНУЖДЕННЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ ШАГОВОГО ТИПА

К группе экстремальных систем с вынужденными колебаниями относятся: а) шаговые системы и б) системы с модулирующим воздействием (сигналом).

Одним из преимуществ систем с вынужденными колебаниями является отсутствие дифференциатора показателя экстремума $\rho\varphi$. Как и всякий другой, дифференциатор $\rho\varphi$ усиливает высокие частоты и поэтому на его вход нужно подавать только очень хорошо сглаженное напряжение датчика φ , что вызывает замедление измерений и ряд других затруднений.

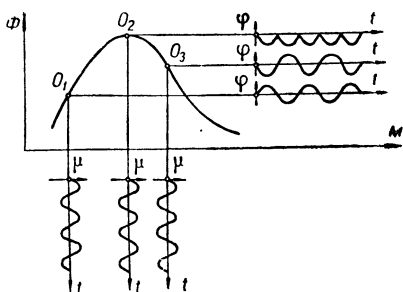


Рис. 90. К объяснению действия экстремального регулятора с модулирующим воздействием.

Система шагового типа была описана нами ранее (см. рис. 23). На рис. 91 представлен еще один вариант шаговой системы, отличающийся применением интегрирования показателя экстремума по способу «чересполосицы».

Действие системы лучше всего объяснить, пользуясь временной диаграммой (или циклограммой), пример которой изображен на рис. 92. Темп работы зависит от частоты импульсов, поступающих в шаговый распределитель ШР.

Контакт распределителя, обозначенный через O , ставит движок потенциометра Π интегратора в нулевое положение. При замыкании первого контакта ШР движок потенциометра поворачивается на угол, пропорциональный интегралу φ со знаком плюс. Второй контакт производит небольшое пробное изменение регулирующего воздействия в сторону его уменьшения (отрицательный шаг). При замы-

кании третьего контакта движок потенциометра поворачивается на угол, пропорциональный интегралу φ со знаком минус. Четвертый контакт производит изменение регули-

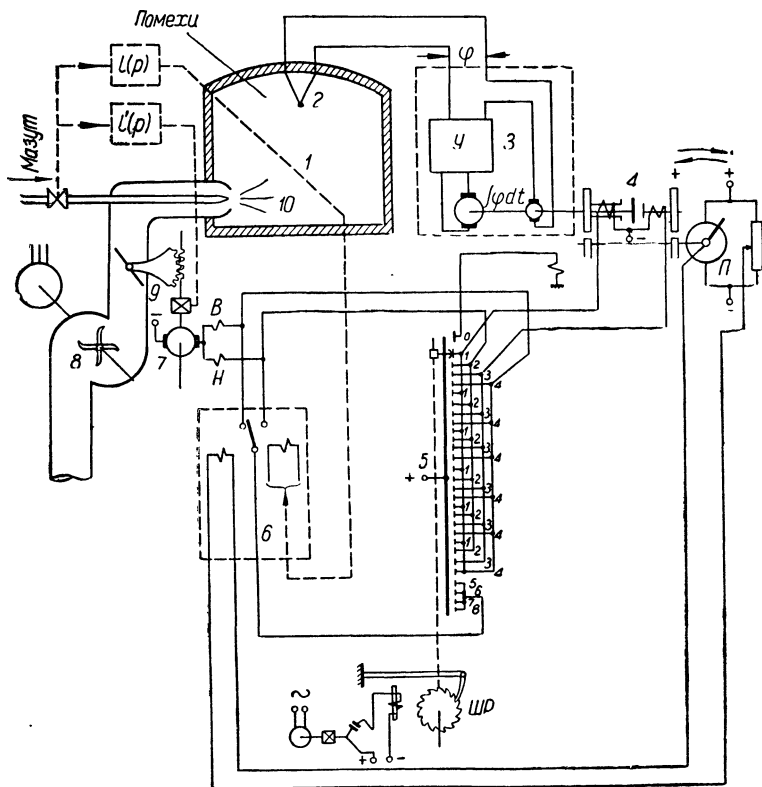


Рис. 91. Экстремальный регулятор температуры топки шагового типа с интегрированием по способу «чересполосицы»:

1 — печь, 2 — термопара, 3 — интегратор, 4 — реверсивная муфта, 5 — шаговый распределитель (искатель), 6 — ЭЛД, 7 — сервомотор, 8 — вентилятор, 9 — исполнительный элемент, 10 — форсунка.

рующего воздействия в сторону увеличения (положительный шаг). В дальнейшем этот цикл повторяется несколько (четное число) раз (на рис. 92 показано шесть циклов). В конце распределителя имеются контакты 5, 6, 7 и 8, включающие сервомотор регулятора в сторону, определяемую знаком разности интеграла φ .

Напряжение, подаваемое на сервомотор U , равно:

$$U = U_0 \operatorname{sign} \left(\sum_{n=1}^{n=k} \int_{\frac{k+T}{k}}^{\frac{k-T}{k}} \varphi dt - \sum_{n=1}^{n=k} \int_{\frac{k-T}{k}}^{\frac{k+T}{k}} \varphi' dt \right),$$

где k — общее число участков интегрирования (см. стр. 360);

$k_- = 0, 2, 4, 6, 8, 10, \dots$;

$k_+ = 1, 3, 5, 7, 9, 11 \dots$

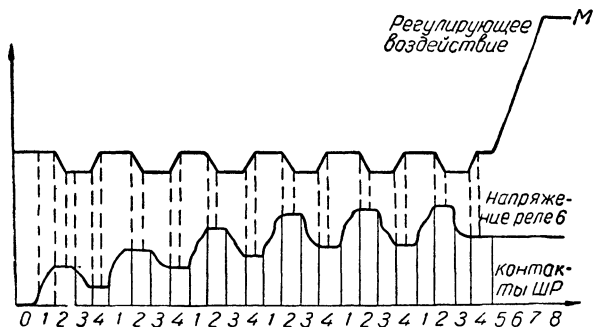


Рис. 92. Временная диаграмма работы экстремального регулятора шагового типа с интегрированием по способу «чересполосицы» (накопления).

Целью такого способа интегрирования является уменьшение влияния помех. К этому вопросу мы вернемся ниже.

Шаговый распределитель должен иметь такую конструкцию, чтобы после изменения регулирующего воздействия μ было предусмотрено некоторое время, необходимое для завершения переходного процесса в объекте. Таким образом, более точно цикл регулятора состоит из следующих частей:

- интегрирование φ со знаком плюс за время Δt_1 ;
- отрицательный шаг μ (в большинстве случаев скорость сервомотора такова, что $\Delta t_2 \approx 0$);
- пауза Δt_3 на переходный процесс в объекте;
- интегрирование φ со знаком минус за время $\Delta t_4 = \Delta t_1$;
- положительный шаг μ ($\Delta t_5 \approx 0$);
- пауза Δt_6 на переходный процесс в объекте ($\Delta t_6 = \Delta t_3$).

Всего один элементарный цикл имеет общую длительность ΔT , равную $\Delta T = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6 \approx 2(\Delta t_1 + \Delta t_3)$.

Шаговые системы, как известно, описываются дифференциальными уравнениями в конечных разностях.

Уменьшение влияния помех в шаговой системе сводится в основном к обеспечению такого действия системы, при котором значение интеграла показателя экстремума за время интегрирования (Δt_1 и Δt_4) было бы таким же, как и при отсутствии помех. При этом обычно можно предположить, что изменение показателя экстремума Φ вызывается мгновенным изменением регулирующего воздействия M на постоянную величину, так как сервомотор включается на сравнительно короткое время.

Периодические режимы вынужденных колебаний шаговых систем исследовались в работах В. М. Кунцевича и П. И. Акинина [3], [41]. В этих работах получены формулы для определения минимальной амплитуды и частоты колебаний в зависимости от параметров объекта и напряжения срабатывания реле.

Казалось бы, что для уменьшения потери показателя экстремума от колебаний всегда следует стремиться уменьшить их амплитуду. В работе же П. И. Акинина установлено, что *не всегда следует стремиться к минимально возможной амплитуде колебаний, так как при этом возрастает длительность цикла поиска.*

Таким образом, при выборе амплитуды и периода колебаний требуется некоторое компромиссное решение.

Обнаружено также, что колебания в шаговых системах хотя и являются вынужденными, но носят некоторые черты автоколебаний. Как известно, автоколебания характерны тем, что частота их плавно изменяется при изменении параметров системы, в то время как при вынужденных колебаниях частота не изменяется. В шаговой системе частота колебаний изменяется скачками: изменяя параметры системы, можно получить различные типы колебаний (по одному шагу в сторону от экстремума, по полтора, по два шага и т. п.) с различными частотами. Таким образом, *шаговая система занимает некоторое среднее положение между автоколебательными системами и системами с модулирующим воздействием.*

Заметим, что при определенных условиях и в системах с модулирующим воздействием также могут существовать автоколебания особого типа, а именно автоколебания центра поисковых колебаний вокруг экстремума.

ПРЕИМУЩЕСТВА КОМБИНИРОВАННЫХ СИСТЕМ В ПЕРЕХОДНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ

С учетом переходной составляющей Δ_2 ошибка экстремальной системы равна

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4.$$

Преимущества комбинированных систем в переходных режимах состоят в том, что в этих системах резко увеличивается область применения *условий инвариантности*, выполнение которых позволяет полностью устранить (или сильно уменьшить) переходную ошибку и получить $\Delta_2 = 0$ (при $\Delta_1 = 0$ и $\Delta_4 = 0$), т. е. поднять быстродействие и точность. В отличие от систем, действующих только по возмущениям (где также имеется широкая возможность использования условий инвариантности), в комбинированных системах можно достичь высокую жесткость $s = 1 + \alpha_p$ и тем самым уменьшить ошибки, вызываемые второстепенными возмущениями, по которым нет компаундирующих связей.

При испытании экстремального регулятора соотношения $\frac{\text{пар}}{\text{топливо}}$, воздействующего на отношение $\frac{\text{воздух}}{\text{топливо}}$, разработанного в Институте электротехники АН УССР для парового котла, было установлено, что некомбинированная система практически не работоспособна. При толчках нагрузки она слишком далеко уходит от экстремума и теряет ориентировку. Только применение комбинированной системы решило рассматриваемую задачу¹.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ И БЫСТРОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМ УЛУЧШЕНИЕМ КОМПАУНДИРУЮЩИХ СВЯЗЕЙ ПО ВОЗМУЩЕНИЯМ

Основным законом настройки компаундирующих связей по возмущениям являются так называемые условия инвариантности.

Выбор нелинейности компаундирующих связей, как показано выше, позволяет устранить статическую ошибку Δ_1 , а условия инвариантности показывают путь к всемерному уменьшению или (в некоторых случаях) к полному устранению ошибок Δ_2 и Δ_4 .

¹ См. журнал «Автоматика» № 2 и № 3, Изд. АН УССР, 1959.

Более подробно условия инвариантности будут рассмотрены в гл. X, здесь достаточно знать только наиболее сильную, так называемую вторую форму условий инвариантности.

Пусть линейная система стабилизации описывается уравнением

$$a_3(p) \Phi = b_3(p) L_1 + b'_3(p) L_2 + \dots,$$

где $a_3(p)$ и $b_3(p)$ — полиномы от $p = \frac{d}{dt}$ степени n и m соответственно;

Φ — регулируемая величина;

L_1 и L_2 — возмущающие воздействия. Тогда условия инвариантности во второй форме имеют вид

$$b_3(p) = 0, \quad b'_3(p) = 0 \dots$$

Эти условия действительны для линейных систем при:

- а) нулевых начальных условиях переходного процесса,
- б) при $n > m$.

Уравнения динамики и условия инвариантности экстремальной системы с модулирующим воздействием

Движения центра колебаний экстремальных систем с самоизменением уставки точно описываются линейными уравнениями в обычных производных или конечных разностях с постоянными коэффициентами. Для других систем (например, с переменными параметрами) эти уравнения являются первым приближением тем более точным, чем меньше отклонения центра колебаний от установившегося положения. Экстремальные системы с модуляцией по сути являются системами стабилизации напряжения на выходе фазового дискриминатора (с учетом знака фазы θ) на постоянном близком к нулю значений (см. рис. 45), поэтому обе

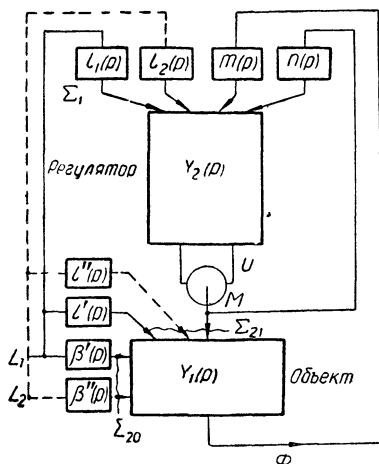


Рис. 93. Структурная схема экстремальной системы с модулирующим воздействием.

указанные выше возможности выбора $l(p)$ и $l'(p)$ в этих системах имеются.

Общая структурная схема экстремальной системы с модулирующим воздействием дана на рис. 93.

Если не обращать внимания на поисковые колебания (выполняемые отдельным вспомогательным генератором или двигателем), то уравнения движения центра колебаний ничем не отличаются от уравнений динамики системы стабилизации с сервомотором. Поскольку подобны уравнения, то подобны и свойства системы. Вся теория комбинированных систем автоматического регулирования полностью применима к исследованию изменений положения центра поисковых колебаний экстремальных систем с модулирующим воздействием. Никаких особенностей (кроме самих вынужденных поисковых колебаний) эти системы не имеют.

Следует различать следующие два случая.

С л у ч а й 1-й. Объект состоит из инерционной и нелинейной частей, причем инерционная часть предшествует нелинейной. Составим уравнения динамики экстремальной системы с модуляцией для этого случая:

закон регулирования

$$\Sigma = -\theta + l(p) L;$$

усилитель

$$U = Y_4(p) \Sigma;$$

сервомотор:

а) пропорциональный

$$M = Y_1(p) \frac{1}{\rho} U,$$

б) релейный

$$pM = \begin{cases} +\alpha_1 & \text{при } U > \Delta \\ 0 & \text{» } -\Delta < U < \Delta \\ -\alpha_1 & \text{» } U < -\Delta; \end{cases}$$

инерционная часть объекта¹

$$M_1 = Y_2(p) [M + l'(p) L];$$

¹ Мы снова, ограничиваясь первым приближением, считаем параметры объекта постоянными, а процессы в нем — аналогичными процессам перенастройки регулятора (изменение его уставки). Для ряда экстремальных систем такое допущение постоянства параметров объекта является справедливым.

нелинейная часть объекта

$$\Phi - \Phi_0 = -a (M_1 - \Sigma_{20})^2,$$

где

$$\Phi_0 = b_0 + b_1 L, \quad \Sigma_{20} = c_0 + \beta L;$$

дискриминатор

$$\theta = Y_3(p) [M_1 - \Sigma_{20}].$$

Эта зависимость является точной для параболической характеристики объекта. В других случаях она является первым линейным приближением.

В случае применения экстремального регулятора с модулирующим воздействием на выходе фазового дискриминатора θ пропорционально смещению экстремума на плоскости $\Phi - M$ в горизонтальном направлении.

Таким образом, для переменной θ мы располагаем замкнутой системой линейных уравнений:

$$\begin{aligned} M &= Y_1(p) \frac{1}{p} U; \\ M_1 &= Y_2(p) [M + l'(p) L]; \\ \theta &= Y_3(p) [M_1 - \Sigma_{20}]; \\ U &= -Y_4(p) [\theta - l(p) L]. \end{aligned}$$

Исключая промежуточные переменные, находим уравнение динамики всей системы

$$\theta = Y_3(p) L,$$

где

$$Y_3(p) = \frac{Y_3(p) \beta(p) + Y_2(p) Y_3(p) l'(p) + Y_1(p) Y_2(p) Y_3(p) Y_4(p) \frac{1}{p} l(p)}{1 + Y_1(p) Y_2(p) Y_3(p) Y_4(p) \frac{1}{p}}.$$

Условия инвариантности во второй форме

$$\beta(p) + Y_2(p) l'(p) + Y_1(p) Y_2(p) Y_4(p) \frac{1}{p} l(p) = 0.$$

Отсюда получим:

$$\text{при } l'(p) = 0 \quad \beta(p) + Y_1(p) Y_2(p) Y_4(p) \frac{1}{p} l(p) = 0; \quad (2')$$

$$\text{при } l(p) = 0 \quad \beta(p) + Y_2(p) l'(p) = 0. \quad (2'')$$

Полученные условия не отличаются от условий для систем стабилизации с сервомотором; они полностью применимы и для экстремальной системы с модуляцией.

С л у ч а й 2-й. В схеме замещения объекта сначала расположена нелинейная, а затем инерционная часть. Для системы с модуляцией получим следующие уравнения: закон регулирования

$$\Sigma = -\theta + l(p)L;$$

усилитель

$$U = Y_4(p)\Sigma;$$

сервомотор:

а) пропорциональный

$$M = Y_1(p)\frac{1}{p}U,$$

б) релейный

$$pM = \begin{cases} +\alpha_1 & \text{при } U > \Delta \\ 0 & \text{» } -\Delta < U < \Delta \\ -\alpha_1 & \text{» } U < -\Delta; \end{cases}$$

нелинейная часть объекта

$$\begin{aligned} (M_1 - M_{10}) &= -a(M - \Sigma_{20})^2, \\ \text{где } M_{10} &= b_0 + b_1L, \\ \Sigma_{20} &= c_0 + \beta_0L - l'_0L; \end{aligned}$$

инерционная часть объекта

$$\Phi = Y_2(p)M_1;$$

измерительный элемент и коррелятор

$$\theta = Y_3(p)[M - \Sigma_{20}].$$

Для определения переменной θ мы и в этом случае имеем замкнутую систему линейных уравнений:

$$\begin{aligned} M &= Y_2(p)\frac{1}{p}U; \\ \theta &= Y_3(p)[M - \Sigma_{20}]; \\ U &= -Y_4(p)[\theta - l(p)L]. \end{aligned}$$

Уравнение динамики системы

$$\theta = Y_3(p)L,$$

$$\text{где } Y_3(p) = \frac{\beta(p) + l'(p) + Y_1(p)Y_3(p)\frac{1}{p}l(p)}{1 + Y_1(p)Y_3(p)\frac{1}{p}}.$$

Условие инвариантности во второй форме

$$\beta(p) + l'(p) + Y_1(p) Y_3(p) \frac{1}{p} l(p) = 0,$$

откуда получим:

$$\text{при } l'(p) = 0 \quad \beta(p) + Y_1(p) Y_3(p) \frac{1}{p} l(p) = 0; \quad (2')$$

$$\text{при } l(p) = 0 \quad \beta(p) + l'(p) = 0. \quad (2'')$$

Условия как по форме, так и по сути не отличаются от аналогичных условий для системы стабилизации, а также от условий предыдущего случая.

Два способа удовлетворения условий инвариантности в системах стабилизации, имеющих сервомотор

Обычные неприиспосабливающиеся системы регулирования могут быть статическими или астатическими. В последнем случае они имеют в своей схеме сервомотор (что придает системе астатизм первого порядка). Экстремальные системы выполняются исключительно как системы с сервомотором.

В системах с сервомотором приходится различать измерительную $l(p)$ и непосредственную $l'(p)$ компаундирующие связи. Первая действует на вход усилителя, управляющего сервомотором, а вторая — непосредственно на объект. В обычных системах регулирования имеется возможность удовлетворения второй формы условий инвариантности как при помощи выбора коэффициента $l(p)$, так и $l'(p)$.

Например, для системы стабилизации, описываемой уравнениями:

закон регулирования

$$\Sigma = \Psi - m(p) \Phi - l(p) L;$$

усилитель и сервомотор:

а) пропорциональный

$$M = Y_1(p) \frac{1}{p} \Sigma,$$

б) релейный

$$pM = \begin{cases} +\alpha & \text{при } \Sigma > \Delta \\ 0 & \\ -\alpha & \text{при } \Sigma < -\Delta; \end{cases}$$

объект

$$\Phi = A + Y_2(p)M - \beta(p)L + l'(p)L;$$

нагрузка

$$\frac{\Phi}{L} = Z(p),$$

получаем характеристическое уравнение (для переменной Φ)

$$1 + Y_1(p)Y_2(p)m(p) + \frac{\beta(p) + l'(p) + Y_1(p)Y_2(p)\frac{1}{p}l(p)}{Z(p)} = 0.$$

Условия инвариантности во второй форме

$$\beta(p) + l'(p) + Y_1(p)Y_2(p)\frac{1}{p}l(p) = 0,$$

откуда получим:

$$\text{при } l'(p) = 0 \quad \beta(p) + Y_1(p)Y_2(p)\frac{1}{p}l(p) = 0, \quad (2')$$

$$\text{при } l(p) = 0 \quad \beta(p) + l'(p) = 0. \quad (2'')$$

Из полученных выражений можно установить следующее:

1) условия (2') или (2'') можно выполнить только в системе, где имеется возможность выбора $l(p)$ или $l'(p)$, т. е. при регулировании по возмущению и в комбинированных системах;

2) компаундирующие связи $l(p)$ и $l'(p)$ могут считаться разомкнутыми и не влияющими на устойчивость только в случае выполнения условий инвариантности или при $Z(p) = \infty$.

Последнее имеет место при $L \neq f(\Phi)$.

В работе [16] рассмотрен случай

$$Z(p) = \lambda_0 + c\Phi \text{ и } l(p) = l_0 + l_1p + l_2p^2,$$

причем установлено, что перекомпенсация ошибки приводит к автоколебаниям. Поэтому в слабонелинейных системах при $L \neq f(\Phi)$ и $Z(p) = \infty$ следует выбирать средние значения коэффициентов l_0 , l_1 , l_2 , а при $L = f(\Phi)$ и $Z(p) \neq \infty$ — минимальные значения, полученные из всех точек линеаризации¹ (рис. 74,б).

¹ О способе выполнения условий инвариантности в сильнонелинейных системах при помощи накопительных (затягивающих) фильтров см. работу [16].

Наличие двух условий (2') и (2'') показывает, что в системах с сервомотором действительно существуют два способа достижения инвариантности: 1) при помощи выбора коэффициентов измерительной компаундирующей связи $l(p)$ и 2) при помощи выбора коэффициентов силовой или непосредственной компаундирующей связи $l'(p)$. Вторым способом достижения инвариантности является более сильным, так как для него достаточно, чтобы линейными были только операторы $\beta(p)$ и $l'(p)$.

Выполнение условий инвариантности в системах с модуляцией при помощи измерительной компаундирующей связи $l(p)$

В обычных неприспосабливающихся системах и в экстремальных системах с модуляцией для достижения инвариантности можно использовать как условие (2'), так и условие (2''), т. е. применить как измерительную, так и силовую компаундирующую связь. Рассмотрим, например, случай, когда схема замещения объекта состоит из инерционной и нелинейной частей. Допустим, что

$$Y_1(p) \cdot Y_2(p) \cdot Y_3(p) \cdot Y_4(p) = Y_p(p),$$

$$Y_0(p) = \frac{\alpha}{\tau p + 1}, \quad l'(p) = 0, \quad c_0 = 0,$$

а система описывается следующими уравнениями:

$$\Sigma = l(p) L - \theta; \quad (\tau p + 1) p \theta = \alpha \Sigma,$$

где $l(p) = l_0 + l_1 p + l_2 p^2$; $p = \frac{d}{dt}$.

После преобразования получим

$$(p^2 + a_1 p + a_2) \theta = (b_0 p^2 + b_1 p + b_2) L.$$

Введем безразмерный отсчет времени:

$$\omega_0 = \sqrt{a_2}, \quad T = \omega_0 t, \quad D = \frac{d}{dt},$$

$$(D^2 + 2c_{12} D + 1) \theta = (\gamma_2 D + \gamma_1 D + \gamma_0) L,$$

где

$$c_{12} = \frac{1}{2\sqrt{\tau\alpha}}.$$

Решение при $L = [1]$

$$\theta = \gamma_0 - e^{-c_{12}T} (a \cdot \cos \beta_{12}T + b \cdot \sin \beta_{12}T),$$

где

$$a = \gamma_0 - \gamma_2, \quad b = \frac{\gamma_0 c_{12} - \gamma_1 + \gamma_2 c_{12}}{\beta_{12}}, \quad \beta_{12} = \sqrt{1 - c_{12}^2}.$$

Решение при $L = vt$

$$\theta = \gamma_0 T - \Delta_4 + e^{-c_{12}T} (a \cdot \cos \beta_{12}T + b \sin \beta_{12}T),$$

где

$$a = \Delta_4 = 2c_{12}\gamma_0 - \gamma_1, \quad b = \frac{2c_{12}^2\gamma_0 - c_{12}\gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_0}{\beta_{12}}.$$

Условия инвариантности

$$\varphi = L - \theta \equiv 0 \quad \text{при} \quad \frac{\dot{\gamma}_2}{\gamma_0} = 1 \quad \text{и} \quad \frac{\dot{\gamma}_1}{\gamma_0} = 2c_{12}.$$

Формы переходных процессов при компенсации ошибки следования $\Delta_4 = 0$ в зависимости от $\frac{\dot{\gamma}_2}{\gamma_0}$ и c_{12} показаны на рис. 95.

В системах стабилизации полная инвариантность означает постоянство регулируемой величины Φ . В экстремальных только то, что центр колебаний системы все время находится в точке экстремума.

К более подробному рассмотрению рис. 95 мы вернемся в конце данной главы. Сейчас же достаточно отметить, что при двух рассмотренных законах изменения основного возмущения ошибка, вызываемая этим возмущением, действительно равна нулю.

В сильно нелинейных системах с ограниченной мощностью выхода условие инвариантности (2') может быть точно выполнено при помощи выбора $l(p)$, если: а) ускорения не превышают определенной величины, б) для компенсации ошибки не требуется третья производная. Чтобы преодолеть затруднения, связанные с ограниченной мощностью, предложено применение *накапливающих (затягивающих) фильтров*, преобразующих импульсные функции в равновеликие воздействия прямоугольной формы. Ошибка при этом сводится к очень небольшой величине [16].

Выполнение условий инвариантности при помощи непосредственной (силовой) компаундирующей связи $l'(p)$

Кроме системы с модулирующим воздействием, можно использовать выбор коэффициентов измерительной компаундирующей связи $l'(p)$ для удовлетворения условий инва-

риантности также в других типах экстремальных систем (автоколебательной и шаговой). Уравнения движения центра колебаний этих систем для переменных θ , U или M можно считать линейными при достаточно малых его отклонениях. Все же при этом встречаются трудности для преодоления инерции сервомотора. Требуется много дифференциаторов возмущений, что не всегда осуществимо на практике. Кроме того, нужно, чтобы сервомотор был линейным (пропорциональным) и чтобы оптимальная характеристика компаундирования объекта была линейной (по крайней мере, для рассматриваемой величины отклонений центра колебаний). Эти трудности не возникают при использовании непосредственной (или силовой) компаундирующей связи $l'(p)$.

Для выбора коэффициентов непосредственной связи используется условие (2"). Для правомочности условия (2") достаточно, чтобы линейными были только уравнения оптимальной характеристики компаундирования объекта и непосредственной компаундирующей связи. Остальные элементы системы (например, сервомотор) *не принимают участия в компенсации ошибки и, следовательно, безразлично, какой вид имеют их уравнения.*

Как и раньше, рассмотрим следующие два случая.

С л у ч а й 1-й. Объект системы состоит из инерционной и нелинейной частей. Уравнение инерционной части объекта

$$M_1 = Y_2(p) [M + l'(p) L].$$

Оптимальная характеристика компаундирования: $M_1 = \xi_1 L$. Из этих уравнений видно, что для того чтобы при изменении L сервомотор не включался, необходимо

$$M = 0, \quad l'(p) = \frac{\xi_1}{Y_2(p)} = l'_0 + l'_1 p + l'_2 p^2 + \dots l'_n p^n.$$

Включение сервомотора может потребоваться только вследствие приближенного характера такого расчета коэффициентов непосредственной компаундирующей связи $l'(p)$.

С л у ч а й 2-й. В некоторых случаях в схеме замещения объекта сначала идет нелинейная, а затем инерционная часть. В таких задачах для полной инвариантности достаточно применить только *жесткую* компаундирующую связь, выбранную в соответствии с оптимальной характеристикой компаундирования.

Уравнения динамики элементов системы имеют при этом вид:

закон регулирования

$$\Sigma = -\theta + l(p)L;$$

усилитель

$$U = Y_4(p)\Sigma;$$

сервомотор:

а) пропорциональный

$$M_1 = Y_1(p) \frac{1}{\rho} U,$$

б) релейный

$$\rho M_1 = \begin{cases} +\alpha_1 & \text{при } U > \Delta \\ 0 & \\ -\alpha_1 & \text{при } U < -\Delta; \end{cases}$$

нелинейная часть объекта

$$(M_1 - M_{10}) = -a(M - \Sigma_{20})^2,$$

где

$$M_{10} = b_0 + b_1 L,$$

$$\Sigma_{20} = c_0 + \beta_0 L - l'_0 L;$$

инерционная часть объекта

$$\Phi = Y_2(p) M_1;$$

дискриминатор

$$\theta = Y_3(p) [M - \Sigma_{20}].$$

Условие инвариантности [при $l(p) = 0$]

$$\beta_0 = l'_0$$

(член $b_1 L$ на смещение экстремума в горизонтальном направлении не влияет, следовательно, ошибки не вызывает).

В случае нелинейности оптимальной характеристики компандирования условие инвариантности будет следующее:

$$\Sigma_{20} = c_0 + \beta_0(L) - l'(L) = \text{const} \text{ или } \beta_0(L) = b'(L).$$

Для удовлетворения такого условия инвариантности достаточно применить нелинейную непосредственную связь $l'(L)$. Выше мы уже рассмотрели методику выбора такой нелинейности и приближенную замену связи по нескольким возмущениям $l'_0(L_1, L_2, L_3 \dots L_n)$ более простой суммой связей

$$l'_0(L_1) + l'_{02}(L_2) + \dots + l'_{0n}(L_n).$$

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИСТЕМ УЛУЧШЕНИЕМ ДЕЙСТВИЯ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Основным законом настройки замкнутого контура комбинированной системы является требование *компромиссной настройки*, при которой коэффициент усиления системы выбирается так, чтобы при достаточной жесткости получить достаточную устойчивость (например, $c_{12} = 0,25$).

Из теории комбинированных систем известно, что компаундирующие связи по основным возмущениям и их производным по времени позволяют устранить (или получить любое значение) переходной ошибки $\Delta_{2\text{осн}}$, вызываемой изменением только основных воздействий. Ошибка $\Delta_{2\text{втор}}$, вызываемая второстепенными возмущениями (помехами), по которым нет связей (или по которым связи осуществлены неточно), не устраняется.

Для уменьшения $\Delta_{2\text{втор}}$ остается один путь — путь рационального выбора передаточных функций замкнутого контура системы [собственно экстремального регулятора и его измерительных связей, т. е. операторов $Y_1(p)$, $Y_2(p)$, $Y_4(p)$, $Y_5(p)$, $m(p)$, $n(p)$, $l'(p)$, $l(p)$ и др.] в соответствии с требованиями компромиссной настройки, производимой, например, по критерию максимальной степени устойчивости [16]. Определение оптимальной передаточной функции может быть произведено также при помощи более сложных статистических методов (например, при наличии помехи — по Н. Винеру).

Напомним, что в системах с сервомотором (к ним относятся и экстремальные системы) мерой жесткости является добротность системы (отношение скорости к ошибке следования), а мерой устойчивости — так называемая степень устойчивости $c_{\text{мин}}$ [16].

Благодаря наличию сервомотора экстремальные системы при $n_0 = 0$ обладают астатизмом 1-го порядка (естественный статизм равен нулю). Необходимость компромиссной настройки в таких системах вытекает из противоречия между величиной переходной ошибки Δ_2 и ошибкой следования Δ_4 , вызываемых линейным изменением возмущений, по которым нет компаундирующих связей. Для уменьшения ошибки следования приходится сознательно идти на некоторое увеличение переходной ошибки, возникающей при изменении скорости следования.

Методы компромиссной настройки и статистические методы используются в одном и том же этапе исследования

комбинированной системы: при решении задачи выбора схемы и параметров контуров обратных связей, хотя они совершенно различны и часто дают противоречивые результаты¹.

В ряде практических систем (как пропорциональных, так и релейных) с модулирующим воздействием наблюдается слабое затухание процессов установления положения центра колебания и даже потеря устойчивости (автоколебания центра поисковых колебаний). Возможности выбора передаточной функции пропорциональной обратной связи с ЭЛД до некоторой степени ограничены: заранее известно, что регулятор должен быть астатичным (передаточная функция разомкнутой системы содержит в знаменателе множитель p). Однако для улучшения динамических свойств замкнутого контура системы с ЭЛД можно многое сделать. Мы упоминали уже, например, о введении в регулирование второй производной $p^2\varphi$, повышающей быстродействие системы и снижающей амплитуду поисковых колебаний. В данном случае

$$m(p)\varphi = m_1 p\varphi + m_2 p^2\varphi, \quad Y_3(p) = \alpha_4 + \alpha_{41}p.$$

Можно поставить вопрос шире и найти оптимальные операторы измерительных связей $m(p)$ и $n(p)$, сервомотора $Z_1(p)$ и объекта регулирования $Z_2(p)$. Возникает также вопрос о выборе рациональной операторной функции связи, осуществляемой тахогенератором $Y_3(p)p$, которая также только в простейшем случае ограничивается одной первой производной.

При этом в большинстве систем оказывается, что увеличение быстродействия и уменьшение переходной ошибки $\Delta_{2\text{втор}}$ приводит к увеличению ошибки следования Δ_4 системы (ошибки по скорости), возникающей, например, при равномерном изменении возмущений во времени: $\lambda_{\text{втор}} = vt$. *Компромиссная настройка* предусматривает такой выбор схемы и параметров всех элементов, входящих в замкнутый контур системы, при котором за счет некоторого снижения быстродействия и увеличения переходной ошибки достигается уменьшение ошибки следования Δ_4 экстремальной системы.

¹ Так, например, для системы второго порядка компромиссная настройка отвечает коэффициенту затухания $c_{12} = 0,25$ [16]. Статистические методы при малом уровне помех дают оптимальные решения, отвечающие значительно меньшим значениям коэффициента затухания или даже неустойчивым системам.

УЛУЧШЕНИЕ ДЕЙСТВИЯ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ С СЕРВОМОТОРОМ ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТИ ПРИ ПОМОЩИ УСТРОЙСТВА ФОРСИРОВКИ (ИЗОДРОМА)

Для повышения быстродействия релейной системы с постоянной скоростью сервомотора можно рекомендовать применение *устройства форсировки* (называемого также изодромом), действие которого и метод расчета описаны в нашей работе [16].

В системе экстремального регулирования с модулирующим воздействием и с устройством форсировки повышение устойчивости и улучшение формы переходных процессов достигается применением независимого смещения, которое включается одновременно с двигателем и ускоряет его отключение. Изменение смещения во времени выбирается так, чтобы получить заданное качество процессов. Такой независимый генератор смещения носит название устройства форсировки.

Схема регулирования с устройством форсировки дана на рис. 89. Устройство форсировки состоит из зарядной (R_{14}, C_8) и разрядной (C_8, R_9) цепей конденсатора. Разрядная цепь включает в себя также дополнительную обмотку трехпозиционного поляризованного реле *РП*.

Действие устройства форсировки состоит в следующем.

При включении двигателя одновременно включается и цепь заряда конденсатора C_8 ; напряжение на нем возрастает, и пропорционально ему увеличивается ток дополнительной обмотки реле *РП*. Последняя включена навстречу основной обмотке, поэтому отключение сервомотора произойдет раньше, чем при отсутствии устройства форсировки, что и предотвращает перерегулирование.

После отключения сервомотор продолжает некоторое время вращаться по инерции. Постоянная времени цепи разряда реле может быть выбрана такой, что при этом система будет удерживаться от новых включений двигателя до полной его остановки, т. е. будет реагировать на заданное изменение возмущения на постоянную величину однократным включением сервомотора.

Практически, путем выбора постоянных времени устройства форсировки, знака и величины напряжения его питания можно получить в системе переходные процессы следующих типов:

а) скользящий переход, при котором двигатель включается несколько раз в одном направлении;

б) однократное включение двигателя (аперiodический процесс);

в) два-три включения в разных направлениях;

г) колебательный процесс с многократными включениями двигателя в противоположных направлениях.

Наиболее коротким (оптимальным) является переходный процесс настройки на два-три включения, к чему и следует стремиться на практике. Расчет параметров системы легче всего выполнить на однократное включение двигателя. Незначительное изменение постоянной времени цепи разряда конденсатора позволяет перевести систему из настройки «однократное включение» на настройку «два-три включения двигателя».

Метод расчета параметров систем автоматического регулирования с устройством форсировки на однократное включение двигателя изложен в работе [16]. Применим его для расчета устройства форсировки системы, изображенной на рис. 89.

Пример 1. Выбор схемы и расчет параметров устройства форсировки при объекте регулирования, описываемом уравнением первого порядка.

Составим уравнение динамики элементов системы:
закон регулирования

$$\Sigma_1 = -m_0\varphi + \Sigma_3(t);$$

сервомотор

$$p\mu = F(\Sigma_1) = \begin{cases} +\alpha_1 & \text{при } \Sigma_1 > \Delta \\ 0 & \\ -\alpha_1 & \text{при } \Sigma_1 < -\Delta; \end{cases}$$

объект регулирования

$$(\tau_2 p + 1)\varphi = \alpha_2\mu_1 - \beta_2\lambda,$$

где Δ — зона нечувствительности сервомотора;

Σ_1 — сумма ампер-витков трехпозиционного реле;

$m_0\varphi$ — ампер-витки обмотки, питаемой от нелинейного моста;

Σ_3 — ампер-витки обмотки, питаемой от устройства форсировки;

μ_1 — открытие регулирующего элемента;

α_1 — скорость открытия;

τ_2 — постоянная времени объекта регулирования.

Дальнейший ход синтеза схемы устройства форсировки и расчета параметров точно совпадает с примером расчета, приведенным в работе [16].

Пример 2. Выбор схемы и расчет параметров устройства форсировки при объекте первого порядка с постоянным отставанием.

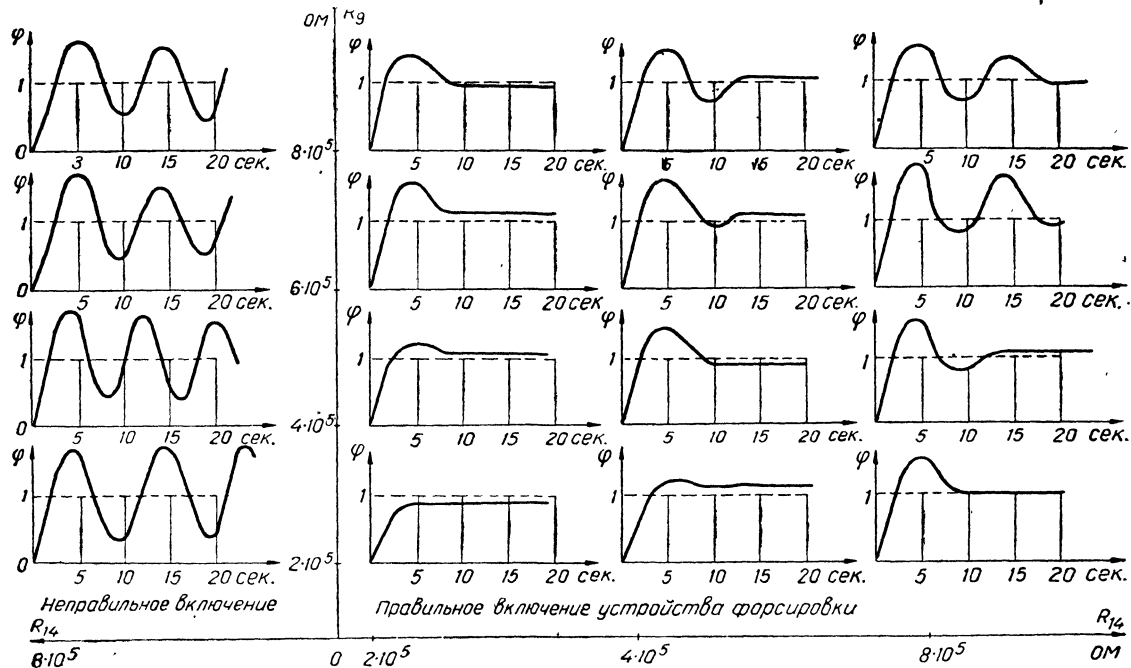


Рис. 94. Зависимость формы переходных процессов в системе с модулирующим воздействием от выбора сопротивлений устройства форсировки R_9 и R_{14} (при $U = 300$ в и $C_8 = 10$ мкф).

Как видно из рис. 89, элемент, который мы назвали выше объектом регулирования, включает в себя воздухопровод, топку, синхронный детектор и сглаживающий фильтр. Только в случае, когда постоянная времени топки очень велика, можно воспользоваться уравнением динамики объекта, принятым выше. Если же осциллограммы показывают наличие затягивания переходных процессов в их начале, более точно будет описать объект уравнением динамики, содержащим оператор отставания $e^{-\tau}L^p$. Тогда получим такую систему исходных уравнений:

закон регулирования

$$\Sigma_1 = -m_0\varphi + \Sigma_3(t);$$

сервомотор

$$p\mu_1 = F(\Sigma_1) = \begin{cases} +\alpha_1 & \text{при } \Sigma_1 > \Delta \\ 0 & \\ -\alpha_1 & \text{при } \Sigma_1 < -\Delta; \end{cases}$$

объект регулирования

$$(\tau_2 p + 1)\varphi = (\alpha_2\mu_1 - \beta_2\lambda)e^{-\tau}L^p.$$

Выбор схемы и расчет параметров устройства форсировки для этого случая также описан в работе [16]. Оказывается, что при наличии отставания требуется либо вводить реле времени в устройство форсировки, либо применять фильтр.

На рис. 94 представлены экспериментально полученные осциллограммы переходных процессов в экстремальной системе при постоянном коэффициенте усиления $a_p = \text{const}$ и при одном и том же возмущении $\lambda = [1]$, где объектом регулирования служил магнитный усилитель с постоянной времени около 0,25 сек. Из этого рисунка видно, что действительно выбор сопротивлений R_9 и R_{14} значительно влияет на форму переходных процессов в системе. Опыты подтвердили правильность метода расчета параметров устройства форсировки.

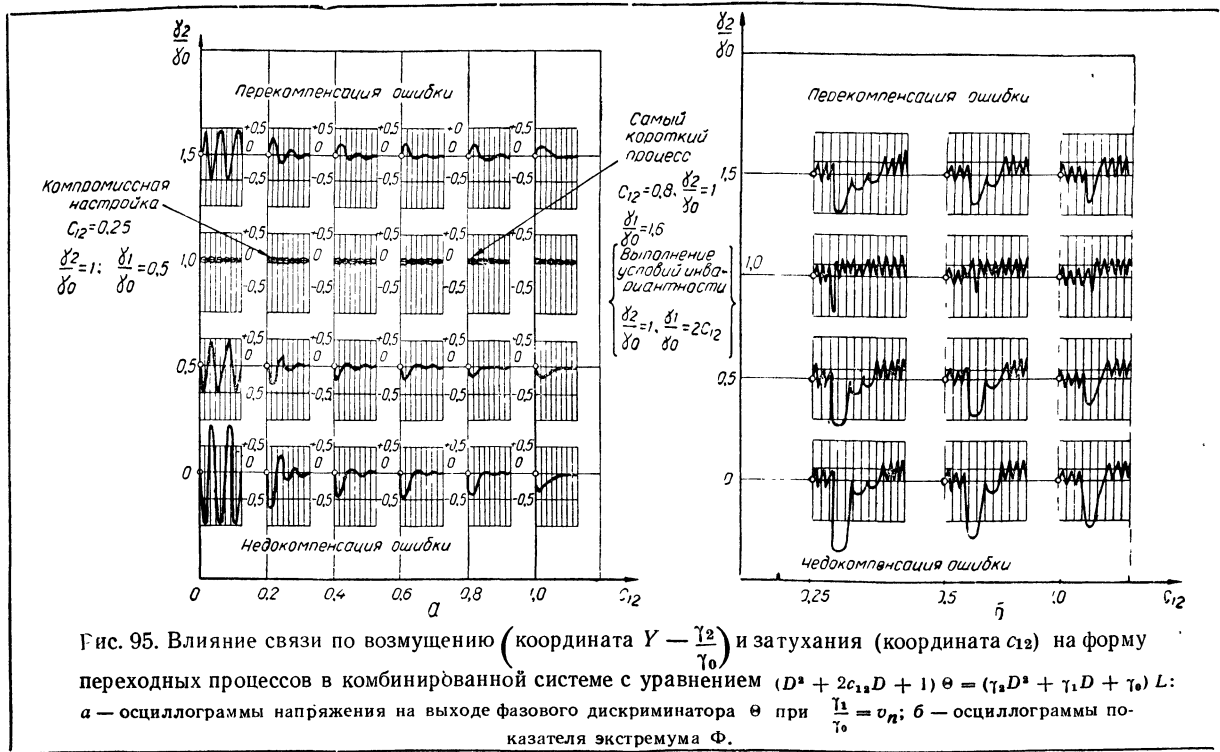
Заметим, что применение устройства форсировки целесообразно только при большой инерции объекта (постоянная времени τ_2) и при большой скорости регулирования. Достижение большой скорости регулирования при сохранении устойчивости оправдывает название устройства.

ОРТОГОНАЛЬНОСТЬ (НЕЗАВИСИМОСТЬ) ДВУХ ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ

При выполнении полученных ранее условий:

- 1) $\lambda \neq f(\varphi)$, т. е. $Z(p) = \infty$, или
- 2) $b_3(p) = \beta(p) + l'(p) + Y_1(p)Y_2(p)l(p) = 0$

методы повышения точности и быстродействия путем улучшения компаундирующих связей по возмущениям связаны с выбором коэффициентов правой части уравнения динамики системы, а путем улучшения замкнутого



контура системы — с выбором коэффициентов его левой части (рис. 95).

Таким образом, указанные выше две принципиально различные группы способов повышения точности взаимно независимы, *ортогональны*, строго говоря, только в системах, где небольшие изменения регулируемой величины φ не влияют на основные возмущения λ , т. е. где $\lambda \neq f(\varphi)$, а также в системах, настроенных по условиям инвариантности, где $\varphi \equiv 0$.

Методика использования условий инвариантности для выбора значений параметров системы, варьируемых при настройке, основана на излагаемых ниже положениях, вытекающих из свойства ортогональности.

Допустим, что на комбинированную систему регулирования, имеющую замкнутые отрицательные и разомкнутые компаундирующие связи, действует основное возмущение λ_1 и второстепенное возмущение (помеха) λ_2 . Тогда линеаризованное уравнение динамики системы будет иметь вид

$$a_3(p) \varphi = b_3(p) \lambda_1 + b_3^*(p) \lambda_2.$$

На основании принципа суперпозиции мы можем задачу выбора значений параметров системы разбить на две части:

для основного возмущения

$$a_3(p) \varphi_1 = b_3(p) \lambda_1;$$

для помехи

$$a_3(p) \varphi_2 = b_3^*(p) \lambda_2,$$

где

$$\varphi_1 + \varphi_2 = \varphi;$$

φ_1 — ошибка системы от основного возмущения;

φ_2 — ошибка, вызываемая помехой.

Для выбора значений параметров замкнутых обратных связей, входящих в $a_3(p)$, вместо неоднородного уравнения

$$a_3(p) \varphi_2 = b_3^*(p) \lambda_2$$

достаточно исследовать (например, на максимум степени устойчивости [16]) однородное уравнение свободных движений (левую часть)

$$a_3(p) \varphi_2 = 0$$

Основанием для этого служат следующие соображения:
а) второстепенных воздействий помех очень много и каждое из них имеет различные эквивалентные начальные условия [16];

б) многие помехи имеют много входов и практически нельзя определить их эквивалентные начальные условия;

в) помехи мало влияют на выходную величину и поэтому достаточно ограничиться приближенным исследованием.

Для выбора значений параметров разомкнутых компандирующих связей достаточно рассмотреть уравнение (правую часть)

$$a_3(p) \varphi_1 = b_3(p) \lambda_1,$$

где параметры $a_3(p)$ уже известны из предыдущего. На этом этапе удобно применить условие инвариантности с тем, чтобы получить тождественно нулевые эквивалентные начальные условия:

$$\Phi_{10} = 0; \quad \Phi'_{10} = 0; \quad \Phi''_{10} = 0; \quad \Phi'''_{10} = 0 \dots$$

и, следовательно $\varphi_1 \equiv 0$.

Метод, известный под названием метода «по частям» [16], собственно, и состоит в том, что схема и параметры замкнутого контура обратной связи (входящие в левую часть уравнения динамики системы) выбираются в соответствии с критериями, обеспечивающими некоторую компромиссную настройку, а схема и параметры разомкнутых компандирующих связей (входящие только в правую часть уравнения динамики системы) выбираются по условиям инвариантности. Тот и другой выбор *не влияют друг на друга*, они ортогональны [16], или, как еще говорят, не имеют взаимной корреляции, если выполняется одно из указанных выше двух условий. Влияние компандирующей связи $l(p)$ на устойчивость невелико, поэтому даже в случае значительного отклонения от этих условий настройка комбинированных систем (как основных, так и вторичных кибернетических) может производиться методом «по частям»: сначала максимально улучшается контур обратной связи, а затем — цепи компандирующих связей по возмущениям и помехам.

Для случая, когда $\lambda = f(\varphi)$, в работе [16] разработан вариант метода выбора параметров «по частям», сводящийся к ряду последовательных приближений. В первом приближении предполагаем, что связи $\lambda = f(\varphi)$ нет, в

последующих приближениях учитываем эту связь все в большей и большей степени. При настройке системы по условиям инвариантности первое приближение сразу дает точный ответ и связь $\lambda = f(\varphi)$ не влияет на выбор схемы и оптимальных значений параметров системы (так как при этом $\varphi \equiv 0$).

Можно продемонстрировать ортогональность методов повышения точности на примере системы экстремального регулирования с модулирующим воздействием, уравнения динамики которой (при пренебрежении поисковыми колебаниями), как было показано выше, в первом приближении не отличаются от уравнений обычной системы регулирования (см. рис. 93).

Пусть, например, уравнения динамики элементов имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \Sigma &= -m_0\theta - n_0\mu + (l_0 + l_1\rho + l_2\rho^2)\lambda; \\ \rho\mu &= \alpha_2\Sigma; \\ (\tau\rho + 1)\theta &= \alpha_1\mu - \beta\lambda + l'_0\lambda, \end{aligned}$$

где

$$\lambda = \nu t \quad \text{при} \quad t > 0.$$

Исключая промежуточные переменные Σ и μ , получим уравнение динамики системы второго порядка

$$(\rho^2 + a_1\rho + a_0)\theta = (b_2\rho^2 + b_1\rho + b_0)\nu t,$$

где

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{1 + n_0\alpha_2\tau}{\tau}; & b_2 &= \frac{\alpha_1\alpha_2 l'_2}{\tau}; \\ a_2 &= \frac{\alpha_2 n_0 + \alpha_1\alpha_2 m_0}{\tau}; & b_1 &= \frac{\alpha_1\alpha_2 l'_1 - (\beta - l'_0)}{\tau}; \\ \rho &= \frac{d}{dt}; & b_0 &= \frac{\alpha_1\alpha_2 l'_0 - n_0\alpha_2(\beta - l'_0)}{\tau}. \end{aligned}$$

Вводя безразмерный отсчет времени $t = \omega_0 T$, где $\omega_0 = \sqrt{a_0}$, получим уравнение динамики системы в таком общем виде:

$$(D^2 + 2c_{12}D + 1)\theta = (\gamma_2 D^2 + \gamma_1 D + \gamma_0)\lambda,$$

$$\text{где при } \begin{cases} t < 0 & \lambda = 0, \\ t > 0 & \lambda = T, \end{cases} \quad D = \frac{d}{dT}.$$

Решение этого уравнения имеет вид [16]:

$$\theta(t) = \gamma_0 T - (2\gamma_0 c_{12} - \gamma_1) + e^{-c_{12} T} [(2\gamma_0 c_{12} - \gamma_1) \cos \sqrt{1 - c_{12}^2} \cdot T + \frac{c_{12} (2\gamma_0 c_{12} - \gamma_1) + \gamma_2 - \gamma_0}{\sqrt{1 - c_{12}^2}} \sin \sqrt{1 - c_{12}^2} \cdot T],$$

где $\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2$ — параметры правой части, зависящие от коэффициентов связей по возмущению λ и его производным;

c_{12} — коэффициент затухания системы, входящий в левую часть уравнения. При $2c_{12} = \frac{\gamma_1}{\gamma_0}$ ошибка следования равна

$$\Delta_4 = 2\gamma_0 c_{12} - \gamma_1 = 0.$$

Ряд решений уравнения для разных значений $x = 2c_{12} = \frac{\gamma_1}{\gamma_0}$ и $y = \frac{\gamma_2}{\gamma_0}$ изображен на рис. 95. Из рисунка отчетливо видно, что выбор x определяет затухание колебаний, а выбор y — начальные условия (начальную амплитуду). Выбор x не связан с выбором y . В частности, при $y = \frac{\gamma_2}{\gamma_0} = 1$ устраняется не только установившаяся ошибка, но и переходная, т. е. достигается инвариантность системы в отношении данного основного возмущения λ .

Выполнение условий инвариантности сводится к выбору параметров, входящих только в правую часть уравнения динамики, т. е. к выбору так называемых эквивалентных начальных условий [16].

Выше было показано, что принципиальные схемы кибернетических систем с автоматическим самоизменением уставки, программы, параметров, нелинейностей, структуры, алгоритмов, вероятностных характеристик, импульсов, области самоотключения и других характеристик аналогичны между собой.

Имеется также аналогия теории комбинированных систем автоматического регулирования с постоянными характеристиками и теории комбинированных систем с самоизменением характеристик.

Первая аналогия дала возможность разработать общую теорию кибернетических систем, а вторая указала основные направления разработки этой общей теории.

Сравнение способов повышения точности комбинированных систем стабилизации, следящих систем с постоянными

характеристиками и комбинированных экстремальных систем с переменными характеристиками показало, что как в тех, так и других системах понятия о составляющих ошибки системы аналогичны. Поисковые колебания экстремальной системы хотя и являются ее отличием, но не меняют существенно общей методики исследования точности. Основные идеи повышения точности систем одинаковы. Способы повышения точности комбинированных систем как обычных, так и кибернетических можно разделить на две принципиально различных части.

1. Способы уменьшения (и полного устранения) ошибки, вызываемой *основными возмущениями*, на основе применения условий инвариантности. Условия инвариантности для установившегося режима в экстремальных системах осуществляются выбором оптимальных характеристик компаундирования по основным возмущениям, а для переходных режимов (во всех перечисленных выше системах) применением компаундирующих связей по основным возмущениям и их производным по времени.

2. Способы уменьшения ошибки, вызываемой *второстепенными возмущениями* (помехами), по которым нет компаундирующих связей. Эти способы сводятся к выбору схемы и параметров замкнутого контура системы.

Для систем стабилизации и следящих систем обычного типа здесь применяется компромиссная настройка (критерий максимальной степени устойчивости) или статистические методы.

В частном случае, когда объектом кибернетического управления является система регулирования, компромиссная настройка или статистические методы могут применяться дважды: первый раз — для основной системы, второй раз — для кибернетического регулятора¹.

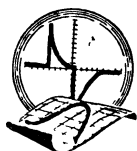
Для экстремальных систем существует еще отдельная задача уменьшения ошибки, вызываемой поисковыми колебаниями. Выше мы показали некоторые способы уменьшения этой ошибки (связь по второй производной $p^2\varphi$, выбор частоты вынужденных колебаний, повышение чувствительности реле $\frac{1}{\Delta U}$ и др.).

В случае, когда небольшие изменения регулируемой

¹ Предполагается, что основная система регулирования и контур кибернетического управления имеют значительное различие по быстродействию (по частоте колебаний).

величины (показателя экстремума) не влияют на основное возмущение, а также при настройке системы по условиям инвариантности, две указанные группы методов повышения точности взаимно независимы (ортогональны) и не исключают, а наоборот, взаимно дополняют друг друга. На этом основан способ выбора схемы и настройки комбинированной системы «по частям» [16].

Комбинированная система дает возможность повышать точность как улучшением связей по основным возмущениям, так и улучшением действия замкнутого контура системы, уменьшающего влияние всех остальных возмущений и помех, по которым нет компаундирующих связей.



Глава IX

ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ

ВЫБОР СХЕМЫ СИСТЕМ И СПЕЦИАЛЬНЫЕ СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ

В гл. VIII были рассмотрены корректирующие следящие системы, находящиеся под действием знакопеременного сигнала. В данной главе рассматривается случай одновременного действия как знакопеременного сигнала, так и помехи (шума). Формулируются основные правила выбора принципиальных схем: сначала для обычных комбинированных систем, а затем — для кибернетических. Эти правила еще раз показывают, что теория комбинированных систем применима для всех систем регулирования как обычных, так и кибернетических. Уменьшение действия помех может быть достигнуто применением интегрирования по способу «чересполосицы» или применением коррелятора. Оба способа дают один и тот же результат. Коррелятор устраняет влияние помех по такому же принципу, как и синхронный детектор в радиотехнике или телемеханике. Основные практические выводы гл. IX состоят в разработке и указании преимуществ системы экстремального регулирования с модулирующим воздействием, использующей коррелятор, сервомотор постоянной скорости и устройства форсировки (называемого иногда также изодромом).

ОБЫЧНЫЕ СИСТЕМЫ С ПОСТОЯННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ КАК ОБЪЕКТЫ КИБЕРНЕТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Четкой границы между кибернетическими системами регулирования с самоизменением уставки, программы, параметров, нелинейных характеристик, алгоритмов преобра-

зования, вероятностных характеристик, структуры и области действия систем автоматического регулирования в соответствии с изменениями условий работы нет. Если, например, в системе происходит самоизменение уставки путем изменения сопротивлений нелинейного измерительного моста, то, очевидно, что такую систему с равным правом можно назвать как системой с самоизменением уставки, так и системой с самоизменением параметров.

Некоторые из перечисленных выше основных типов кибернетических систем часто могут быть объединены в одной системе. Так, возможно объединение системы с самоизменяющимися параметрами (например, с самоизменяемой постоянной времени какого-либо элемента) и системы с самоизменяющейся нелинейностью (например, с самоизменяющейся зоной нечувствительности). Регулирование может быть непрерывным или дискретным. В последнем случае сравнивается между собой ряд конкретных значений постоянной времени или ширины зоны нечувствительности.

Некоторые кибернетические системы регулирования работают при действии помех, которые часто могут быть заданы как стационарные статистические функции времени.

В таком объекте регулирования кибернетической системы может быть применено как самоизменение параметров или нелинейных характеристик, так и структуры. Таким образом, эти кибернетические системы имеют много общего в области своего применения. Наряду с этим системы с самоизменением параметров, нелинейных характеристик и структуры имеют много и совершенно различных примеров применения. Некоторые из них мы рассмотрели выше.

Здесь мы рассмотрим общую задачу повышения точности систем автоматического регулирования, находящихся под действием помех, как практически важную и наглядно иллюстрирующую применение общей теории комбинированных систем регулирования к обычным, а затем и к кибернетическим системам автоматического регулирования и управления.

Обычными системами автоматического регулирования мы называем системы, у которых уставка, программа, значение параметров, закономерность нелинейностей и алгоритмы, структура и другие характеристики системы не изменяются в процессе работы, а *устанавливаются человеком при пуске системы в ход*.

Такие системы с постоянными характеристиками могут служить, в свою очередь, объектом применения кибернетического управления, придающего системе свойство самоизменения тех или иных характеристик с целью приспособления к изменению условий работы. В данной главе мы рассмотрим приспособление этих систем к изменению спектральной плотности как основного возмущения — входного сигнала или задания $\Psi(t)$ для следящих систем, или нагрузки $L(t)$ для систем стабилизации, — так и спектральной плотности помех $N(t)$, действующих на систему одновременно с заданием или нагрузкой. Таким образом, обычные системы с постоянными характеристиками рассматриваются как объект кибернетического управления.

СИСТЕМЫ ОБЫЧНОГО ТИПА С ПОСТОЯННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ, УПРАВЛЯЕМЫЕ ПО ВОЗМУЩЕНИЯМ

Прежде чем приступить к изучению кибернетических задач самоизменения характеристик, необходимо ясно представить объект управления — систему обычного типа.

На рис. 96 и 97 показаны три типа обычных следящих систем и систем стабилизации: а) разомкнутые, управляемые по возмущениям, б) замкнутые, с обратной связью,

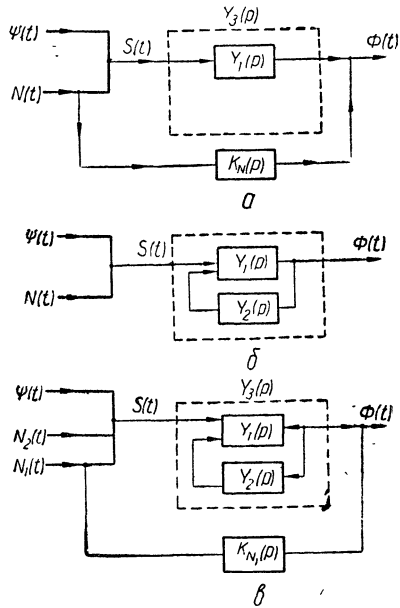


Рис. 96. Основные способы повышения точности обычных следящих систем, находящихся под действием помех:

а — разомкнутая следящая система, в которой ошибка, вызываемая помехой $N(t)$, устраняется при помощи компенсирующей связи $K_N(p)$. б — следящая система с обратной связью, в которой ошибка, вызываемая помехой $N(t)$, может быть уменьшена до минимума путем выбора

$$Y_2(p) = \frac{Y_1(p)}{1 + Y_1(p) Y_3(p)} \approx \frac{1}{Y_3(p)}$$

в — комбинированная система, в которой ошибка от помехи $N_1(t)$ устраняется полностью, а ошибка от $N_2(t)$ сводится к минимуму.

управляемые по регулируемой величине, в) комбинированные. На этих же рисунках указаны основные способы

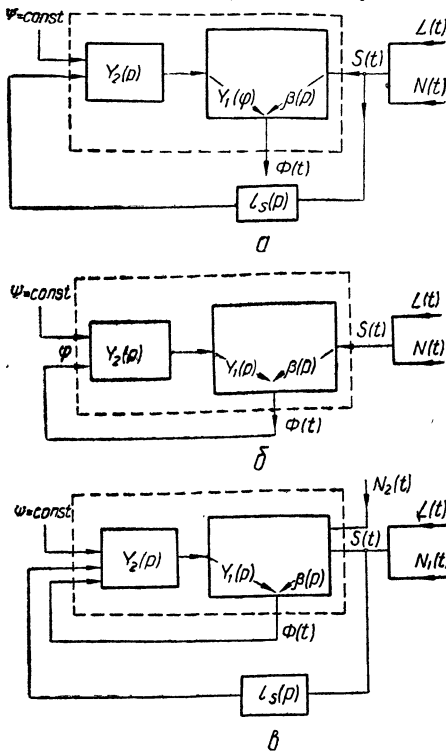


Рис. 97. Основные способы повышения точности обычных систем стабилизации, находящихся под действием помех:

а — разомкнутая система стабилизации, в которой ошибка, вызываемая $S(t)$, может быть полностью устранена при помощи компаундирующей связи $L_s(p)$; б — система стабилизации с обратной связью, в которой ошибка, вызываемая $S(t)$, может быть уменьшена до минимума путем выбора $Y_1(p) = \frac{1}{1 + Y_1(p)Y_2(p)}$; в — комбинированная система стабилизации, в которой ошибки от нагрузки $L(t)$ и помехи $N_1(t)$ устраняются полностью, а ошибка от помехи $N_2(t)$ сводятся к минимуму.

схему управления по возмущению (рис. 96,а и 97,а).

При помощи компаундирующих связей по помехе $k_N(p)$ или $L_s(p)$ можно получить ошибку, вызываемую этой поме-

вышения точности этих систем при действии помех.

Применение одного из двух указанных принципов управления либо их комбинации в значительной степени зависит от того, возможно ли практически измерение помех (части их) или невозможно.

Помехи вызывают появление ошибки системы, что снижает ее точность. Например, для следящей системы (рис. 96,б) ошибка равна

$$\varphi = \Phi(t) - \Psi(t) = \\ = \Phi(t) - S(t) + N(t).$$

Если помеха $N(t) = N_1(t) + N_2(t)$ может быть измерена и параметры четырехполюсника $Y_1(p)$ достаточно стабильны, а характеристики достаточно линейны, нет необходимости в применении контура обратной связи. В этом случае достаточно применить разомкнутую

кой любого знака и любой величины. Пользуясь условиями инвариантности, можно выбрать схему и параметры этих компаундирующих связей так, что полностью устраняется влияние помехи $N(t)$ на выходной сигнал. Мы полагаем, что читатель знаком с условиями инвариантности во всех четырех формах [16]. В работе [15] показано, что эти условия сохраняют свою силу и при статистическом задании возмущений.

Для системы (рис. 96,а) справедливо уравнение

$$\Phi(t) = k_N(p) N(t) + Y_1(p) N(t) + Y_1(p) \Psi(t).$$

Для полного устранения влияния помехи $N(t)$ на выходной сигнал $\Phi(t)$ системы при нулевых начальных условиях [16] необходимо и достаточно, чтобы выполнялось следующее условие инвариантности для следящей системы:

$$k_N(p) = -Y_1(p).$$

Это выражение дает исчерпывающие указания для синтеза схемы и выбора параметров компаундирующей связи $k_N(p)$.

Для системы стабилизации (рис. 97,а), где помеха $N(t)$ действует как часть возмущения $L(t)$, устранение влияния помехи сводится к устранению влияния их суммы $S(t) = L(t) + N(t)$. Здесь условия инвариантности действуют в точно таких же четырех формах, как и при отсутствии помехи $N(t)$. Так, например, наиболее сильную (вторую) форму мы получим, если потребуем, чтобы в уравнении динамики системы

$$\Phi = [Y_1(p) Y_2(p) l_S(p) - \beta(p)] S(t)$$

оператор правой части (при нулевых начальных условиях) был равен нулю.

Отсюда находим условие инвариантности для системы стабилизации

$$\Phi = 0 \text{ при } l_S(p) = \frac{\beta(p)}{Y_1(p) Y_2(p)}.$$

Заметим что, как видно из рис. 97, в системах стабилизации не возникает необходимость в отдельном измерении помехи $N(t)$. Нагрузку объекта и помеху можно измерять вместе.

СИСТЕМЫ ОБЫЧНОГО ТИПА С ПОСТОЯННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ, УПРАВЛЯЕМЫЕ ПО РЕГУЛИРУЕМОЙ ВЕЛИЧИНЕ

Если помеха $N(t) = N_1(t) + N_2(t)$ не может быть измерена и поэтому указанные выше условия инвариантности во второй форме не могут быть использованы, то необходимо применять замкнутые системы с обратной связью (см. рис. 96, б и 97, б).

Схемам регулирования с обратной связью посвящено, пожалуй, 99% всей литературы по автоматическому регулированию и, естественно, мы не можем здесь даже кратко изложить все положения теории систем с обратной связью. Нас будут интересовать только некоторые вопросы этой теории, такие, например, как настройка системы на минимум среднеквадратичной ошибки, вопросы компромиссной настройки, способы изменения статистической характеристики системы и некоторые другие.

Как указывалось уже выше, для выбора схемы и параметров контуров обратной связи применяются либо методы компромиссной настройки, либо статистические методы. Компромиссной называется настройка, при которой переходная ошибка заведомо увеличивается для того, чтобы установившаяся ошибка (или ошибка следования) не была слишком велика. Компромиссная настройка не нужна в многоконтурных системах, имеющих достаточное число контуров [16]. В тех случаях, когда почему-либо не удастся применить статистические методы, приходится возвращаться к этому испытанному критерию выбора значений варьируемых параметров.

Вывод расчетных формул критерия максимальной степени устойчивости для систем любого порядка так называемым обратным методом можно найти в работе [16].

Методы компромиссной настройки и статистические методы учета помех в большинстве случаев дают резко отличающиеся результаты. Так, например, при выборе параметров усилителя обратной связи, описываемого уравнением второго порядка, метод компромиссной настройки дает весьма устойчивую систему с коэффициентом относительного затухания порядка $c_{12} = 0,25$ [16].

В этой же задаче в случае малого уровня помех статистические методы дают слишком большое значение частоты

среза, т. е. слабоустойчивую или даже неустойчивую систему.

Несмотря на это различие результатов, оба метода необходимо рассматривать вместе, так как они применяются в одном и том же случае для выбора характеристик обратной связи. Исходя из конкретных условий или из своего опыта, исследователь может выбрать тот или другой метод для выполнения данного этапа исследования комбинированной системы управления как обычного типа, так и кибернетических.

Применение статистических методов к выбору схемы и параметров контура обратной связи следящих систем

В случае, когда полезный сигнал $\Psi(t)$ и помеха $N(t)$ не влияют друг на друга и имеют известные автокорреляционные функции и спектральные характеристики, передаточная функция линейной системы $Y_3(p)$, дающая *минимальную среднеквадратичную ошибку*, может быть определена статистическими методами, например по методу Н. Винера (см. стр. 347).

Аналогичная задача существует в теории связи. Фильтры в системе дальней телефонной связи проектируются так, чтобы они пропускали определенный диапазон звуковых частот.

Эти фильтры одновременно неизбежно пропускают и некоторые составляющие помехи. Показателем качества φ телефонной связи является так называемый коэффициент артикуляции, равный отношению числа правильно понятых на приемном конце слов к общему числу слов сообщения

$$\varphi = \frac{\text{правильно поняты слова}}{\text{общее число слов}} \%$$

Регулирующим воздействием может служить диапазон пропускаемых системой телефонной связи частот

$$\mu = \omega_{\text{макс}} - \omega_{\text{мин}} \quad (\text{обычно } \omega_{\text{мин}} \approx 0).$$

Если слишком уменьшить диапазон μ , то коэффициент артикуляции падает. При слишком широкополосном усилении этот коэффициент *также снижается* (рассматривается случай наличия помех типа «белого шума», т. е. таких, энергия которых постоянна на всех частотах $N(\omega) = a^2 = \text{const}$).

Существует некоторое оптимальное значение ширины полосы пропускания частот, при которой артикуляция максимальна¹.

Таким образом, характеристика $\varphi = f(\mu)$ имеет экстремальный характер, причем экстремальная точка ее перемещается на плоскости $\varphi - \mu$ при изменении спектра шума и спектра полезного сигнала.

Применение статистических методов к исследованию систем автоматического регулирования связано с работами В. В. Солодовникова, А. А. Пугачева, Ю. П. Леонова, а также Н. Винера, Р. Филлипса. Л. Заде, И. Рагазини, Ж. Дютиля и др. Основные усилия в этих работах направлены на получение выражения для оптимальной передаточной функции (или импульсной переходной функции) следящей системы, находящейся под одновременным действием полезного сигнала $\Psi(t)$ и помехи $N(t)$, при которой среднеквадратичная ошибка системы минимальна. Кроме того, в ряде работ (например, у Заде и Рагазини) накладывается еще так называемое условие несмещения, по которому требуется, чтобы после краткого переходного процесса (свободная составляющая ошибки не рассматривается) ошибка системы была равна нулю (при отсутствии помехи)

при $t \geq T$ и $N(t) = 0$ было $\Phi(t) = \Psi(t)$.

Заметим, что требование несмещенности Заде и Рагазини может быть выполнено только в системах с компаундирующими связями. Действительно, все существующие следящие системы могут быть разделены на:

а) обычные системы без компаундирующих связей, в которых $k(p) = k_0$ и требование несмещенности не может быть выполнено, так как обязательно имеется ошибка следования, например, при

$$\Psi(t) = \Psi_m \sin \omega t \quad \Phi(t) = \Phi_m \sin(\omega t + \beta);$$

б) системы с компаундирующей связью по первой производной от сигнала $k(p) = k_0 + k_1(p)$, где может быть

¹ Коэффициент артикуляции зависит не только от полосы пропускания частот, но и от формы верхней части частоты характеристики. Но говоря о поле частот, мы подчеркиваем главный фактор, так как практически в полосе пропускания частотная характеристика усиления почти горизонтальна.

выполнено требование несмещения (например, при $\Psi(t) = \sin \omega t$ и $\Phi(t) = \Phi_m \sin \omega t$);

в) системы с более сложными компаундирующими связями по входному сигналу (например $k(p) = k_0 + k_1 p = k_2 p^2$), где может быть устранена не только установившаяся ошибка следования, но и переходная ошибка в соответствии с условиями инвариантности [16]. По-видимому, условие несмещения может быть выполнено только в небольшой группе систем, указанных в пунктах «б» и «в».

В применении к линейным следящим системам в настоящее время разработаны способы решения задачи выбора схемы и параметров контура обратной связи, дающих минимум ошибки для случая, когда полезный сигнал является либо случайной функцией времени, либо суммой случайных и неслучайных функций времени

$$\Psi(t) = \sum_{n=k}^{n=1} a_n \varphi_n(t)$$

(где $\varphi_n(t)$ — линейно-независимые, интегрируемые функции времени), а помеха $N(t)$ является стационарной случайной функцией времени, математическое ожидание которой равно нулю

$$M[N(t)] = 0.$$

В такой постановке задача решается до конца, причем имеет одно единственное решение: при заданных $\Psi(t)$ и $N(t)$ имеется только одна структура следящей системы и, следовательно, одна оптимальная проводимость системы $Y_3(p)$ и одна функция веса $W(t)$, при которой выполняются поставленные требования (минимум ошибки и др.). Единственность решения доказывается соответствующей теоремой из функционального анализа. По методу Винера (в работах М. Пелегрена [2] и Е. Барта [73]) получены, например, такие результаты¹ (табл. 12).

Как видно из табл. 12, выражения для оптимальной передаточной функции $Y_3(p)$ можно легко использовать для получения оптимальных характеристик компаундирования кибернетических систем.

¹ Эксперименты показывают, что минимум ошибки достигается при несколько (на 10 ÷ 15%) меньшем значении коэффициента усиления a_p , что может быть объяснено наличием свободной составляющей ошибки.

Таблица 12

Оптимальные характеристики компаундирования для двух видов полезного сигнала

Спектральная плотность полезного сигнала	Спектральная плотность помехи	Оптимальная передаточная функция замкнутой системы	Оптимальные характеристики компаундирования	Минимальная среднеквадратичная ошибка
$S_{\Psi}(\omega) = \frac{k^2}{\omega^4}$	$S_N(\omega) = a^2$ («белый шум»)	$Y_3(p) = \frac{\tau(\tau p + 1)}{p^2 + p + \alpha}$	$\alpha = \frac{k}{a}$ $\tau = \sqrt{\frac{2\alpha}{k}}$	$\varepsilon = 4\sqrt{ka^3}$
$S_{\Psi}(\omega) = \frac{2k}{(2k)^2 + \omega^2}$	$S_N(\omega) = a^2$ («белый шум»)	$Y_3(p) = \frac{\alpha}{\tau p + 1}$	$\alpha = \frac{1}{1 + 2ka^2 + a^2(2k+a^2(2k)^2)}$ $\tau = \frac{a}{\sqrt{2k+a^2(2k)^2}}$	

В работах С. Джонса [2], посвященных статистическим методам, результаты получены в несколько другой форме. Здесь определяется не оптимальная передаточная функция $Y_3(p)$, а оптимальная функция веса (или импульсная переходная функция) замкнутой системы $W(t)$ для случая, когда заданы спектральная плотность помехи $S_N(\omega) = a^2$ («белый шум») и автокорреляционная функция полезного сигнала $A_{\Psi}(\tau)$. В результате исследования оказалось, что оптимальная функция веса системы зависит от энергии помехи следующим образом (см. подробнее стр. 335).

1. Когда помехи нет ($N(t) = 0$), оптимальная функция веса равна единичной дельта-функции, заданной в начале координат, четырехполосник $Y_3(p)$ должен пропускать все частоты, частота среза равна бесконечности $\omega_0 = \infty$. Другими словами, применение статистических методов к определению минимума среднеквадратичной ошибки, когда энергия шума мала, приводит к неустойчивой и к тому же технически неосуществимой следящей системе.

2. Когда помеха велика ($N(t) = \infty$, $a = \infty$), оптимальная функция веса равна автокорреляционной функции полезного сигнала $W(t) = A_{\Psi}(\tau)$, а оптимальная частотная характеристика системы совпадает с автокорреляционной функцией полезного сигнала.

В промежуточных случаях $0 < a < \infty$ оптимальная функция веса занимает некоторое среднее положение.

Функция веса системы в замкнутом состоянии $W_3(t)$ представляет собой ее реакцию на дельта-функцию времени [единичный импульс $\delta(t)$]

$$\delta(t) = p[1].$$

Полная проводимость системы является операторным изображением Лапласа от функции веса

$$Y_3(p) = \int_0^{\infty} W_3(t) e^{-pt} dt,$$

где $p = \delta \pm j\omega$.

Таким образом, если найдена оптимальная функция веса, то можно считать известной и полную проводимость (передаточную функцию) системы. Итак, при заданных спектральных характеристиках полезного сигнала $\Psi(t)$ и помехи $N(t)$ статистическая теория однозначно решает задачу выбора схемы (структуры) и параметров, а иногда и нелинейных характеристик [89] следящей системы (см. рис. 96, б), описываемой уравнением

$$\Phi(t) = Y_3(p) S(t) = \frac{Y_1(p)}{1 + Y_1(p) \cdot Y_2(p)} \cdot S(t),$$

где $p = \frac{d}{dt}$.

Применение статистических методов к выбору схемы и параметров контура обратной связи систем стабилизации

Мы познакомились с основными результатами применения статистических методов к следящим системам.

Значительно меньше внимания уделялось исследованию системы стабилизации с обратной связью (см. рис. 97, б), описываемых уравнением

$$\Phi(t) = \frac{\beta(p)}{1 + Y_1(p) Y_2(p)} S(t) = Y_3(p) S(t).$$

Однако некоторые результаты, полученные для следящих систем, можно применить и к системам стабилизации уже сейчас, на данном этапе разработки этого вопроса.

Случайные отклонения возмущения (изменения нагрузки), действующие на систему стабилизации, можно охарактеризовать следующими величинами.

1. Среднее значение отклонения возмущения за достаточно длинный промежуток времени усреднения T равно нулю

$$\lambda_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T \lambda(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{L - L_0}{L_0} dt = 0,$$

где Δ — мгновенное значение возмущения (нагрузки объекта);

L_0 — среднее значение нагрузки за данный промежуток времени.

2. Дисперсия (разброс) отклонения возмущения

$$D_\lambda = \frac{1}{T} \int_0^T \lambda^2(t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} S_\lambda(\omega) d\omega,$$

где $S_\lambda(\omega)$ — спектральная плотность.

3. Среднеквадратичное значение отклонения возмущения

$$\varepsilon_\lambda = +\sqrt{D_\lambda}.$$

4. Спектральная плотность (частотный спектр распределения энергии флуктуаций возмущения) определяется экспериментально при помощи коррелографов либо специальными графическими методами [48]

$$S_\lambda = S_\lambda(\omega).$$

5. Автокорреляционная функция

$$A_\lambda(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} \lambda(t) \cdot \lambda(t + \tau) dt.$$

Если время усреднения T значительно больше частоты изменения λ , то автокорреляционная функция может быть найдена приближенно из выражения

$$A_\lambda(\tau) \approx \frac{1}{T} \int_0^T \lambda(t) dt.$$

Кроме того, автокорреляционная функция связана со спектральной плотностью при помощи преобразования Фурье

$$A_\lambda(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_\lambda(\omega) e^{-j\omega\tau} d\omega.$$

Система стабилизации характеризуется следующими величинами.

1. Амплитудно-частотная характеристика $M_3(\omega)$ системы в замкнутом состоянии

$$|Y_3(j\omega)| = M_3(\omega) = \sqrt{G_3^2(\omega) + B_3^2(\omega)},$$

где $G_3(\omega)$ и $B_3(\omega)$ — вещественная и мнимая частотные характеристики замкнутой системы.

2. Автокорреляционная функция $A_{W(t)}(\tau)$ реакции системы на дельта-функцию времени $\delta(t)$ (т. е. автокорреляционная функция от функции веса системы)

$$\begin{aligned} A_{W(t)}(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} W(t) \cdot W(t + \tau) dt = \\ &= \frac{1}{T} \int_0^{\infty} W(t) W(t + \tau) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} S_\varphi(\omega) e^{-j\omega\tau} d\omega \left| \begin{array}{l} S_\varphi(\omega) \\ \lambda = \delta(t) \end{array} \right. \end{aligned}$$

3. Среднее отклонение регулируемой величины φ

$$\varphi_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T \varphi(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{\Phi - \Phi_0}{\Phi_0} dt,$$

где Φ — мгновенное значение регулируемой величины;
 Φ_0 — среднее значение регулируемой величины за данный промежуток времени.

4. Дисперсия регулируемой величины φ

$$D_\varphi = \frac{1}{T} \int_0^T \varphi^2(t) dt = \int_0^{\infty} S_\varphi(\omega) d\omega = \int_0^{\infty} |Y_3(j\omega)|^2 S_\lambda(\omega) d\omega.$$

5. Среднеквадратичная ошибка

$$\varepsilon_\varphi = \sqrt{D_\varphi}.$$

6. Спектральная плотность φ при заданной $\lambda(t)$ [чаще всего при $\lambda(t) = \delta(t)$]

$$S_\varphi = S_\varphi(\omega) = |Y_3(j\omega)|^2 \cdot S_\lambda(\omega).$$

Выбор характеристик системы стабилизации с целью лучшего подавления случайных возмущений можно про-

извести различными методами, основанными на использовании одной из следующих двух формул:

$$D_{\varphi} = \varepsilon_{\varphi}^2 = \int_0^{\infty} S_{\lambda}(\omega) \cdot M_{\lambda}^2(\omega) d\omega,$$

или

$$D_{\varphi} = \varepsilon_{\varphi}^2 = 2 \int_0^{\infty} A_{\lambda}(\tau) A_{W(t)}(\tau) d\tau.$$

Из систем лучше та, у которой среднеквадратичная ошибка ε_{φ} , определяемая выражением $\varepsilon_{\varphi} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \varphi^2 dt}$, меньше при заданной ε_{λ} .

Показателем качества системы может быть также отношение среднеквадратичной ошибки системы к среднеквадратичному значению отклонения возмущения $\frac{\varepsilon_{\varphi}}{\varepsilon_{\lambda}}$.

Приведем пример исследования системы стабилизации статистическим методом.

Пример. Пользуясь показателем качества $\frac{\varepsilon_{\varphi}}{\varepsilon_{\lambda}}$, в работе [51] исследована система стабилизации, описываемая уравнениями:

$$\begin{aligned} \Sigma &= -\varphi + \Psi; \\ \mu &= Y_2(\rho) \varepsilon; \\ \varphi &= Y_1(\rho) [\mu - \lambda]. \end{aligned}$$

Из этих уравнений находим

$$\varphi = -Y_3(\rho) \lambda \text{ при } \Psi = 0,$$

где

$$Y_3(\rho) = \frac{Y_1(\rho)}{1 + Y_1(\rho) Y_2(\rho)}.$$

Для примера принято

$$Y_2(\rho) = \alpha_2; \quad Y_1(\rho) = \frac{1}{\tau\rho + 1}.$$

Тогда

$$Y_3(\rho) = \frac{1}{\frac{1 + \alpha_2}{\tau} \rho + 1}.$$

Статистическое задание изменений нагрузки принято в виде закона нормального распределения по кривой Гаусса

$$A_{\lambda}(\tau) = A_{\lambda}(0) \cdot e^{-\frac{\tau}{T_Y}}$$

где T_Y находится экспериментально при помощи коррелографа¹.

Для определения $\frac{\varepsilon_{\varphi}}{\varepsilon_{\lambda}}$ находится:

реакция системы на единичный толчок $\lambda = [1]$

$$\Phi(t) = \frac{1}{1 + \alpha_2} \left(1 - e^{\frac{-t}{1 + \alpha_2}} \right)$$

и реакция на δ -функцию времени $\lambda = \delta(t)$

$$W(t) = p\varphi(t) = \frac{1}{\tau} e^{\frac{-t}{\tau}}$$

Автокорреляционная функция от функции веса $W(t)$

$$A_{W(t)}(\tau) = \int_0^{\infty} W(t) W(t + \tau) dt = \frac{1}{2\tau} e^{\frac{-\tau}{1 + \alpha_2}}$$

Далее находится показатель качества

$$\frac{\varepsilon_{\varphi}}{\varepsilon_{\lambda}} = \frac{1}{1 + \alpha_2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\tau}{T_Y(1 + \alpha_2)}}}$$

Отсюда делаются такие выводы: для достаточного подавления возмущений при заданном T_Y следует стремиться увеличить постоянную времени объекта τ , а инерция регулятора должна быть возможно меньше.

Как видим, выводы исследования в значительной степени очевидны и поэтому не вполне оправдывают затраченные усилия.

Статистические методы исследования систем стабилизации еще требуют дальнейшей разработки, но уже сейчас ясно, что при помощи этих методов и для систем стабилизации можно получить однозначный ответ на вопрос о выборе оптимальной структуры и значений параметров полной проводимости $Y_3(p)$ или оптимальной функции веса $W_3(t)$ системы. Систему стабилизации можно, например, рассматривать как следящую систему, находящуюся только под действием одной помехи

$$\Psi(t) = 0; N(t) = \beta(p) S(t); S_N(\omega) = |\beta(p)|^2 S_S(\omega).$$

¹ Схемы коррелографов описаны в литературе [51] и [79].

В свою очередь, оптимальные выражения $Y_3(p)$ и $W_3(t)$ дают возможность определить оптимальные характеристики компаундирования, показывающие, какие характеристики и по какому закону нужно изменять, чтобы получить минимум среднеквадратичной ошибки.

Наиболее простой расчет статистических характеристик четырехполосника

Если на вход устойчивого четырехполосника, например усилителя с операторной проводимостью $Y(p)$, подано напряжение, являющееся стационарной функцией времени $\psi(t)$, то на выходе его получим напряжение $\varphi(t)$, также являющееся стационарной функцией времени

$$\varphi = Y(p) \psi.$$

Статистическая теория показывает, что и между спектральными плотностями входной и выходной величины существует определенная связь

$$S_\varphi(\omega) = |Y(j\omega)|^2 S_\psi(\omega).$$

Дисперсия сигнала на выходе равна

$$D_\varphi = \int_{-\infty}^{+\infty} S_\varphi(\omega) d\omega.$$

Среднеквадратичное отклонение

$$\varepsilon_\varphi = +\sqrt{D_\varphi}.$$

Эти формулы позволяют наиболее просто произвести статистический анализ динамической системы.

Пример. На систему стабилизации действует стационарное знакопеременное возмущение λ с амплитудой $\pm A$, средней частотой $k \frac{1}{\text{сек}}$.

Автокорреляционная функция такого возмущения при определенных условиях [64] равна

$$A_\lambda(\tau) = A^2 e^{-2k\tau}.$$

Спектральная плотность

$$S_\lambda(\omega) = \frac{A^2}{\pi} \cdot \frac{2k}{(2k)^2 + \omega^2}.$$

Допустим, передаточная функция (проводимость) системы стабилизации равна:

а) в разомкнутом состоянии

$$Y_p(p) = \frac{\alpha}{(\tau_1 p + 1)(\tau_2 p + 1)};$$

б) в замкнутом состоянии

$$Y_3(p) = \frac{\beta}{1 + Y_p(p)} = \frac{\beta(\tau_1 p + 1)(\tau_2 p + 1)}{(\tau_1 p + 1)(\tau_2 p + 1) + \alpha} = \frac{\varphi}{\lambda}.$$

Находим спектральную плотность выходной (регулируемой) величины

$$\begin{aligned} S_\varphi(\omega) &= |Y_3(j\omega)|^2 S_\lambda(\omega) = \\ &= \left[\frac{\beta(\tau_1 p + 1)(\tau_2 p + 1)}{(\tau_1 p + 1)(\tau_2 p + 1) + \alpha} \right]^2 \cdot \frac{A^2}{\pi} \cdot \frac{2k}{(2k)^2 + \omega^2} = \\ &= \frac{2kA^2\beta^2}{\pi[(2k)^2 + \omega^2]} \cdot \frac{\tau_1^2\tau_2^2\omega^4 + (\tau_1^2 + \tau_2^2)\omega^2 + 1}{\tau_1^2\tau_2^2\omega^4 + (\tau_1^2 + \tau_2^2 - 2\alpha\tau_1\tau_2)\omega^2 + (1 + \alpha)^2}. \end{aligned}$$

Далее находим среднеквадратичное отклонение стабилизируемой величины [48]

$$\begin{aligned} \varepsilon_\varphi &= \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} S_\varphi(\omega) d\omega} = \\ &= \frac{A\beta}{\sqrt{1 + \alpha}} \cdot \sqrt{\frac{1 + 2k(1 + \alpha)(\tau_1 + \tau_2 + 2k\tau_1\tau_2) + \frac{2\alpha^2 k\tau_1\tau_2}{\tau_1 + \tau_2}}{1 + \alpha + 2k\tau_1 + 2k\tau_2 + 4k^2\tau_1\tau_2}}. \end{aligned}$$

Разложив ε_φ в ряд по $\frac{1}{k}$ и ограничившись тремя членами ряда, получим

$$\begin{aligned} \varepsilon_\varphi &= A\beta + \frac{A\beta\alpha^2}{(1 + \alpha)(\tau_1 + \tau_2)} \cdot \frac{1}{k} - \frac{A\beta\alpha}{8\tau_1\tau_2\sqrt{1 + \alpha}} \cdot \left[2 + 2\alpha + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\alpha^3\tau_1\tau_2}{4(1 + \alpha)(\tau_1 + \tau_2)^2} \right] \frac{1}{k} + \dots \end{aligned}$$

Проанализируем полученный результат. Увеличение частоты k знакопеременного возмущения (нагрузки) благоприятно влияет на работу системы, так как уменьшает среднеквадратичную ошибку ε_φ . По величине ε_φ можно сравнивать и две системы стабилизации (с разными схемами или значениями параметров), чтобы выбрать лучшую, для которой ε_φ минимально. Иногда удается взять производную $\frac{d\varepsilon_\varphi}{dv} = 0$, где v — варьируемый параметр и, таким образом, найти экстремальные его значения.

КОМБИНИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ОБЫЧНОГО ТИПА С ПОСТОЯННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Если на систему действует ряд помех, причем часть из них $N_1(t)$ может, а часть $N_2(t)$ не может быть измерена, а также в случае, когда все помехи могут быть измерены, но характеристики прямой цепи системы $Y_1(p)$ недостаточно стабильны и линейны, следует применить комбинированные системы, схемы которых изображены на рис. 96, в и 97, в. Преимущества комбинированных систем были рассмотрены выше.

Схема и параметры (иногда и нелинейность) контура обратной связи (входящие в левую часть уравнения динамики) выбираются либо с помощью статистических методов, либо по условиям компромиссной настройки. Схема и параметры компаундирующих связей $k_N(p)$ (входящие в правую часть уравнения) выбираются из условий инвариантности системы в отношении помехи $N_1(t)$ так, как это показано выше. При $\Phi \neq f(N_1)$ эти два выбора не связаны между собой (ортогональны).

УМЕНЬШЕНИЕ ОШИБКИ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ ПРИ ПОМОЩИ КИБЕРНЕТИЧЕСКОГО САМОИЗМЕНЕНИЯ ЕЕ ХАРАКТЕРИСТИК

Экспериментальные методы доказательства существования экстремума и определения оптимальных характеристик

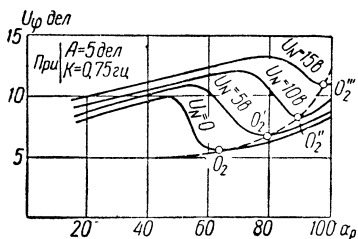


Рис. 98. Зависимость ошибки следящей системы от уровня помехи (шума) и коэффициента усиления α_p (помеха — «белый шум»; полезный сигнал — по форме рис. 44).

компаундирования приобретают важное значение особенно в связи с тем, что современные статистические методы еще не дают вполне удовлетворительных выводов, в частности, как было сказано выше, не позволяют учесть свободную составляющую ошибки (генерируемую в системе), а в связи с этим и устойчивость системы.

На рис. 98 представлена экспериментально полученная зависимость ошибки следящей системы (см. рис. 43) от уровня шума U_N (генератором шума являлась старая испорченная патефонная пластинка). Как видно из рисунка, простой опыт позволяет быстро и

наиболее точно найти оптимальную характеристику компаундирования (линия $O_2O'_2O''_2$), при которой ошибка системы минимальна.

Для линейных систем необходимость изменения коэффициента усиления системы при увеличении помех для получения минимальной ошибки, как это видно из экспериментальной характеристики, объясняется при помощи методов, учитывающих свободную составляющую ошибки.

Для нелинейных систем характер полученной экспериментальной зависимости может быть объяснен с точки зрения теории стабилизации систем при помощи внешнего воздействия [45]. Из теории автоматического регулирования известно, что введение в систему синусоидального воздействия, или «белого шума», стабилизирует систему, т. е. как бы снижает ее коэффициент усиления. Действие помехи на ошибку системы может быть компенсировано увеличением коэффициента усиления, что данный эксперимент и подтверждает.

В соответствии с теорией комбинированных систем более или менее точное знание нелинейных оптимальных характеристик компаундирования требуется только при расчете систем, действующих по возмущениям (рис. 99,а и 100,а).

Для создания систем с обратной связью (рис. 99,б и 100,б) достаточно только знать, что существует некоторая

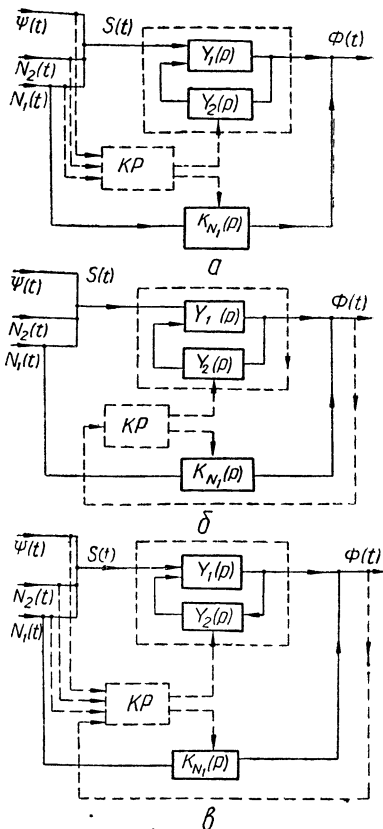


Рис. 99. Кибернетические следящие системы с самоизменением $Y_2(p)$ и $K_{N_1}(p)$:

а — система с управлением по возмущениям, б — система с управлением по регулируемой величине с обратной связью; в — комбинированная система.

зависимость регулирующих воздействий $\mu_1, \mu_2 \dots$ от возмущающих $\lambda_1, \lambda_2 \dots$, обеспечивающих экстремальное значение

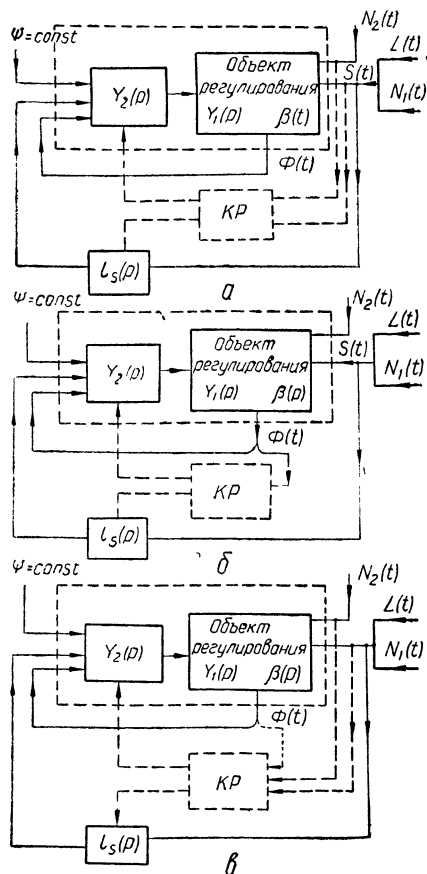


Рис. 100. Кибернетические системы стабилизации с самоизменением

$Y_2(p)$ и $L_5(p)$:

а—система с уравнением по возмущениям;
б—система с уравнением по регулируемой величине (с обратной связью). в—комбинированная система.

Однако и здесь практически оказывается достаточным сначала осуществить простую линейную компаундирующую связь, снижающую основную составляющую

показателя качества φ . Обратная связь системы представляет собой своеобразное вычислительное устройство, которое автоматически находит оптимальные характеристики компаундирования.

Таким образом, при исследовании систем кибернетического управления математическая задача определения оптимальной характеристики компаундирования может быть заменена задачей доказательства существования. В применении точных статистических методов нет необходимости.

Приближенные простые методы, такие как, например, метод Ж. Дютиля [2], позволяют точно решить задачу доказательства существования экстремума и выбора возмущающих и регулирующих воздействий.

Как уже было сказано выше, знание точных нелинейных характеристик необходимо для осуществления компаундирующих связей кибернетического регулятора.

ошибки, а затем экспериментальным путем уточнить ее форму.

Теория и техника самонастраивающихся систем с переменными характеристиками находится еще в самом начале своего развития, но уже сейчас можно сказать, что усилия ученых часто направлены на решение слишком узкого круга вопросов (в основном на определение оптимальных характеристик компаундирования), причем другие не менее важные вопросы остаются вне поля зрения исследователей.

Чаще всего исследуется только вопрос о способах математического определения, притом наиболее точного выражения оптимальных характеристик компаундирования, в то время как усилия должны быть направлены, главным образом, на установление факта существования такой характеристики.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПАУНДИРОВАНИЯ АНАЛИТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

В рассматриваемой кибернетической задаче регулируемой величиной (или показателем качества) φ является тот или иной показатель качества (точности) системы, например, среднеквадратичная ошибка $\varphi = \varepsilon$.

Основными возмущающими воздействиями служат параметры спектральной плотности полезного сигнала (задания), нагрузки объекта и помех

$$\lambda_1 = A, \quad \lambda_2 = k \text{ и др.}$$

Рассмотрим три вида регулирующих воздействий.

1. В системе с самоизменением параметров регулируемыми воздействиями служат:

а) параметры (постоянные), входящие в выражение передаточной функции системы регулирования:

для следящей системы

$$\Phi = Y_3(p) S, \quad \text{где } Y_3(p) = \frac{Y_1(p)}{1 + Y_1(p) Y_2(p)} \approx \frac{1}{Y_2(p)};$$

для системы стабилизации

$$\varphi = Y_3(p) S, \quad \text{где } Y_3(p) = \frac{\beta(p)}{1 + Y_1(p) Y_2(p)}$$

(обозначения переменных показаны на рис. 96—100);

б) параметры, входящие в выражение проводимости компаундирующих связей $k_N(p)$ и $l_S(p)$.

Методика получения *оптимальных характеристик компаундирования*, показывающих, какой именно параметр и в какой зависимости нужно изменять, чтобы получить наибольшую точность в данной задаче, не отличается от методики определения оптимальной передаточной функции системы. Следовательно, оптимальные характеристики компаундирования можно определить, пользуясь статистическими методами (как более точными, так и приближенными) либо экспериментально.

Пример (см. табл. 12). Допустим, что задание (полезный сигнал) следящей системы имеет спектральную плотность $S_{\Psi}(\omega) = \frac{k^2}{\omega^4}$, а помеха $S_N(\omega) = a^2$ («белый шум»). Пользуясь методом Н. Винера, находим оптимальную передаточную функцию системы, дающую минимум среднеквадратичной ошибки

$$Y_3(p) = \frac{\sqrt{\frac{2a}{k}} p + 1}{\frac{a}{k} p^2 + \sqrt{\frac{2a}{k}} p + 1}.$$

Передаточную функцию такого вида можно реализовать, если:

$$Y_1(p) = \frac{\tau p + 1}{p}, \quad Y_2(p) = 1.$$

Действительно, в этом случае передаточная функция замкнутой системы равна

$$Y_3(p) = \frac{Y_1(p) Y_2(p)}{1 + Y_1(p) Y_2(p)} = \frac{\tau p + 1}{\frac{1}{a} p^2 + \tau p + 1},$$

где коэффициент усиления системы в разомкнутом состоянии

$$\alpha = \frac{k}{a};$$

постоянная времени

$$\tau = \sqrt{\frac{2}{a}} = \sqrt{\frac{2a}{k}}.$$

Полученные таким подбором зависимости $\alpha = f(k, a)$ и $\tau = f(k, a)$ и являются искомыми оптимальными характеристиками компаундирования. Они указывают, как нужно изменять параметры τ и α при изменении параметров спектральных плотностей k и a . Параметры τ и α и являются в данной системе регулирующими воздействиями.

2. В системе с самоизменением нелинейностей регулирующим воздействием служит обычно показатель степени m выражения, аппроксимирующего выррируемую нелинейную характеристику

$$U_{\text{вых}} = aU_{\text{вх}}^m.$$

Такой нелинейный преобразователь может находиться в контуре обратной связи основной системы или в цепи компаундирующих связей.

Придавая степени m значения от 0 до 1, получим вариацию нелинейности в пределах характеристик так называемого «южного» типа (формой, напоминающей букву S); при изменении в пределах от 1 до ∞ получим серию характеристик «северного» типа (формой, напоминающей букву N). Пример варьируемой таким путем нелинейности показан на рис. 56 и 57, где используется нелинейная зависимость твердых (селеновых) выпрямителей.

Основная идея выбора нелинейности для следящих систем состоит в следующем: нелинейность должна быть выбрана так, чтобы при увеличении амплитуды и частоты задания коэффициент усиления основного тракта усиления $\alpha_1 = \lim_{p \rightarrow 0} Y_1(p)$ увеличивался. Это можно достичь двумя способами: включить нелинейный усилитель с «северной» характеристикой в прямую цепь системы либо, наоборот, — нелинейный усилитель с «южной» характеристикой в обратную связь системы. Результат будет приблизительно один и тот же (подробнее см. гл. VI).

Аналитические методы, позволяющие определить оптимальную характеристику компаундирования, для данной задачи еще только разрабатываются. Они представляют собой некоторую модификацию метода гармонического баланса [48], [89]. Пока еще нет метода определения формулы, показывающей, по какой зависимости нужно изменять варьируемые параметры a и m при изменении спектральных плотностей $S_\psi(\omega)$ и $S_N(\omega)$, чтобы получить минимум ошибки или максимум другого показателя качества. Однако экспериментально такая оптимальная характеристика может быть легко определена, если в этом имеется необходимость (см. гл. V).

3. В системах с самоизменением структуры регулирующим воздействием является: а) номер структуры схемы основной системы регулирования или б) номер структуры схемы ее компаундирующих связей. Таким образом, в отличие от предыдущих двух кибернетических задач в данной задаче регулирующее воздействие может принимать только дискретный ряд конкретных значений:

$$\mu = \mu', \quad \mu = \mu'', \quad \mu = \mu''', \quad \dots, \quad \mu = \mu^{(n)}.$$

Поясним смысл самоизменения структуры системы.

Если спектральная плотность сигнала хорошо аппроксимируется выражением (см. табл. 12)

$$S_{\Psi}(\omega) = \frac{k^2}{\omega^4},$$

то оптимальная (по Винеру) передаточная функция системы (определяющая ее структуру) равна

$$Y_3(p) = \frac{\tau p + 1}{\frac{1}{a} p^2 + \tau p + 1}.$$

Если же спектральная плотность сигнала изменится и станет такой, что лучше аппроксимируется выражением

$$S_{\Psi}(\omega) = \frac{1}{1 + \omega^2},$$

то в схеме следует произвести переключения так, чтобы получить оптимальную передаточную функцию

$$Y_3(p) = \frac{a}{1 + \tau p}.$$

Однако ясно, что задача самоизменения структуры системы является дополнительной к задаче самоизменения ее параметров. Самоизменение структуры только как бы расширяет диапазон действия системы с самоизменением параметров.

Оптимальная характеристика для задачи самоизменения структуры компаундирующих связей основной системы определяется путем многократного применения условий инвариантности, которые зависят от структуры остальной части системы.

Оптимальная характеристика компаундирования для задачи самоизменения структуры основной системы регулирования может быть определена путем многократного применения того или иного метода определения оптимальной передаточной функции (например, метода Винера). Приняв аппроксимирующую формулу в виде

$$S_{\Psi}(\omega) = \frac{k^2}{\omega^n},$$

можем задать показателю n ряд значений и определить ряд оптимальных структур. Таким образом, мы узнаем, как в функции n следует изменять структуру системы. Эта зависимость представляет собой оптимальную характеристику компаундирования. Практически такие пере-

ключения можно выполнять только приближенно, поэтому возникает *мысль о плавном изменении структуры системы* и о переходе от систем с сосредоточенными постоянными к системам с распределенными параметрами. Действительно, в таких четырехполюсниках, как электролитическая ванна или сеть распределенных емкостей, самоиндукций и сопротивлений, представляется возможным плавно переходить от одной структуры четырехполюсника к другой без дискретных изменений.

Системы с плавным изменением структуры и параметров еще никем не разрабатывались, но, несомненно, представляют значительный интерес.

КИБЕРНЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С ПЕРЕМЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ, УПРАВЛЯЕМЫЕ ПО ВОЗМУЩЕНИЯМ

В качестве объекта кибернетического управления в дальнейшем мы будем рассматривать комбинированную систему обычного типа, так как она включает остальные системы как частные случаи.

Из сравнения схем рис. 96 и 97, а также 99 и 100 можно сделать вывод, что между обычными неприиспосабливающимися системами автоматического регулирования с постоянными характеристиками и кибернетическими системами с самоизменением характеристик существует большое сходство. Принципиальные схемы основных систем (объекта) и дополнительных кибернетических регуляторов одни и те же.

Аналогия настолько велика, что при изложении теории комбинированных кибернетических систем можно повторить почти все положения теории комбинированных систем обычного типа.

В частном случае, когда объектом кибернетического управления является обычная система регулирования, *идеи комбинированного регулирования как бы применяются дважды: первый раз к объекту, т. е. к обычной системе регулирования, а второй раз уже собственно к кибернетическому управлению* (см. примечание на стр. 285).

В кибернетических, так же как и в обычных, системах можно использовать: а) принцип разомкнутого управления по возмущениям (рис. 99,а и 100,а) или б) принцип управления по регулируемой величине (показателю качества) (рис. 99,б и 100,б). Наконец, возможно создание комбини-

рованных систем, использующих оба принципа одновременно (рис. 99,в и 100,в).

Принципы управления могут быть реализованы различными способами. При регулировании по возмущениям можно предусмотреть ступенчатое или плавное изменение регулирующих воздействий в соответствии с оптимальной характеристикой компаундирования. При регулировании по показателю качества можно осуществить:

1) отбор оптимального режима из многих одновременно существующих;

2) опробование всех возможных режимов последовательно во времени;

3) статистический, беспорядочный, отбор режима до первого удовлетворительного;

4) упорядоченный (экстремальный) отбор режима;

5) упорядоченный, самоулучшающийся, отбор: а) с ускорением цикла поиска при больших отклонениях, б) с ускорением отбора наиболее вероятных режимов.

Экстремальный отбор является наиболее быстрым, поэтому ниже мы ограничимся рассмотрением только экстремальных систем.

Если параметры спектральной плотности помехи $N(t) = N_1(t) + N_2(t)$ могут быть измерены, а характеристики четырехполосников $Y_1(p)$, $Y_2(p)$ и $k_N(p)$ стабильны, то достаточно применить разомкнутую систему кибернетического экстремального управления (рис. 99,а и 100,а).

Кибернетический регулятор KP может воздействовать на схему, параметры и нелинейности как четырехполосника обратной связи $Y_2(p)$, так и четырехполосника компаундирующей связи $k_N(p)$ [или $1_S(p)$]. Нелинейная характеристика, осуществляемая регулятором KP , при которой достигается минимум среднеквадратичной ошибки, является *оптимальной характеристикой* компаундирования.

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПЛОТНОСТЕЙ ПОМЕХ И ВОЗМУЩЕНИЙ

Несмотря на сходство обычных и кибернетических систем регулирования по возмущениям, можно указать и на некоторое их различие: если для обычных систем компаундирования необходимо точное измерение основных возмущающих воздействий, то для осуществления кибернетических систем часто *достаточно знать лишь некоторые па-*

параметры возмущений, входящие в выражения их спектральной плотности.

Никакие корреляторы, фильтры и другие приборы принципиально не могут *точно* выделить полезный сигнал $\Psi(t)$, если на него наложена неизвестная помеха $N(t)$. Но дело несколько упрощается, так как для получения оптимального соотношения вовсе не требуется знать все параметры полезного сигнала, а достаточно иметь о нем некоторые общие сведения. Например, для возмущения прямоугольного вида (см. рис. 42) достаточно знать амплитуду A и среднюю частоту переключений k , так как спектральная плотность такого возмущения при определенных условиях равна

$$S_{\Psi}(\omega) = \frac{A^2}{\pi} \cdot \frac{2k}{(2k)^2 + \omega^2}.$$

В литературе иногда применяется термин «текущая спектральная плотность». Под этим термином понимается спектральный состав воздействия за некоторое небольшое время наблюдения (усреднения), непосредственно предшествующее данному моменту времени. Текущая спектральная плотность может оставаться постоянной или изменяться.

В зависимости от возможности определения и характера изменения спектральной плотности полезного сигнала и помехи обычно могут быть следующие три случая:

1) спектральная плотность полезного сигнала $\Psi(\omega)$ может быть определена, причем она либо постоянна, либо изменяется по известному закону. Спектральная плотность помехи $N(\omega)$ изменяется во времени по закону, который нельзя предвидеть заранее;

2) наоборот, спектр $N(\omega)$ может быть определен и является постоянным или изменяется по известному закону, а спектр $\Psi(\omega)$ изменяется;

3) общий случай: $N(\omega)$ и $\Psi(\omega)$ изменяются неопределенным образом, т. е. по неизвестному закону.

В нашем примере определение спектра $\Psi(\omega)$ сводится к измерению величин A и k , а определение $N(\omega)$ — к измерению величины a^2 .

В соответствии с изменением показателей спектральной плотности сигнала и помех и производится изменение тех или иных регулирующих воздействий по закону, определяемому оптимальной характеристикой компандирования.

Важно отметить, что частоту переключения можно измерить без отделения помехи от полезного сигнала, так как при достаточно малых помехах частоты изменения $\Psi(t)$ и $S(t)$ равны друг другу. Таким образом, частоту k можно определить точно без выделения полезного сигнала. Измерение амплитуды A значительно сложнее, чем измерение частоты k , но и здесь наличие помех почти не скажется на результате измерений, если мы будем измерять некоторое среднее значение изменения амплитуды A за определенное время - усреднения $T_{\text{уср}} \gg \frac{1}{k}$. Амплитуду полезного сигнала $\Psi(t)$ в ряде случаев можно приближенно принять равной средней амплитуде суммарного сигнала $S(t)$. При этом предполагается, что амплитуда и частота сигнала изменяются достаточно медленно.

Для определения параметров «белого шума» $S_N(\omega) = a^2$ достаточно измерить среднюю энергию помехи.

В некоторых случаях энергию шума можно измерить при помощи частотных фильтров как энергию высокочастотной составляющей на входе системы (предполагая, что полезный сигнал содержит только сравнительно низкие частоты).

Энергия помехи может быть измерена при помощи высокочастотных фильтров с последующим сглаживанием (так как мы предполагаем, что энергия «белого шума» на всех частотах равна и в отличие от полезного сигнала шум действует непрерывно). В связи с этим при определенных формах полезного сигнала (например, при прямоугольной форме знакопеременного сигнала) удастся отделить сигнал от помехи.

В других случаях (например в системах с радиоприемом) сб энергии шума можно судить по интенсивности излучений на частотах, лежащих в непосредственной близости от принимаемой волны. В примере системы поиска светящегося тела энергию помех можно измерить при помощи специального фотозлемента, направленного на участок горизонта, находящийся вблизи светящегося тела, за положением которого должна следить система.

В ряде других применений отделение полезного сигнала от помехи можно произвести по так называемому методу *маркирующих импульсов*, суть которого состоит в следующем.

Полезный сигнал $\Psi(t)$ периодически отключается на весьма непродолжительное время, в течение которого происходит измерение помехи. Время измерения должно быть настолько кратким, чтобы следящая система не реагировала на отключение сигнала. В противном случае следует предусмотреть и отключение сервомотора на время замера помехи. В другом варианте этого метода задание $\Psi(t)$ не отключается, а принимает на короткое время постоянное, заранее известное значение.

Наконец, напомним, что в *программных системах регулирования полезный сигнал $\Psi(t)$ известен* в каждый момент времени и здесь раздельное измерение полезного сигнала и помехи не вызывает затруднений. Это в некоторой степени относится и к системам стабилизации, где нет необходимости отделять помеху $N_1(t)$ от нагрузки объекта $L(t)$, так как просто можно устранить влияние их обеих одновременно.

В ряде случаев (при определенном виде выражений спектральных плотностей сигнала и помехи) для осуществления компаундирования можно применить метод двух частотных фильтров.

МЕТОД РЕГУЛИРОВАНИЯ ПО ВОЗМУЩЕНИЮ, ИЗМЕРЯЕМОМУ ПРИ ПОМОЩИ ДВУХ ЧАСТОТНЫХ ФИЛЬТРОВ

Вопросу регулирования по возмущению без раздельного измерения параметров спектральной плотности полезного сигнала и помехи посвящена работа Е. Барта [73].

Рассмотрим, например, способ осуществления оптимальных характеристик компаундирования, указанных в табл. 12,

$$\tau = \sqrt{\frac{2a}{k}} = \sqrt{\frac{2}{a}}, \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{k}{a}; \quad (2)$$

в системе с передаточной функцией

$$Y_3(p) = \frac{\alpha(\tau p + 1)}{p^2 + \alpha\tau p + \alpha} \quad (3)$$

при

$$S_\Psi(\omega) = \frac{k^2}{\omega^4} \quad \text{и} \quad S_N(\omega) = a^2.$$

Структурная схема системы изображена на рис. 101. Допустим, что измерение параметров спектра сигнала k и шума a затруднительно. Это затруднение можно устранить измерением суммарной ошибки (apparent error)

$$\varphi_S = S(t) - \Phi(t).$$

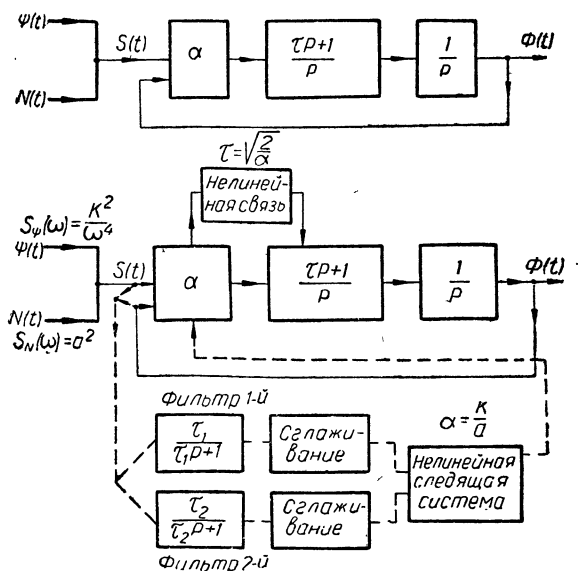


Рис. 101. Структурная схема следящей системы с самоизменением коэффициента усиления по возмущениям (по Е. Барту).

Действительная же ошибка, которую мы практически не можем измерить и значение которой хотим свести к минимуму, равна

$$\varphi(t) = \Psi(t) - \Phi(t).$$

Спектральная плотность суммарной ошибки

$$S_{\varphi_S}(\omega) = |Y_{\varphi_S}(j\omega)|^2 S_S(\omega),$$

где $Y_{\varphi_S}(j\omega)$ — комплексная передаточная функция системы по суммарной ошибке.

Учитывая, что

$$Y_{\varphi_S}(j\omega) = 1 - Y_3(j\omega),$$

получим

$$S_{\varphi_S}(\omega) = |1 - Y_3(j\omega)|^2 S_S(\omega). \quad (4)$$

Из уравнения (3) при $p = j\omega$, $\tau = \sqrt{\frac{2a}{\kappa}}$ и $\alpha = \frac{k}{a}$ находим

$$|1 - Y_3(j\omega)|^2 = \frac{\omega^4}{\left(\frac{k}{a}\right)^2 + \omega^4}. \quad (5)$$

Учитывая, что:

$$\begin{aligned} S(t) &= \Psi(t) + N(t), \\ S_S(\omega) &= S_\Psi(\omega) + S_N(\omega), \end{aligned}$$

из уравнений (4) и (5) получаем

$$S_{\varphi_S}(\omega) = \frac{\omega^4}{\left(\frac{k}{a}\right)^2 + \omega^4} [S_\Psi(\omega) + S_N(\omega)].$$

Подставив в полученное выражение значения

$$S_\Psi(\omega) = \frac{k^2}{\omega^4} \quad \text{и} \quad S_N(\omega) = a^2,$$

найдем

$$S_{\varphi_S}(\omega) = a^2 \frac{\omega^4 + \frac{k^2}{a^2}}{\omega^4 + \frac{k^2}{a^2}} = a^2 = \text{const}. \quad (6)$$

Уравнение (6) дает возможность судить о соблюдении оптимальных условий (1) и (2). Спектральная плотность суммарной ошибки остается постоянной (условие (6) выполняется) только в случае, если выполняются условия (1) и (2). В случае, если $\alpha > \frac{k}{a}$, спектральная плотность суммарной ошибки монотонно возрастает с увеличением частоты. В случае $\alpha < \frac{k}{a}$ спектральная плотность суммарной ошибки монотонно падает с увеличением частоты.

Как же использовать рассмотренный критерий, предложенный Е. Бартом [73], для создания системы с самоизменением параметров? Для этого можно использовать разность усредненных напряжений, получаемую от двух фильтров (рис. 101), имеющих разные частотные характеристики. Так как спектральная плотность S_{φ_S} суммарной ошибки на всех частотах должна быть в идеальном случае постоян-

ной, то и усредненная разность напряжений на выходе фильтров должна быть все время равна нулю. Это обстоятельство можно использовать для создания следящей системы, которая будет подбирать коэффициент усиления системы так, чтобы разность напряжения на выходе фильтров равнялась нулю. Из изложенного выше видно, что при этом будет выполняться оптимальная характеристика компаундирования (2)

$$\alpha = \frac{k}{a}.$$

Оптимальная характеристика компаундирования $\tau = \sqrt{\frac{2}{\alpha}}$ (1) может осуществляться с помощью специальной нелинейной связи. Без такой дополнительной связи (не указанной в работе Е. Барта [73]) эффективность приспособления системы к изменению величин k и a будет значительно снижена. Возводить в квадрат сигналы на выходе фильтров, как это предложено в упомянутой работе, нет необходимости. Достаточно их хорошо сгладить и усреднить, а затем вычесть и подать на усилитель следящей системы.

Метод двух частотных фильтров можно применить и при других законах изменения спектральной плотности сигнала и помехи, кроме указанных выше $S_{\Psi}(\omega) = \frac{k^2}{\omega^4}$ и $S_N(\omega) = a^2$. Можно также подобрать еще ряд законов $S_{\Psi}(\omega)$, $S_N(\omega)$ и $Y_z(p)$, при которых в оптимальном случае должно быть $S_{\Psi S}(\omega) = \text{const}^1$.

В других случаях при $S_{\Psi S}(\omega) \neq \text{const}$ метод двух частотных фильтров не применим (без измерения параметров $S_N(\omega)$ или $S_{\Psi}(\omega)$ отдельно).

Выбор полосы пропускания измерительных частотных фильтров представляет собой отдельную задачу, которая, по-видимому, еще не исследовалась.

Как указывалось выше, оптимальные характеристики компаундирования (1) и (2) являются аналогами условий инвариантности установившегося режима, так как позволяют полностью устранить установившуюся ошибку Δ_1 .

Для устранения переходной ошибки Δ_2 при небольших изменениях возмущений в системе могут быть применены еще связи по производным от этих возмущений. Этот во-

¹ Этот вопрос должен быть темой отдельного исследования.

прос подробно рассматривался выше. Применительно к выбранному нами примеру эти связи выглядят так:

$$\alpha = (k_0 + k_1\rho + k_2\rho^2 + \dots) \frac{k}{a};$$

$$\tau = (k_0 + k_1\rho + k_2\rho^2 + \dots) \sqrt{\frac{2}{a}},$$

где k_0, k_1, k_2 выбираются из условий инвариантности. В установившемся режиме $\rho = 0$, $\alpha = k_0 \frac{k}{a}$ и $\tau = k_0 \sqrt{\frac{2}{a}}$, где $k_0 = 1$.

КИБЕРНЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С ПЕРЕМЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ, УПРАВЛЯЕМЫЕ ПО ПОКАЗАТЕЛЮ КАЧЕСТВА

Если параметры спектральной плотности помехи $N(t) = N_1(t) + N_2(t)$ не могут быть измерены, то необходимо применить замкнутую систему экстремального управления с обратной связью (см. рис. 99,б и 100,б).

Основное затруднение в создании систем с обратной связью состоит в том, что практически трудно осуществить в ней измерительный элемент, вырабатывающий напряжение, пропорциональное показателю качества. Трудность измерения возмущающих воздействий (рассмотренных выше) значительно меньше, и поэтому создание систем, действующих от возмущений, значительно проще.

Трудности измерения среднеквадратичной ошибки в следящих системах (обратная величина которой служит показателем качества) не меньше, чем трудности раздельного измерения помехи и полезного сигнала, ибо

$$N(t) = S(t) - \Psi(t).$$

Если шум можно измерить отдельно (например как непрерывно и длительно действующую высокочастотную составляющую входного сигнала), то и измерение среднеквадратичной ошибки

$$\epsilon_{\varphi}^2 = I_2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} \varphi^2(t) dt$$

сводится к интегрированию ее квадрата за некоторое время, называемое временем усреднения.

Существуют и другие способы измерения среднеквадратичной ошибки. Иногда для измерения среднеквадратичной ошибки можно применить описанный выше способ, называемый способом пробных, или маркирующих, импульсов. При этом способе на вход системы периодически подаются воздействия, значения которых точно известны. Продолжительность маркирующих импульсов должна быть больше длительности переходных процессов в системах. Тогда в конце каждого маркирующего импульса мы имеем возможность измерить ошибку системы, возникающую из-за наличия шума.

Это измерение позволяет осуществить любую из известных нам схем приспособления характеристик системы.

Как только задача измерения среднеквадратичной ошибки основной системы решена, дальнейшее осуществление обратной связи с ЭЛД не вызывает особых затруднений. Здесь может быть применена любая из четырех известных схем поиска экстремума.

Регулирующие воздействия выяснены нами выше. Они остаются теми же: возможно изменение параметров, нелинейностей или структуры как контура обратной связи, так и компаундирующих связей основной системы или того и другого одновременно.

О МНОГОКРАТНОМ ПРИМЕНЕНИИ КИБЕРНЕТИЧЕСКОГО САМОИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК

При выборе схемы и характеристик обратной связи экстремального регулятора имеется принципиальная возможность применить еще раз (вторично) как компромиссную настройку, так и статистические методы. Эти методы до сих пор использовались, как это показано выше, только для синтеза обратных связей основной системы. При дальнейшем развитии техники экстремальных систем эти же методы можно применить и для синтеза обратных связей с ЭЛД, используемых в экстремальных регуляторах. Работ в этом направлении пока нет.

Нетрудно заметить принципиальную возможность третьего, четвертого и последующих применений принципа самоизменения характеристик. Легко, например, представить целесообразность самоизменения характеристик кибернетического регулятора, предназначенного для самоизменения характеристик основной системы, если этот ре-

гулятор не является вполне идеальным, обладает инерцией и т. п. Такие многократные системы самоизменения характеристик еще не созданы, но в математике уже имеется адекватный таким системам аппарат в виде методов последовательных приближений (итераций) к наиболее идеальному решению и способы оценки целесообразности ограничения первым, вторым и дальнейшими приближениями.

Обычная система с характеристиками, выбираемыми при настройке, отвечает первому приближению. Добавочные (первичные) кибернетические регуляторы KP , обеспечивающие самоизменение характеристик обычных систем (см. рис. 99 и 100), — второму, а добавочные (вторичные) кибернетические регуляторы, обеспечивающие самоизменение характеристик первичных кибернетических систем, — третьему приближению и т. д.

Предполагается, что каждый последующий регулятор является значительно медленнее действующим, чем предыдущий. Системы регуляторов с близкими собственными частотами основной и кибернетической части никем еще не изучались.

Заметим, что применение многократного кибернетического управления возникает только в связи с неточностью работы системы.

Ясно, например, что если бы основная система была идеальной и работала без ошибки, то не нужно было бы никакого присоединения к ней устройства кибернетического изменения ее характеристик.

Если же основная система не идеальна, а первичное кибернетическое устройство работает точно в соответствии с оптимальной характеристикой компандирования, то не требуется никакого вторичного кибернетического регулятора. Необходимость во вторичном кибернетическом регуляторе может возникнуть только при инерционности, неточности и других недостатках первичного кибернетического устройства.

КОМБИНИРОВАННЫЕ КИБЕРНЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С ПЕРЕМЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Если параметры спектральной плотности части помех $N_1(t)$ могут быть измерены, а часть помех $N_2(t)$ не поддается замеру, а также в случае, когда параметры спектральной плотности всех помех поддаются измерению, но

характеристики четырехполюсников $Y_1(p)$, $Y_2(p)$, $k_N(p)$ и $l_S(p)$ недостаточно стабильны или если нелинейности компаундирующих связей выбраны неточно, следует применить комбинированную кибернетическую систему (см. рис. 99, в и 100, в).

Преимущества комбинированных кибернетических систем мы указали выше. Они сводятся в основном к повышению точности, быстродействия системы при одновременном снижении мощности замкнутого контура системы. Для того чтобы составить более четкое представление о конкретных схемах комбинированных кибернетических систем, рассмотрим примеры некоторых кибернетических систем, применяемых для уменьшения ошибки основных систем регулирования.

Система регулирования по производным от возмущений с самоизменением коэффициентов компаундирующих связей

В работе [16] описана система регулирования скорости электродвигателя, в которой при помощи компаундирующих связей по основному возмущению и его производным (в соответствии с условиями инвариантности) устраняется как установившаяся, так и переходная ошибка, вызываемая этим возмущением.

Для устранения ошибки оказалось достаточно применить жесткую связь по моменту нагрузки и по двум его первым производным

$$l(p) = l_0 + l_1 p + l_2 p^2.$$

Такие связи полностью устраняют ошибку в данной линейной системе. Реальная система регулирования скорости хотя и слабо, но все же нелинейна, поэтому ошибка будет только значительно уменьшена, но не устранена полностью. Для того чтобы расширить область режимов работы системы, в которых полностью устраняется ошибка, предложено *корректировать коэффициенты компаундирующих связей l_0 , l_1 и l_2 в зависимости от параметров исходного режима системы.*

Это достигается двумя способами:

а) применением нелинейных компаундирующих связей (регулирование по возмущению);

б) применением добавочных обратных связей, производящих поиски требуемых значений коэффициентов, при

которых ошибка равна нулю (регулирование по показателю качества), а также комбинированным способом.

Подбор коэффициентов l_0 , l_1 и l_2 можно производить раздельно. Коэффициент l_0 должен быть выбран так, чтобы установившаяся статическая ошибка системы равнялась нулю. Коэффициент l_1 выбирается из условия полного устранения ошибки от скорости (ошибки следования), а коэффициент l_2 — из условия полного устранения ошибки от ускорения.

Как видно из примера, при применении компаундирующих нелинейных связей, выбранных в соответствии с оптимальными характеристиками компаундирования,

$$l_0 = f_1(L), \quad l_1 = f_2(L) \quad \text{и} \quad l_2 = f_3(L)$$

значительно проще решается задача полного устранения ошибки в слабонелинейной системе, чем при применении колебательных обратных связей с ЭЛД.

Другим примером из этой же области может служить система программного управления скоростью электродвигателя. Эта система также слабонелинейна, но характер нелинейностей таков, что легко достигается полное выполнение условий инвариантности при помощи изменения амплитуды добавочных воздействий по производным от задания в зависимости от начальной скорости [16].

МЕТОДЫ ОБЪЕКТИВНОГО ВЫЯВЛЕНИЯ ВОЗМУЩАЮЩИХ И РЕГУЛИРУЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Как уже указывалось выше, разработка объективных методов выявления возмущающих и регулирующих воздействий представляет большой интерес. В широком смысле речь идет о методе, который должен дать ответ на вопрос, что лучше варьировать в данной системе — параметры или нелинейности, структуру или коды импульсов и т. д. Таких методов еще нет. Более узкая задача состоит в решении вопроса, какие из параметров лучше изменять для достижения более полного экстремума более простым способом. Для этого можно применять статистические методы определения оптимальной передаточной функции, разработанные Винером [88], Бутоном [91] и др. Там, где это затруднено, можно рекомендовать применение более грубых приближенных методов в сочетании с экспериментальным уточнением.

В качестве примера применения приближенного статистического метода к кибернетической системе рассмотрим задачу выбора коэффициента усиления следящей системы в зависимости от соотношения спектрального состава полезного сигнала и помехи. В данном примере изменение варьируемых параметров необходимо для компенсации

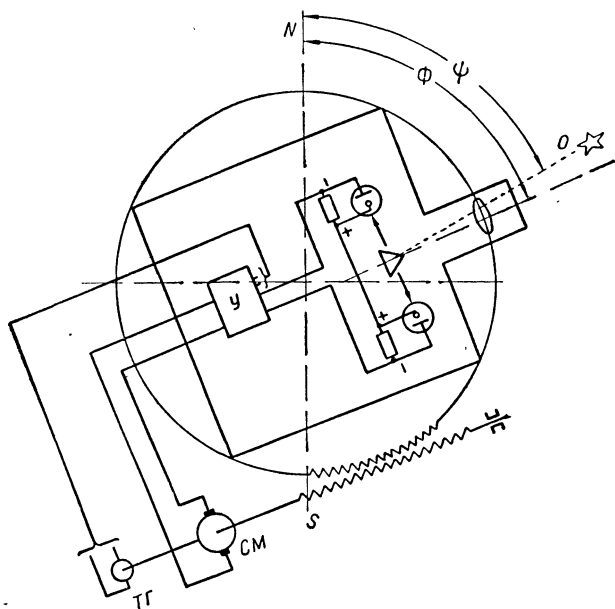


Рис. 102. Схема системы, следящей за положением светящегося тела на некотором участке горизонта.

влияния спектров сигнала и помехи на основные свойства системы.

Следящая система, изображенная на рис. 102, представляет собой систему поиска светящегося тела на некотором участке горизонта. Такая система может найти применение как в астрономии для слежения за светящимся небесным телом, так и, например, в кибернетической «черепашке», описанной выше. Отличием данного варианта «черепашки» является отсутствие поисковых колебаний в цепи обратной связи.

Управляющим воздействием для системы является угол Ψ , образуемый направлением на светящееся тело и линией

Север — Юг (азимут тела). Выходной величиной является угол Φ между продольной осью «черепахи» и линией $N-S$ (азимут «черепахи»). Система (рис. 102) наглядно подтверждает сформулированное выше правило: если объект регулирования таков, что режимы, отвечающие, по крайней мере, двум точкам экстремальной характеристики $\varphi(\mu)$, существуют одновременно, то поиск экстремума можно осуществить при помощи обычной неколебательной связи без специальных ЭЛД.

Другие светящиеся тела, различные отражения и тени движущихся вокруг «черепахи» предметов, а также изменения прозрачности окружающей атмосферы и многие другие факторы представляют собой помехи для системы. Поэтому сигналы $S(t)$ (на входе системы) можно представить как сумму полезного сигнала $\Psi(t)$ и помехи (шума) $N(t)$

$$S(t) = \Psi(t) + N(t).$$

Произведем краткий анализ системы, приняв, что ошибка системы (угол между направлением на источник и осью «черепахи») и помеха являются стационарными случайными функциями времени. Уравнения динамики элементов системы имеют следующий вид:

закон регулирования

$$\Sigma = S - \Phi - m_1 p \Phi;$$

усилитель

$$\mu = \alpha_1 \Sigma;$$

сервомотор

$$(\tau p + 1) p \Phi = \alpha_2 \mu,$$

где μ — напряжение на выходе усилителя;

τ — постоянная времени сервомотора;

m_1 — коэффициент тахогенератора.

Исключая промежуточные переменные Σ и μ , находим уравнение динамики всей системы в замкнутом состоянии

$$[\tau p^2 + (1 + \alpha_1 \alpha_2 m_1) p + \alpha_1 \alpha_2] \Phi = \alpha_1 \alpha_2 \Psi.$$

Полная проводимость системы в замкнутом состоянии

$$Y_3(p) = \frac{\omega_0^2}{p^2 + \frac{1 + \alpha_p m_1}{\tau} p + \omega_0^2}, \quad \text{где } \omega_0^2 = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\tau} = \frac{\alpha_p}{\tau}.$$

Относительный коэффициент затухания системы

$$c_{12} = \frac{1 + \alpha_1 \alpha_2 m_1}{2\omega_0} \tau, \text{ где } \omega_0 = \sqrt{\frac{\alpha_p}{\tau}}.$$

Заменяя $p = j\omega$, мы можем построить ряд амплитудно-фазовых характеристик системы в замкнутом состоянии с безразмерным отсчетом частоты $\left[\frac{\omega}{\omega_0}\right]$ при различных значениях коэффициента затухания c_{12} (рис. 103,а). Точки пересечения этих характеристик с кругом единичного радиуса дают нам значения частоты среза $\omega_{\text{ср.з}}^1$.

Пользуясь графиком (рис. 103,а), строим вспомогательный график зависимости $\frac{\omega_{\text{ср.з}}}{\omega_0} = f(c_{12})$ (рис. 103,б).

Статистические методы исследования линейных систем регулирования в современном состоянии позволяют выбрать полосу пропускания частот (а иногда и другие показатели частотной характеристики) в зависимости от спектра частот основного возмущения $\Psi(\omega)$ и спектра частот помехи $N(\omega)$ так, чтобы среднеквадратичная ошибка системы

$$\varepsilon^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} [\Psi(t) - \Phi(t)]^2 dt$$

была минимальной.

Изложенные выше положения из теории телефонной связи вполне применимы и к нашей задаче. Здесь также существует оптимальное значение полосы пропускания частот. В данной системе показателем качества является величина, обратная среднеквадратичной ошибке следования

$$\varphi = \frac{1}{\varepsilon}.$$

Регулирующим воздействием служит частота среза $\omega_{\text{ср.з}}$ или связанная с ней величина — коэффициент затухания c_{12} . Возмущающими воздействиями являются параметры спектра частот полезного сигнала и помехи $\frac{A}{a}$ и k .

¹ Следует отличать частоту среза замкнутой системы $\omega_{\text{ср.з}}$ от частоты среза ω_c , при которой амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой системы пересекается с окружностью единичного радиуса.

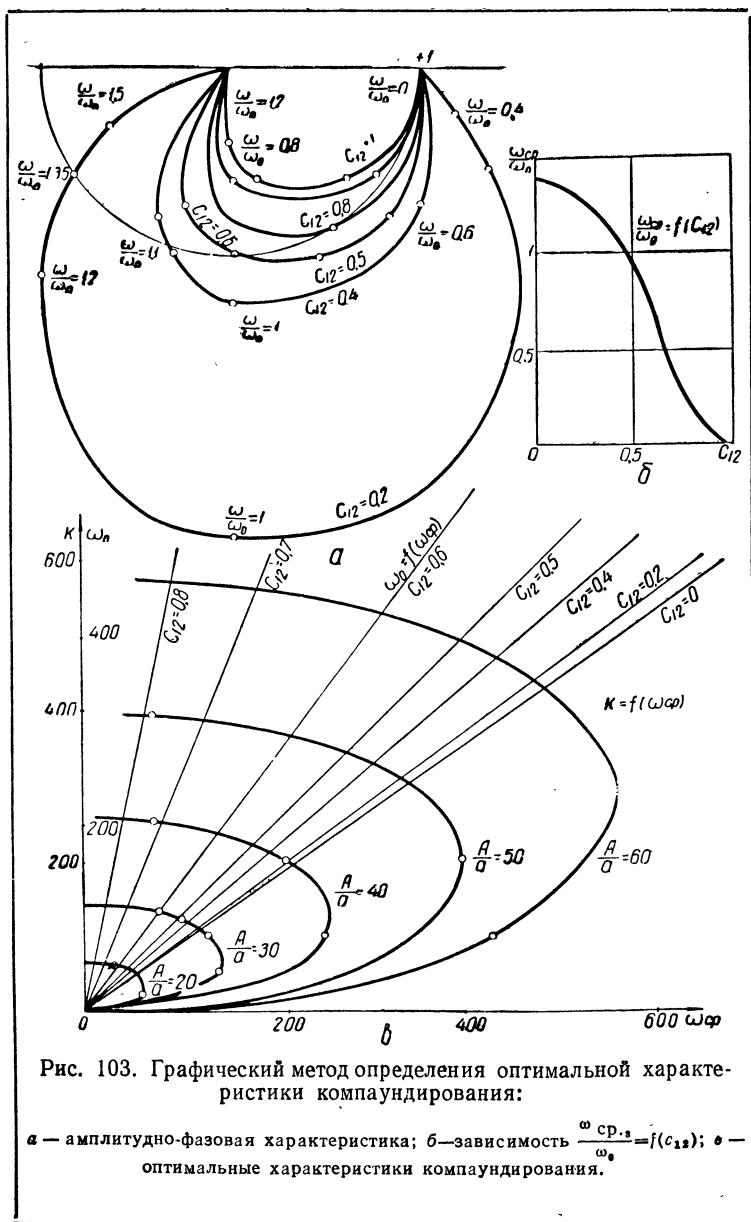


Рис. 103. Графический метод определения оптимальной характеристики компаундирования:

a — амплитудно-фазовая характеристика; **б** — зависимость $\frac{\omega_{cp}}{\omega_0} = f(C_{12})$; **в** — оптимальные характеристики компаундирования.

Если принять, что частотная характеристика модуля усиления замкнутой системы имеет вид прямоугольника

$$\begin{aligned} \text{при } 0 < \omega < \omega_{\text{ср.з}} \quad M_3 = \text{const}, \\ \text{при } 0 > \omega > \omega_{\text{ср.з}} \quad M_3 = 0, \end{aligned}$$

где M_3 — модуль усиления, то, как показал Ж. Дютиль [2], оптимальная величина частоты среза $\omega_{\text{ср.з}}$ определяется решением уравнения

$$S_{\Psi}(\omega_{\text{ср.з}}) = S_N(\omega_{\text{ср.з}}).$$

Для дальнейшего изложения нам нужно знать спектральную характеристику (плотность) сигнала $\Psi(t)$, спектральную характеристику шума $N(\omega)$ и частоту среза системы $\omega_{\text{ср.з}}$. Допустим, что светящееся тело, за которым следит система, перемещается по горизонту рывками (см. рис. 42), тогда спектральная плотность (при экспоненциальном, пуассоновском, распределении вероятности k)

$$S_{\Psi}(\omega) = \frac{A^2}{\pi} \cdot \frac{2k}{(2k)^2 + \omega^2},$$

где k — среднее число пересечений функцией $\Psi(t)$ оси времени за 1 сек. (текущая частота). Допустим, что шум, мешающий поиску, является «белым шумом», для которого на всех частотах энергия одинакова,

$$S_N(\omega) = a^2.$$

Спектральные характеристики сигнала и шума могут быть получены аналитически разложением соответствующих функций в ряд Фурье или экспериментально при помощи гармонических анализаторов или коррелографов.

Для того чтобы использовать найденное Ж. Дютилем оптимальное соотношение параметров системы и параметров спектральных плотностей сигнала и шума для расчета, мы располагаем такими двумя соотношениями (см. рис. 103,б):

$$\begin{aligned} \frac{\omega_{\text{ср.з}}}{\omega_0} &= f(c_{12}), \\ \frac{A^2}{\pi} \cdot \frac{2k}{(2k)^2 + \omega_{\text{ср.з}}^2} &= a^2. \end{aligned}$$

Решать эти уравнения совместно можно графически. Для этого, например, мы можем по точкам построить се-

мейство кривых (рис. 103, в):

$$\omega_0 = f_2(\omega_{\text{ср.з}}) \text{ при } c_{12} = \text{const};$$

$$k = f_3(\omega_{\text{ср.з}}) \text{ при } \frac{A}{a} = \text{const}.$$

Диапазон изменения величин c_{12} и $\frac{A}{a}$ в реальных системах заранее известен. Точки пересечения кривых дают оптимальные соотношения между параметрами системы ω_0 , c_{12} , $\omega_{\text{ср.з}}$ и параметрами спектров $\frac{A}{a}$ и k . Пользуясь графиком (рис. 103, в), легко, например, решить вопрос, как должны изменяться c_{12} и $\omega_{\text{ср.з}}$ (а следовательно, и величины α_p и τ или m_1) при медленном изменении $\frac{A}{a}$ и k , т. е. найти графики, отвечающие оптимальным характеристикам компаундирования. Соответствующие компаундирующие связи по $\frac{A}{a}$ и k должны осуществлять эти характеристики.

Нелинейная зависимость $f\left(\frac{A}{a}, k, c_{12}, \omega_0\right) = 0$, представленная на рис. 103, в, осуществляется при помощи компаундирующих связей по возмущениям $\frac{A}{a}$ и k . Регулирующими воздействиями должны быть величины, входящие в c_{12} и ω_0 , например, коэффициент усиления системы или постоянные времени ее элементов. Графические методы определения оптимальных характеристик компаундирования применимы не только для систем второго порядка (рассмотренных в данном примере), но могут быть использованы и для систем более высокого порядка.

КИБЕРНЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА, УПРАВЛЯЕМАЯ ПО ВОЗМУЩЕНИЮ

Для осуществления оптимальной характеристики компаундирования (при $A = \text{const}$, $k = \text{const}$, $a = \text{var}$) достаточно осуществить компаундирующую связь, изменяющую коэффициент усиления системы (делитель D , рис. 104) в зависимости от интенсивности шума.

На рис. 104 показана система, следящая за положением светящегося тела с самоизменением коэффициента усиления (полосы пропускания частот) в зависимости от интенсивности помех, т. е. с управлением по возмущению. Мерой

интенсивности помех является длительно действующая высокочастотная составляющая напряжения ошибки системы. Для получения этой составляющей используются Φ_1 — фильтр высших частот и Φ_2 — сглаживающий фильтр. Напряжение на выходе фильтра Φ_2 выпрямляется и используется затем при помощи обычной схемы компенсатора для изменения коэффициента усиления основной системы.

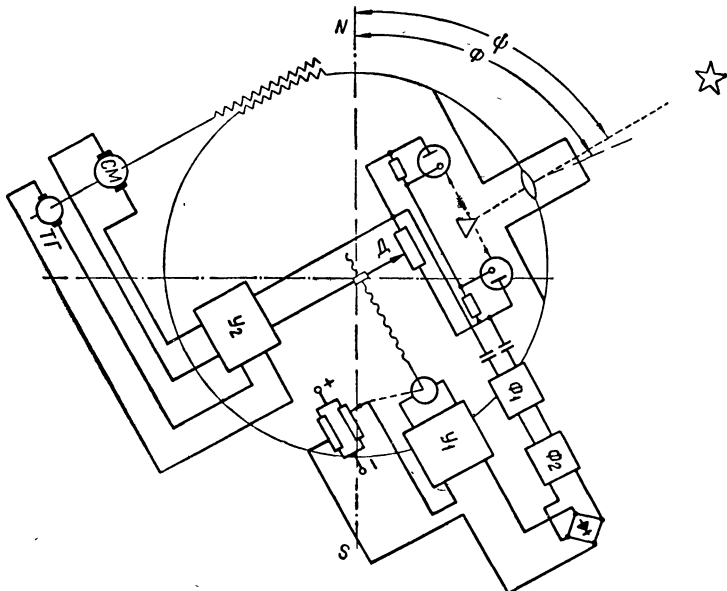


Рис. 104. Схема системы, следящей за положением светящегося тела самоизменением коэффициента усиления a_p в зависимости от интенсивности помех (принцип управления по возмущениям).

Сопротивление делителя D выбирается так, чтобы при отсутствии помех коэффициент усиления системы был возможно больше (относительный коэффициент затухания колебаний около $c_{12} = 0,25$). При появлении помех коэффициент усиления системы (а следовательно, и полоса пропускания частот) должен снижаться пропорционально энергии помех, или, что более точно, по нелинейному закону в соответствии с оптимальной характеристикой компаундирования. При максимально интенсивных помехах коэффициент относительного затухания доходит до $c_{12} = 1$.

На рис. 105 показан пример решения той же задачи слежения за положением светящегося тела при помощи системы с самоизменением коэффициента усиления (полосы пропускания частот), действующей по регулируемой величине — ошибке системы.

Так как зависимость ошибки системы от коэффициента усиления (полосы пропускания) имеет экстремальный характер (что объяснено выше), то для поиска оптимального соотношения использована аппаратура экстремального регулирования, действие которой уже рассматривалось ра-

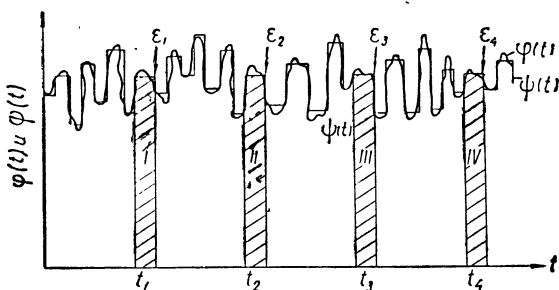


Рис. 106. Подача маркирующих импульсов (I, II, III, IV) для измерения ошибок системы ($\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4$) по схеме рис. 105.

нее. Отличие состоит лишь в том, что ошибка системы измеряется периодически по методу маркирующих импульсов. Эти маркирующие импульсы напряжения (рис. 106) появляются в командном сигнале в моменты измерения ошибки (ламели 2 и 4 первого поля шагового распределителя ШР) за счет зажигания контрольной лампы Л (рис. 105). Лампа Л должна быть намного ярче светящегося тела или должна быть расположена в другом поясе поиска. Угол между осью системы и постоянным направлением на контрольную лампу после переходного процесса и является ошибкой (последней по времени или средней) системы, вызываемой наличием помех. Если помехи уменьшаются так, что экстремум уходит за пределы регулирования, то делитель доходит до крайнего положения, где действует концевой выключатель (на рис. 105 не указан). При этом коэффициент усиления основной системы доходит до наибольшего (по условию устойчивости или допустимой колебательности) значения ($c_{12} \approx 0,25$).

Комбинированную систему самоизменения коэффициента усиления мы получим, если соединим системы, изображенные на рис. 104 и 105, вместе. При этом выходные перемещения сервомоторов суммируются при помощи рычага или механического дифференциала. Кроме упомянутых выше, мы здесь можем отметить еще одно преимущество комбинированной системы: в промежутках между моментами периодического измерения φ система хотя и более грубо, но все же управляется. Самоизменение α_p не прерывается в промежутках между маркирующими импульсами, что повышает точность и быстрдействие системы.

СИСТЕМЫ, СТРЕМЯЩИЕСЯ УМЕНЬШИТЬ РАЗЛИЧИЕ МЕЖДУ ОСНОВНОЙ СИСТЕМОЙ РЕГУЛИРОВАНИЯ И ЕЕ МОДЕЛЬЮ

Оптимальная реакция системы регулирования на импульсное воздействие может быть иногда определена статистическими методами. Если к тому же система может периодически отключаться, то возникает возможность подавать контрольные импульсы на основную систему и на ее оптимальную модель, сравнивать переходные процессы на их выходах и таким образом получать в виде разности выходов значения показателя качества Φ . Этот показатель может быть использован для изменения характеристик, в частности, параметров основной системы. Принципиальная схема такой приспособляющейся системы описана в литературе [92].

Возможность периодического отключения обратной связи (корректора) имеется в том случае, когда основная система является комбинированной, т. е. состоит из разомкнутой и замкнутой частей. Отключение корректора на малое время не отключает системы регулирования в целом.

ВЫБОР ПЕРИОДА ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПО СТАТИСТИЧЕСКИМ КРИТЕРИЯМ

Рассмотрим теперь одно из возможных применений статистической теории для повышения помехоустойчивости систем экстремального регулирования шагового типа или систем с модулирующим воздействием.

Представим себе, что исходное состояние системы находится где-либо в точке A , на склоне экстремальной характеристики. В этом состоянии объект регулирования получает небольшое приращение (шаг) регулирующего

воздействия, изменяющегося по закону прямой или ступенчато-тому. В объекте происходят определенные переходные процессы и затем регулятор должен оценить, привел ли этот шаг к увеличению показателя экстремума или, наоборот, к его уменьшению.

В реальной системе одновременно с шагом изменения регулирующего воздействия на объект действуют многочисленные другие воздействия (помехи), что может привести к неправильному выводу и, следовательно, к неправильному срабатыванию регулятора. В данном случае мы имеем дело с классической задачей статистической теории регулирования, сводящейся к исследованию некоторого четырехполюсника с проводимостью $Y_3(p)$, находящегося под одновременным действием полезного сигнала $\Psi(t)$ и помехи $N(t)$.

Полезным сигналом является изменение регулирующего воздействия M , а четырехполюсником — объект регулирования. На его выходе мы должны получить изменение показателя экстремума Φ , по возможности свободное от влияния помехи $N(t)$.

Особенность постановки задачи состоит в том, что в экстремальных системах *легко варьировать в некоторых пределах полезный сигнал, а параметры и схема объекта регулирования или вовсе не поддаются изменению или поддаются в небольшой степени*, в то время как в обычных задачах, наоборот, варьируется схема и параметры четырехполюсника.

В качестве примера применим к данной задаче результаты работы С. Джонса [2], основанной на критерии Н. Винера.

Задача в этой работе ставится так. На четырехполюсник $Y_3(p)$, имеющий импульсную переходную функцию (или функцию веса) $W(t)$, действует сумма полезного сигнала $\Psi(t)$ и помехи $N(t)$; на выходе его получаем $\Phi(t)$. Все указанные функции являются стационарными статистическими функциями времени, причем помеха $N(t)$ является «белым шумом», т. е. функцией, имеющей постоянную спектральную плотность на всех частотах $N(\omega) = \text{const} = a^2$.

Ошибка системы равна $\varphi = \Psi(t) - \Phi(t)$, а среднеквадратичная ошибка определяется выражением

$$\varepsilon^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} [\Psi(t) - \Phi(t)]^2 dt.$$

Необходимо определить переходную функцию веса системы $W_3(t)$, при которой ϵ минимальна. Для решения используется условие минимума среднеквадратичной ошибки, данное Винером,

$$k_{S\Psi}(\tau) = \int_0^{\infty} A_S(t - \tau) W(\tau) dt,$$

где $k_{S\Psi}$ — взаимокорреляционная функция $S(t)$ и $\Psi(t)$; A_S — автокорреляционная функция $S(t)$.

Пользуясь этой формулой, получим следующие результаты:

1. При $a = 0$ («белый шум» отсутствует) функция веса оптимальной системы $W_3(t)$ должна быть дельта-функцией времени $\delta(t) = p[1]$. Практически это означает, что при отсутствии шума четырехполосник $Y_3(p)$ должен иметь бесконечно большой коэффициент усиления и пропускать все частоты. Как уже указывалось, этот нереальный результат объясняется тем, что формула Винера учитывает только вынужденную составляющую ошибки и пренебрегает свободной ее составляющей. В системах с достаточной устойчивостью такое приближение допустимо.

2. При $a \rightarrow \infty$ («белый шум» очень велик) функция веса оптимальной системы $W_3(t)$ должна совпадать с автокорреляционной функцией полезного сигнала.

В промежутке, где $0 < a < \infty$ и $W_3(t)$ должна занимать некоторое среднее положение между дельта-функцией времени и автокорреляционной функцией сигнала, также являющейся функцией времени.

Применим эти результаты к выбору закона изменения регулирующего воздействия в следующем порядке.

1. Свойства объекта экстремального регулирования известны, следовательно, известна и его импульсная функция $W(t)$.

2. Зная $W(t)$ и пользуясь указанными выше положениями, находим оптимальную автокорреляционную функцию сигнала при малых помехах, когда $a = 0$, и при очень больших помехах, когда $a = \infty$.

3. По оптимальным автокорреляционным функциям сигнала определяем оптимальные законы изменения регулирующего воздействия, осуществляемые экстремальным регулятором.

Приведем примеры применения статистических методов

для выбора частоты включения сервомотора, обеспечивающей наибольшую помехоустойчивость систем экстремального регулирования.

Пример 1. Функция веса объекта первого порядка определяется как решение уравнения динамики объекта

$$(\tau p + 1) \varphi = a \delta(t) = a p [1], \text{ т. е. } Y_s(p) = \frac{a}{\tau p + 1}.$$

Она может быть определена точно или *аппроксимирована*. В данном случае функция веса может быть аппроксимирована следующим выражением:

$$W(t) = W e^{-\frac{t}{\tau}},$$

где

$$W = \frac{a}{\tau},$$

τ — постоянная времени объекта регулирования, т. е. аппроксимирующее выражение совпадает с точным решением.

Известно также, что регулятор с вынужденными колебаниями создает изменения регулирующего воздействия по закону прямоугольных импульсов. Автокорреляционная функция такого сигнала равна [2]

$$A_\mu(t) = A^2 e^{-2kt},$$

где k — среднее число пересечений оси времени, т. е. число включений сервомотора (время включения мы считаем весьма малым, таким, что регулирующее воздействие изменяется как бы скачком на постоянную величину A).

Из указанных выше соображений находим

$$W(t) < A_\mu(t) \text{ или } W < A^2, \quad 2k < \frac{1}{\tau} \text{ и } A > \sqrt{\frac{a}{\tau}}.$$

Практический вывод состоит в выборе числа включений сервомотора в секунду

$$k \leq \frac{1}{2\tau}.$$

Если, например, постоянная времени равна $\tau = 10$ сек., то число включений сервомотора не следует выбирать чаще одного раза в 20 сек., причем эта цифра относится к наличию самых больших помех типа «белого шума». Если помехи меньше, сервомотор можно включать чаще. Амплитуда регулирующего воздействия A выбирается экспериментально.

Таким образом, удастся определить верхнюю границу частоты включения сервомотора системы с вынужденными колебаниями (шагового типа или с модулирующим воздействием).

Выше мы говорили об *аппроксимации*, а не о точном выражении импульсной функции системы по следующим причинам.

Недостаток существующих методов нахождения оптимальной импульсной функции следящей системы состоит в том, что решение (единственно возможное) часто получается в классе функций с «конеч-

ной памятью», т. е. таких функций, которые равны нулю везде, кроме определенного интервала времени, например:

$$W(t) \neq 0 \text{ при } 0 < t < T;$$

$$W(t) = 0 \text{ при } 0 > t \text{ и } t > T.$$

Это единственно точное решение часто содержит в себе дельта-функции $\delta(t) = p$ [1] и их производные, а реально реализуемые импульсные функции систем не содержат в себе дельта-функций. Кроме того, реально реализуемые системы имеют импульсные функции класса функций с «бесконечной памятью»; такими называются функции, не равные нулю при всех моментах времени, кроме некоторых точек оси времени. Поэтому, для того чтобы довести решение задачи до практически полезного вывода, приходится приближенно заменять (аппроксимировать) точную, единственную, функцию веса системы некоторой функцией времени, причем различие этих функций должно быть возможно меньше.

Методика получения аппроксимированных выражений для импульсной функции системы разрабатывалась Ю. П. Леоновым (ИАТ АН СССР).

Пример 2. Выше мы рассмотрели применение метода Винера — Джонса к задаче повышения помехоустойчивости систем экстремального регулирования с вынужденными колебаниями только в качестве примера возможных применений статистических методов к данной задаче.

Во втором примере покажем применение для той же цели другого весьма приближенного статистического метода, предложенного Ж. Дютилем. По этому методу частота среза $\omega_{\text{ср.з}}$ варьированного четырехполосника $Y_3(p)$ (в нашем случае — объекта регулирования) приравняется к частоте, при которой спектральная плотность сигнала равна спектральной плотности помехи.

В этом случае должны быть известны: амплитудно-фазовая характеристика четырехполосника

$$Y_3(j\omega) = G(\omega) + jB(\omega),$$

спектральная плотность полезного сигнала $S_\psi(\omega)$ и спектральная плотность помехи $S_N(\omega)$.

Из уравнения

$$M^2(\omega_{\text{ср.з}}) = G^2(\omega_{\text{ср.з}}) + B^2(\omega_{\text{ср.з}}) = 1$$

находим частоту среза $\omega_{\text{ср.з}}$ и, подставляя ее в уравнение

$$S_\psi(\omega_{\text{ср.з}}) = S_N(\omega_{\text{ср.з}}),$$

находим условие, дающее минимум среднеквадратичной ошибки. Этот метод (как и метод Винера) учитывает только вынужденную составляющую ошибки, но является значительно более приближенным, так как предполагает, что амплитудно-частотная характеристика $M(\omega)$ имеет вид прямоугольника:

$$0 < \omega < \omega_{\text{ср.з}}, \quad M(\omega) = 1;$$

$$\omega > \omega_{\text{ср.з}}, \quad M(\omega) = 0,$$

что выполняется только приближенно. Все же, учитывая инженерный характер расчетов и возможность их дальнейшего эксперимен-

тального уточнения, можно рекомендовать этот простой и удобный метод для приближенных расчетов.

Рассмотрим в качестве примера применение метода Ж. Дютиля к объекту первого порядка.

1. Амплитудно-фазовая характеристика объекта первого порядка

$$Y_3(j\omega) = \frac{\alpha}{j\tau\omega + 1} = G_3(\omega) + jB_3(\omega) = \frac{\alpha}{\tau^2\omega^2 + 1} - j \frac{\alpha\tau\omega}{\tau^2\omega^2 + 1}.$$

Модуль усиления

$$M(\omega) = \sqrt{G_3^2(\omega) + B_3^2(\omega)} = \alpha \sqrt{\frac{1}{\tau^2\omega^2 + 1}}.$$

2. Частота среза $\omega_{\text{ср.з}}$ определяется из уравнения $M(\omega_{\text{ср.з}}) = 1$

$$\omega_{\text{ср.з}}^2 = \frac{\alpha^2 - 1}{\tau^2}.$$

Возможны различные способы приближенной замены реальной амплитудно-частотной характеристики $M(\omega)$ прямоугольной $M = \text{const}$ при $0 < \omega < \omega_{\text{ср.з}}$. Мы, в частности, как бы «вырезаем» из площади ограниченной реальной характеристикой прямоугольник с высотой $M = 1$. Можно показать, что при этом всегда делается ошибка одного и того же знака: частота $\omega_{\text{ср.з}}$ всегда будет несколько занижена. Поэтому мы и заменяем в дальнейшем знак равенства знаком неравенства

$$\omega_{\text{ср.з}}^2 \geq \frac{\alpha^2 - 1}{\tau^2}.$$

3. Полезный сигнал (изменение регулирующего воздействия) имеет вид прямоугольных импульсов, частоту которых мы хотим определить. Спектральная плотность такой функции времени (при экспоненциальном законе плотности вероятности k)

$$S_{\Psi}(\omega) = \frac{2k}{(2k)^2 + \omega^2} \cdot \frac{A^2}{\pi},$$

где k — среднее число включений сервомотора за 1 сек. Помехой, допустим, является «белый шум» с постоянной спектральной плотностью $S_N(\omega) = a^2$.

4. Применяя метод Ж. Дютиля [2], получим оптимальное соотношение

$$S_{\Psi}(\omega_{\text{ср.з}}) = S_N(\omega_{\text{ср.з}}) = a^2$$

или

$$\frac{A^2}{\pi} \cdot \frac{2k}{(2k)^2 + \omega_{\text{ср.з}}^2} \leq a^2,$$

откуда

$$k \leq \frac{a_1 - \sqrt{a_1^2 - 4\omega_{\text{ср.з}}^2}}{4}, \text{ где } a_1 = \frac{A^2}{a^2\pi}; \omega_{\text{ср.з}}^2 \geq \frac{\alpha^2 - 1}{\tau^2},$$

$$k \leq \frac{a_1}{2} \left[1 + \frac{\alpha^2 - 1}{a_1\tau} - \frac{(\alpha^2 - 1)^2}{a_1\tau^2} + \dots \right]$$

Поскольку при $\omega_{\text{ср. в}} = 0$ неравенство усиливается, то получим

$$\frac{A^2}{\pi} \frac{1}{2k} < a^2 \quad \text{или} \quad A^2 < a^2 2k\pi.$$

Таким образом, мы получили расчетные формулы в виде неравенств для приближенного определения средней частоты включения сервомотора k и амплитуды изменения регулирующего воздействия A в зависимости от энергии помехи a^2 и параметров объекта регулирования α и τ .

Напомним, что мы пользуемся линейными уравнениями, так как предполагаем, что рабочая точка, определяющая состояние системы, находится на склоне характеристики, где $\alpha = \text{const}$, и что за один шаг, в течение которого мы хотим уменьшить действие помех, система еще не перейдет через экстремум (уравнения формулы С табл. 10).

УМЕНЬШЕНИЕ ДЕЙСТВИЯ ПОМЕХ ПРИ ПОМОЩИ КВАНТОВАНИЯ

Воздействия или сигналы, передаваемые от одного элемента системы к последующему, могут иметь самую различную физическую природу (размерность) и, кроме того, в них могут быть применены весьма различные способы модуляции (коды).

Модулировать — это значит изменять параметры некоторой физической величины (переносчика) в соответствии с информацией, которую нужно передать по данной связи.

Наиболее простой является так называемая амплитудная модуляция, при которой величина напряжения, тока и т. п. изменяется по величине, а иногда и по знаку, пропорционально сигналу. Примером может служить модуляция постоянного тока при помощи микрофона или телефонной связи.

Теорема Котельникова устанавливает, что для точной передачи информации достаточно передать значения функции, отсчитанные через равные, достаточно близкие промежутки времени.

Для уменьшения действия помех исходный сигнал $\Psi(t)$ подвергается квантованию по уровню, т. е. из непрерывной плавной формы преобразуется в дискретную ступенчатую¹. Так как уровни квантования на приемном

¹ Кроме квантования по уровню, применяется квантование по времени и комбинированное квантование (см. Я. З. Цыпкин, Теория импульсных систем, 1958).

пульта известны, а помехи в линии связи значительно меньше разности двух соседних уровней, то на приемном конце линии легко восстановить точные ступеньки и таким образом устранить действие помех. После сглаживания ступенек мы снова получаем неискаженную форму сигнала. Для надежного устранения помех шаг квантования должен быть приблизительно в десять раз больше среднего уровня помех

$$\Delta S > 10\delta.$$

При заданном отношении сигнала к шуму пропускная способность линии (количество информации за единицу времени) определяется формулой

$$C = \frac{1}{T} = 2F_k \ln \left(1 + \frac{S_{\max}}{\Delta S} \right),$$

где

I — число двоичных единиц информации;

T — время передачи;

F_k — диапазон частот, пропускаемых линией;

S_{\max} — максимальный уровень (мощность) сигнала;

ΔS — шаг квантования.

Если задан уровень помех δ , то легко найти шаг квантования ΔS . Зная ΔS , мы можем выбрать C или S_{\max} . Чем больше помехи, тем при заданной помехоустойчивости $\frac{\Delta S}{\delta}$ меньше пропускная способность линии связи.

Для определения C Шенноном была найдена другая формула

$$C = F_k \ln \left(1 + \frac{P_c}{P_{\text{пом}}} \right),$$

где P_c — средняя мощность сигнала;

$P_{\text{пом}}$ — средняя мощность помехи.

Анализ этой формулы дает те же результаты.

Повышение помехоустойчивости всегда связано со снижением эффективности (чем больше помехоустойчивость, тем при заданной величине помех меньше быстродействие системы связи), поэтому необходимо выбирать некоторое среднее *компромиссное* решение. Отмеченное свойство является общим для всех способов повышения помехоустойчивости. Все же некоторые из них имеют небольшие преимущества перед другими, особенно в смысле простоты и надежности аппаратуры. Необходимо разрабатывать все

методы повышения помехоустойчивости для того, чтобы всесторонне решить вопрос о выборе метода. Некоторые практические рекомендации будут даны в конце главы.

МЕТОДЫ ПРИЕМА СЛАБЫХ СИГНАЛОВ ПРИ НАЛИЧИИ ПОМЕХ

Взаимное использование новейших достижений одной отрасли техники в другой всегда давало хорошие результаты.

Современная техника связи (особенно радиосвязи) значительно больше использует возможности, открываемые развитием кибернетики и, в частности, теории информации, чем автоматическое регулирование. Ниже мы попытаемся перенести некоторые методы теории связи, основанные на выводах теории информации, в автоматическое регулирование. Для этого рассмотрим методы повышения помехоустойчивости систем связи и систем автоматического экстремального регулирования.

Если при применении того или другого устройства или метода отношение $\frac{\text{сигнал}}{\text{помеха}}$ увеличивалось в десять раз, то говорят, что помехоустойчивость увеличилась в десять раз. Улучшение канала связи (т. е. увеличение времени использования T_k , частоты среза F_k канала связи и допустимого диапазона изменения мощности в канале связи H_k) является первым требованием для повышения помехоустойчивости. Однако при этом ухудшается эффективность связи (снижается быстроедействие) и увеличивается стоимость канала. Так, в простейшем виде может быть показано противоречие между *помехоустойчивостью* и *эффективностью связи*, о котором мы упоминали уже выше. Последняя находится в прямой зависимости с *пропускной способностью* связи.

При выборе канала связи (T_k , F_k и H_k) или сигнала (длительности T_c , верхней частоты сигнала F_c и диапазона изменения мощности H_c) приходится принимать некоторое *среднее компромиссное* решение для того, чтобы увеличение помехоустойчивости $\frac{V_k}{V_c}$ (где V_k — пропускная способность канала связи, V_c — объем сигнала) не слишком снизило эффективность $S = \frac{I}{T}$ канала связи. Изменение

метода модуляции сигнала или кода позволяет влиять на величину F_c , создавая возможность оптимального выбора способа модуляции. Однако каждая система модуляции и каждый код позволяют получить некоторую предельно достижимую (потенциальную, по терминологии А. В. Котельникова) помехоустойчивость, которая не может быть превзойдена (при $C = \text{const}$) путем усовершенствования элементов системы связи.

Теория информации (или общая теория связи) обобщает опыт развития связи с момента ее зарождения по настоящее время. Сравнительно недавно было установлено, что качество связи при наличии помех зависит от отношения¹

$$K = \frac{V_k}{V_c} = \frac{T_k F_k H_k}{T_c F_c H_c} \quad \text{при} \quad H_c = \ln \frac{P_c}{P_{\text{пом}}},$$

где T_k — время использования канала связи;

F_k — частота среза канала связи;

H_k — допустимый диапазон изменения мощности в канале связи;

T_c — длительность сигнала;

F_c — верхняя частота сигнала;

H_c — диапазон изменения мощности;

P_c — средняя мощность сигнала;

$P_{\text{пом}}$ — средняя мощность помехи.

Помехоустойчивость (определяемая величиной изменения отношения $\frac{\text{сигнал}}{\text{помеха}}$ на выходе системы при применении тех или иных средств) увеличивается с ростом избыточности

$$i = \left(1 - \frac{1}{V_k} \right)$$

по экспоненциальному закону. При достаточно больших $\frac{V_k}{V_c}$ помехоустойчивость пропорциональна избыточности.

Вот почему отношение $K = \frac{V_k}{V_c}$ является одним из основных обобщенных показателей помехоустойчивости системы связи. Чем больше K , тем выше помехоустойчивость, тем меньше отклоняется выходной сигнал от входного. Другим

¹ Здесь рассматриваются только случаи, когда помехи не могут быть отдельно измерены, а следовательно, и не могут применяться способы устранения действия помех при помощи компаундирования.

не менее важным показателем помехоустойчивости является изменение отношения $\frac{\text{сигнал}}{\text{помеха}}$ на выходе системы.

Для рассматриваемых ниже вопросов автоматического регулирования особый интерес представляет вывод современной теории информации о возможности приема слабых сигналов, мощность которых меньше мощности (уровня) помех, действующих на линии связи. Задача приема слабых сигналов еще усложняется наличием так называемого *порога мощности*. Когда величина $\frac{P_c}{P_{\text{пом}}}$ становится меньше определенного значения порога мощности, вероятность ошибки настолько возрастает, что сигнал практически не может быть принят, если не применены специальные методы приема. Снизить порог уверенного приема сигналов можно только путем разработки специальных методов связи.

В настоящее время в теории информации известен ряд способов осуществления возможности приема слабых сигналов, для которых отношение

$$\frac{P_c}{P_{\text{пом}}} < 1.$$

К таким специальным методам приема слабых сигналов относятся:

- а) метод фильтрации периодических сигналов;
- б) автокорреляционный метод;
- в) взаимокорреляционный метод;
- г) метод накопления (интегрирования);
- д) метод усложнения поискового сигнала (метод цифровой локации).

Ниже мы рассмотрим эти методы в применении к задаче повышения помехоустойчивости кибернетических систем экстремального регулирования, для которых, как указывалось ранее, задача правильного приема слабых сигналов является весьма актуальной.

Метод фильтрации периодического сигнала

Различие в спектре полезного сигнала и спектре помех дает возможность в некоторых случаях отфильтровать помехи. Наиболее просто метод фильтрации может быть показан в случае, когда сигнал является синусоидальным, а помеха имеет спектр типа «белого шума». Схема применения метода в системе связи показана на рис. 107.

Второстепенные воздействия (помехи), действующие на объект, часто являются стационарными: случайными функциями. Если их энергия сосредоточена в области определенных частот, то мы всегда можем выбрать частоту вынужденных колебаний системы значительно *ниже* этого участка частотного диапазона. Кроме того, могут быть применены фильтры.

В качестве примера применения метода фильтрации периодического сигнала в системе экстремального регулиро-

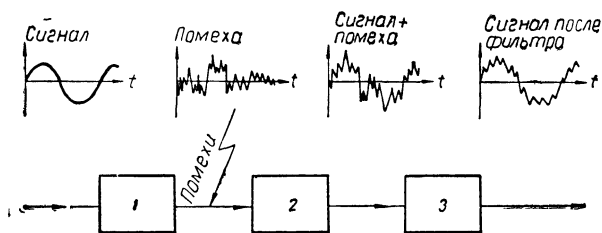


Рис. 107. Применение метода фильтрации периодического сигнала в системе связи:

1 — датчик, 2 — приемник, 3 — узкополосный фильтр.

вания рассмотрим систему, служащую для обнаружения самого яркого участка горизонта (рис. 108). Измерительная часть системы состоит из фильтра 1, фотоэлемента 2, модулирующего диска 3, направленного на исследуемый участок горизонта *AB*. Входным сигналом является напряжение фотоэлемента, которое, как показано на рис. 108, имеет полезную составляющую (близкую по форме к синусоиде) и составляющую типа «белого шума». Назначение фильтра 1 пропустить только полезную составляющую и задержать шум.

Как это делают при исследовании аналогичных задач в теории связи¹, обозначим полосу пропускания фильтра через Δf_0 , а мощность помехи в единице полосы пропускания через ρ . Тогда мощность на выходе фильтра

$$P_{\text{пом}} = \rho \Delta f_0.$$

¹ См. Р. А. Казарьян, В. И. Кувшинов и М. А. Назаров, *Элементы общей теории связи*, 1957.

Отношение сигнала к помехе после фильтра равно

$$\left(\frac{P_c}{P_{\text{пом}}}\right)_{\text{вых}} = \frac{P_c}{\rho \Delta f_0}.$$

Отсюда видно, что, применяя фильтры с очень узкой полосой, можно добиться почти полного устранения помехи.

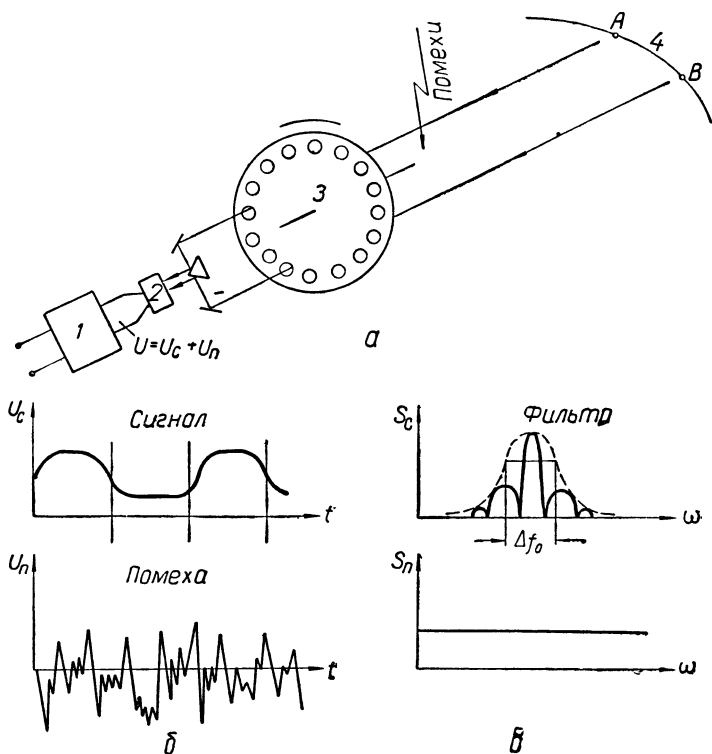


Рис. 108. Применение метода фильтрации периодического сигнала в экстремальном регуляторе:

а — схема; б — изменение сигнала и помехи во времени; в — спектр мощности сигнала S_c и помехи S_n .

Более детальный анализ показывает, что при чрезмерном уменьшении Δf_0 замедляется действие системы в динамических режимах, в процессах изменения и установления гармонического сигнала. Обычно полосу фильтра Δf_0 выбирают,

исходя из соотношения

$$\Delta f \cdot \Delta t \approx 1,$$

где Δt — время устойчивого переходного процесса установления гармонического сигнала, вызванного отклонением системы.

При таком соотношении система обычно имеет вполне достаточную степень устойчивости.

Тогда

$$\left(\frac{P_c}{P_{\text{пом}}/\text{вых}} \right) = \frac{P_c}{\rho} \cdot \Delta t.$$

Чем уже полоса фильтра, тем медленнее действует система и тем лучше устраняется действие помехи. Таким образом, в установках автоматики, также как и в устройствах связи, *повышение помехоустойчивости систем при помощи фильтрации полезного сигнала достигается снижением быстродействия системы в переходных режимах.*

Простыми средствами, использующими любой критерий устойчивости, можно показать на примерах, что введение фильтра снижает частоты собственных колебаний системы, и, следовательно, снижает быстродействие [21].

Если в системах связи узкополосный фильтр только замедляет действие разомкнутой системы, то в системах автоматического регулирования он оказывает значительно большее влияние. Фильтр входит в замкнутый контур обратной связи и, следовательно, сильнее влияет на устойчивость и длительность переходных процессов, чем в разомкнутой системе. Одновременно с этим повышается и его фильтрующее действие (повышается крутизна частотной характеристики). Таким образом, в разомкнутой и в замкнутой системах повышение помехоустойчивости достигается за счет *почти равного снижения быстродействия.*

Основной практический недостаток метода фильтрации состоит в том, что только в редких случаях частоты модулирующих колебаний экстремальных систем достаточно высоки, чтобы можно было построить недорогой узкополосный фильтр (из элементов LC или мостовой RC -фильтр с электронными лампами). Так, например, частоты модулирующих колебаний для установки экстремального регулирования парового котла составляют величину порядка $f = 0,001$ сек. Построить узкополосный фильтр на столь низкие частоты (даже при условии применения динамиче-

ских емкостей вместо обычных конденсаторов) весьма затруднительно.

После узкополосного фильтра, пропускающего только сигнал с частотой модуляции, мы вынуждены включить тот или иной фазовый дискриминатор для обнаружения фазы сигнала. Поэтому в системах экстремального управления метод прямой фильтрации сигнала может быть использован только как добавочный совместно с другими методами повышения помехоустойчивости.

Автокорреляционный метод

Пусть на вход радиоприемника поступает полезный сигнал $\Psi(t)$ и помеха $N(t)$.

$$f(t) = \Psi(t) + N(t).$$

Автокорреляционная функция входного сигнала

$$A_f(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} f(t) f(t - \tau) dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} [\Psi(t) + N(t)] [\Psi(t - \tau) + N(t - \tau)] dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \left[\int_{-T}^{+T} \Psi(t) \cdot \Psi(t - \tau) dt + \int_{-T}^{+T} N(t) \cdot N(t - \tau) dt + \int_{-T}^{+T} \Psi(t - \tau) \cdot N(t) dt + \int_{-T}^{+T} \Psi(t) \cdot N(t - \tau) dt \right].$$

Сигнал и помеха взаимно не связаны между собой, поэтому последние два слагаемые равны нулю. Отсюда

$$A_f^2(\tau) = A_\Psi(\tau) + A_N(\tau),$$

т. е. автокорреляционная функция общего суммарного сигнала равна сумме автокорреляционных функций полезного сигнала и помехи.

Напомним, что автокорреляционная функция является мерой «волнистости» сигнала. Чем выше частоты спектра, тем быстрее убывает автокорреляционная функция (см. главу I).

Автокорреляционная функция помехи $A_N(\tau)$ с увеличением сдвига τ убывает сравнительно быстро. При больших τ $A_N(\tau) \approx 0$. Таким образом, при переходе к автокорреляционным функциям появляется возможность устранения влияния помех.

Если полезный сигнал является гармонической функцией $\Psi(t) = A \sin \omega t$, то, как известно, автокорреляционная функция сигнала является также гармонической функцией

$$A_{\Psi}(\tau) = \frac{A^2}{2} \cos \omega \tau.$$

Различие в величине автокорреляционных функций при различных сдвигах τ используется в автокорреляцион-

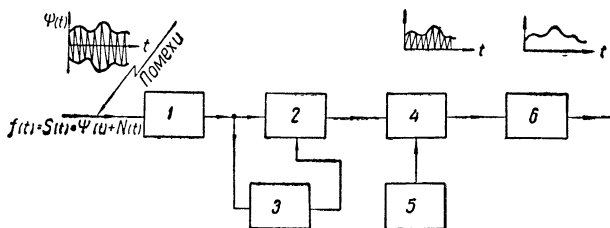


Рис. 109. Схема автокорреляционного приемника для амплитудно-модулированных колебаний.

ных приемниках для приема слабых сигналов при наличии помех.

Наиболее прост автокорреляционный приемник амплитудно-модулированных сигналов, так как в нем нет необходимости восстанавливать по полученной автокорреляционной функции $A_f(\tau)$ полезный сигнал $\Psi(t)$. Практически равноценно, получим ли мы напряжение $A \sin \omega t$ или $\frac{A^2}{2} \cos \omega \tau$ при $\tau = \text{const}$. Важно, что на выходе почти не будет составляющей, зависящей от помехи.

Схема автокорреляционного приемника показана на рис. 109. Он состоит из следующих элементов: 1 — усилитель, 2 — переключающее устройство (умножитель), 3 — линия задержки на время τ , 4 — интегратор (накопитель), 5 — элемент периодической разрядки интегратора, 6 — сглаживающий элемент (фильтр).

Действие приемника состоит в следующем. Суммарный сигнал $f(t) = \Psi(t) + N(t)$ в виде амплитудно-модулированных колебаний несущей частоты поступает на умножитель и на линию задержки. На выходе умножителя получаем произведение напряжений

$$f(t) \cdot f(t - \tau).$$

Это напряжение интегрируется по времени в накопителе

$$\int_0^T f(t) f(t - \tau) dt.$$

Так как интегратор имеет ограниченный диапазон действия, то его приходится периодически (через время T) разряжать. Таким образом, на выходе интегратора приблизительно получаем напряжение, пропорциональное $A_f(T)$ на данном участке времени T , т. е. напряжение, составляющая помехи в котором весьма мала. Сглаживание в элементе 6

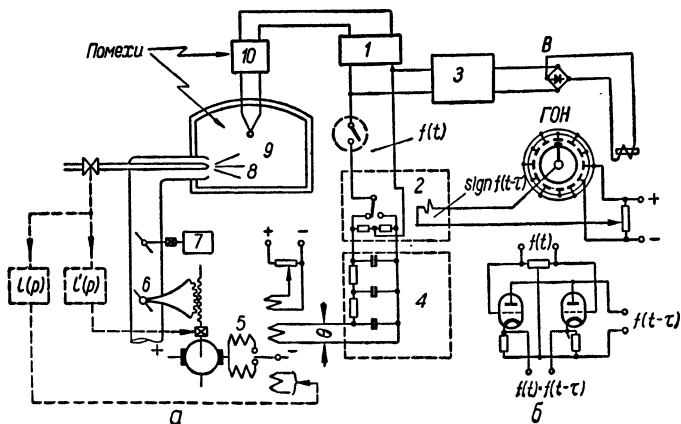


Рис. 110. Схема экстремального регулятора температуры, использующая автокорреляционный принцип устранения действия помех: а—схема с релейным умножителем; б—пропорциональный умножитель; 1—усилитель, 2—релейный умножитель, 3—линия задержки; В—выпрямитель, ГОН—генератор опорного напряжения, 4—сглаживающий фильтр, 5—сервомотор, 6—исполнительный орган, 7—модулятор подачи воздуха, 8—форсунка, 9—термопара, 10—усилитель.

имеет целью устранить помехи, вносимые периодически разрядами интегратора.

Перейдем теперь к примеру схемы экстремального регулятора, использующего для устранения влияния помех автокорреляционный принцип (рис. 110).

Автокорреляционный приемник сигналов модуляции по своему принципу должен использовать только воздействия, взятые после объекта. В этом его основное отличие от взаимокорреляционного приемника. В связи с этим автокорреляционный приемник должен содержать в своей схеме собственный генератор опорного напряжения, захватывае-

мый и синхронизируемый входящими сигналами. Опорное напряжение необходимо для того, чтобы оценить изменение фазы сигнала, происходящее при переходе системы через экстремум. Цепь, состоящая из линии задержки Z , выпрямителя B и генератора опорного напряжения $ГОН$, показана на рис. 110 в качестве простого примера требуемой в данном случае схемы. Основные элементы схемы регулятора могут в точности повторять схему автокорреляционного приемника, если на его выходе включить еще фазочувствительное реле, управляющее сервомотором. Однако можно внести в схему некоторые упрощения практического порядка.

Оказывается, что переключающее устройство и фазочувствительное реле можно совместить в одном элементе — умножителе 2, если вместо обычной пропорциональной автокорреляционной функции

$$A_f(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} f(t) \cdot f(t - \tau) dt$$

использовать так называемую *релейную автокорреляционную функцию*¹

$$A'_f(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} f(t) [A \operatorname{sign} f(t - \tau)] dt,$$

учитывающую только знак множителя $f(t - \tau)$, а не его величину.

При релейном управлении сервомотором безразлично, пользуемся ли мы обычной или релейной автокорреляционной функцией, но аппаратура приема сигнала в последнем случае значительно упрощается. В этом можно убедиться, сравнив две конкретные схемы приемников.

Второе упрощение состоит в следующем. Так как в рассматриваемой системе $f(t)$ есть входная функция, изменяющаяся по гармоническому закону с частотой ω , то при большом времени интегрирования и усреднения $T \gg \frac{2\pi}{\omega}$ вычисление автокорреляционной функции

$$A_f(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} f(t) f(t - \tau) dt$$

¹ Следует обратить внимание математиков на необходимость разработки теории релейных корреляционных функций, вводимых здесь впервые.

может быть произведено по более простой приближенной формуле

$$A_i'(\tau) \approx \frac{1}{T} \int_{-T}^0 f(t) f(t - \tau) d\tau$$

или при релейной функции

$$A_i'(\tau) \approx \frac{1}{T} \int_{-T}^0 f(t) [A \operatorname{sign} f(t - \tau)] d\tau.$$

Кроме того, следует учесть, что в отличие от радиоприемника в схеме экстремального регулятора нет модулятора поискового сигнала по амплитуде.

Можно исключить из схемы разрядное устройство, заменив его элементом сглаживания. Схема коррелятора без разрядного устройства показана на рис. 110.

Релейный умножитель 2 представляет собой синхронный выпрямитель (детектор), фазу действия которого можно установить произвольно путем выбора времени линии задержки 3.

Назначение и работа экстремальной системы с модулирующим воздействием рассмотрены нами ранее.

Взаимокорреляционный метод

Схема взаимокорреляционного приемника для амплитудно-модулированных сигналов показана на рис. 111. Отличие схемы рис. 111 от схемы рис. 109 состоит только в том, что здесь вместо линии задержки используется местный генератор колебаний 3, синхронизируемый (по отдельной линии связи) с передатчиком. Всегда, если имеется возможность получения постоянной или периодической информации о частоте и фазе несущих колебаний, следует применять взаимокорреляционный метод приема, так как при нем можно получить лучшие результаты в отношении помехоустойчивости, чем при автокорреляционном методе. Теоретическое исследование [9] показывает, что взаимокорреляционный приемник может дать больший выигрыш в отношении $\frac{\text{сигнал}}{\text{помеха}}$, чем автокорреляционный.

Перейдем теперь к вопросам автоматического регулирования.

При наличии помех, действующих на объект регулирования, работа экстремальных регуляторов шагового типа с модулирующим воздействием затруднена. Помехи, по которым нет компаундирующих связей, могут привести к неправильным включениям. Некоторое уменьшение влияния помех может быть достигнуто за счет увеличения амплитуды A изменения регулирующего воздействия, однако при этом часто нарушается экономичность работы объекта и

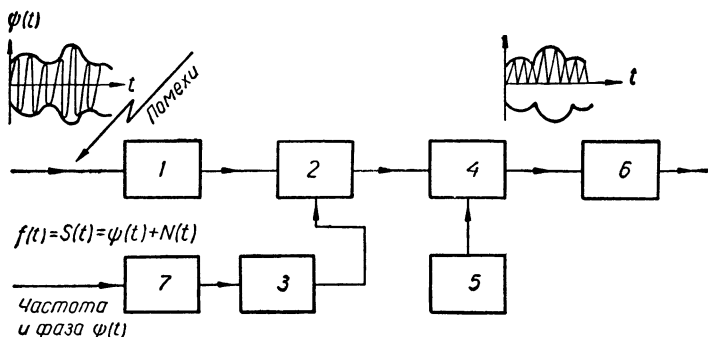


Рис. 111. Схема взаимокорреляционного приемника для амплитудно-модулированных колебаний.

соответственно возрастает «потеря на рыскание» Δ_3 . Следует стремиться к уменьшению амплитуды изменения регулирующего воздействия.

Усовершенствованные методы устранения влияния помех основаны на вычислении корреляционных функций с помощью специальных вычислительных устройств — корреляторов.

Допустим, что генератор модулирующего воздействия подает на вход объекта регулирования гармоническое возмущение

$$\Psi(t) = \Psi \sin \omega t,$$

тогда на выходе объекта регулирования (при работе на склоне экстремальной характеристики и при отсутствии инерции) получим

$$f(t) = k\Psi(t) + N(t),$$

где $N(t)$ — составляющая, обусловленная влиянием помех.

Взаимокорреляционная функция вычисляется по следующей формуле:

$$K_{f\Psi}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} K f(t) \Psi(t - \tau) dt,$$

где τ — переменное запаздывание.

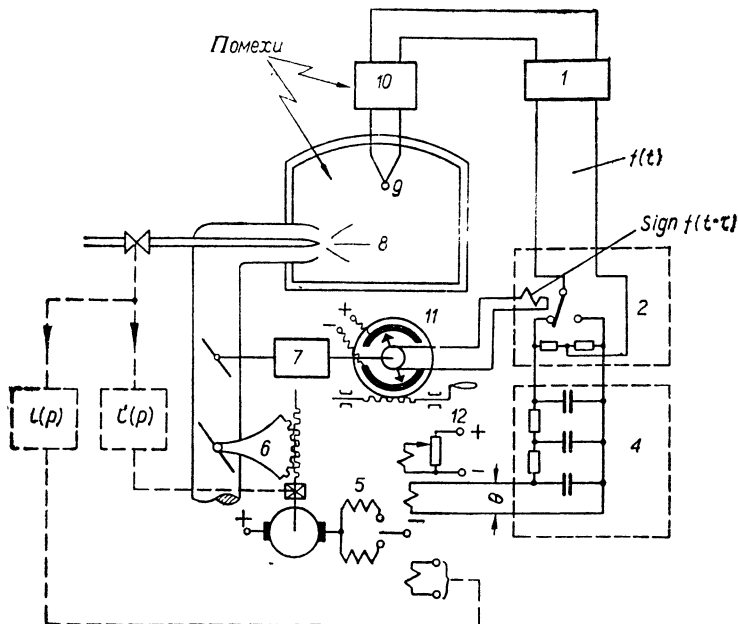


Рис. 112. Схема экстремального регулятора температуры, использующая взаимокорреляционный принцип устранения действия помех (она же может быть схемой синхронного детектирования полезного сигнала) (условные обозначения те же, что и на рис. 110).

Эта взаимокорреляционная функция интересует нас, потому что она является некоторой мерой выходной величины $f(t)$ по отношению к $\Psi(t)$ и может быть использована в устройствах экстремальных систем. В режиме, отвечающем точке экстремума O_2 , взаимокорреляционная функция (обычная или релейная) равна нулю.

Пример схемы экстремального регулятора температуры по типу с модулирующим воздействием, использующей взаимокорреляционный принцип устранения действия

помех, дан на рис. 112. Дополнительным элементом здесь (по сравнению со схемой рис. 110) является синхронный переключатель 11, подающий дополнительную информацию о частоте и фазе модулирующих колебаний.

В схеме используется релейная взаимокорреляционная функция

$$K'_{f\Psi}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^{+T} A(t) \cdot [A \operatorname{sign} \Psi(t - \tau)] dt \approx \frac{1}{T} \int_{-T}^0 f(t) \times \\ \times [A \cdot \operatorname{sign} \Psi(t - \tau)] dt,$$

что дает значительное упрощение применяемой аппаратуры.

Величина и знак фазового сдвига $\omega\tau$ устанавливаются при помощи рукоятки 12. При $\tau = 0$ взаимокорреляционный регулятор работает по схеме *синхронного детектирования полезного гармонического сигнала*. Заметим, что и автокорреляционный регулятор (рис. 110) также может работать по схеме синхронного детектирования, если сдвиг фазы в линии задержки точно равен $(2\pi - \theta)$, где θ — сдвиг фазы колебаний в самом объекте (печи). Величина времени задержки $\tau = \tau_{\text{синхр}}$, отвечающая режиму синхронного детектирования, является оптимальной с точки зрения уменьшения действия помех. При изменении времени задержки (в обе стороны) помехоустойчивость падает и достигает минимума при

$$\tau = \pm \frac{\pi}{2\omega}.$$

При анализе корреляционных систем [9], [68] устанавливается, что в них, так же как и при методе прямой фильтрации полезного сигнала, повышение помехоустойчивости достигается за счет замедления действия системы. Введение сглаживающих фильтров приводит к ухудшению устойчивости и снижению частоты собственных колебаний (быстродействия) системы. Чем больше постоянные времени сглаживающего фильтра, тем выше отношение $\frac{\text{сигнал}}{\text{помеха}}$, но тем дольше длятся переходные процессы в системе.

Все же из всех трех рассмотренных выше методов приема слабых сигналов взаимокорреляционный метод имеет некоторые преимущества в смысле помехоустойчивости. О выборе параметров сглаживающего фильтра в системе с взаимокорреляционным методом приема можно сказать сле-

дующее: с точки зрения устойчивости и быстродействия системы регулирования постоянные времени фильтра нужно выбирать *возможно меньшими*. Однако уменьшать их можно лишь до тех пор, пока реле не чувствует изменений модулирующего воздействия. При работе системы в точке экстремума реле не должно включать сервомотор. Ориентировочно $\tau = RC = 5T$, где T — период модуляции.

Зависимость действия гармонической помехи на систему с коррелятором от места входа помехи, ее частоты и фазы

Действие гармонической помехи на систему с коррелятором зависит от ее амплитуды, частоты, фазы и места входа в систему. Так, например, легко заметить, что синхронный детектор (мы ограничимся рассмотрением работы коррелятора только в режиме синхронного детектирования) не устраняет влияния низкочастотных помех (например, постоянного смещения), поступающих в систему *до нелинейного элемента объекта регулирования* (имеющего экстремальную характеристику). Составляющие с частотой значительно выше частоты модуляции на систему не действуют, т. е. ошибки не вызывают.

Действие корреляторов (в режиме детекторов) иллюстрируется осциллограммами рис. 113. Как видно из рис. 113,а, изменение фазы сигнала $\Psi(t)$ на 180° при $N(t) = 0$ вызывает изменение полярности напряжения на выходе коррелятора.

Следовательно, можно сделать вывод (который мы уже использовали выше), что коррелятор может быть непосредственно применен в схеме экстремального регулятора с модулирующим воздействием в качестве *фазового дискриминатора*, чем достигается упрощение системы.

Рассматривая действие гармонических составляющих помехи $N(t)$ (рис. 113,б и в), можно прийти к следующим выводам.

Действие помех, поступающих в систему *после нелинейного элемента объекта регулирования, но до входа коррелятора*, устраняется почти полностью независимо от амплитуд, частоты и фазы помехи. Только редкие составляющие помехи, а именно: а) имеющие частоту, равную частоте модуляции; б) при фазе, сдвинутой на 180° от модулирующего сигнала; в) при амплитуде, превосходящей

амплитуду колебаний, вызванных модулирующим сигналом, могут вызвать уход системы от экстремума, т. е. ошибку системы. Вероятность наличия таких составляющих помехи обычно настолько мала, что можно просто

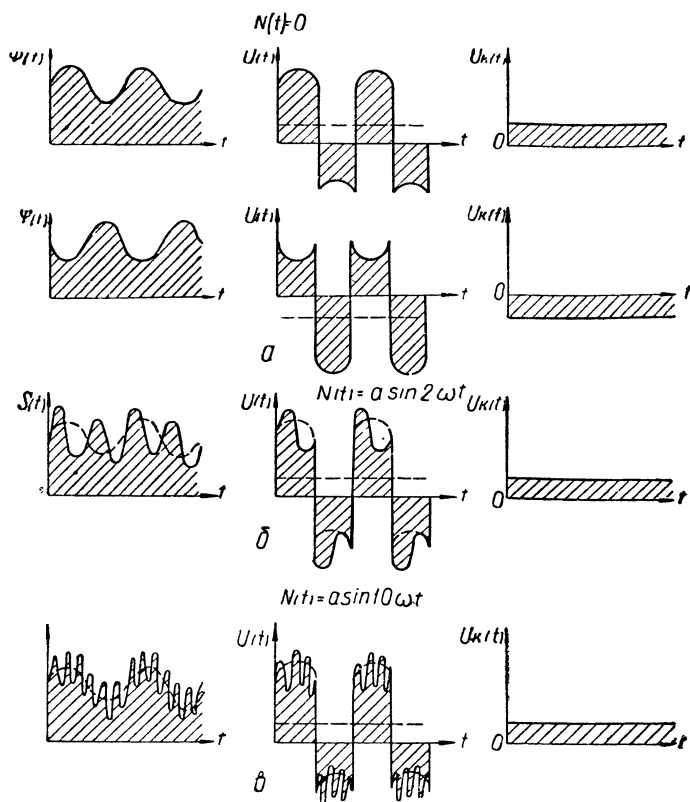


Рис. 113. Действие синхронного детектора с интегратором по способу «чересполосицы»:

a — помеха отсутствует, $N(t) = 0$; b — помеха имеет удвоенную частоту, $N(t) = a \sin 2\omega t$; δ — помеха имеет десятикратную частоту, $N(t) = a \sin 10\omega t$.

сказать, что синхронный детектор полностью устраняет действие помех, поступающих в систему после нелинейного элемента объекта регулирования до входа детектора.

Частота модуляции (частота вращения коррелятора) должна быть выбрана равной частоте, при которой спек-

тральная плотность помехи минимальна или просто достаточно мала. Здесь имеются в виду помехи, поступающие в систему после нелинейного элемента объекта, но до входа коррелятора.

Методы накопления (интегрирования)

Методы накопления состоят в многократном измерении сигнала или его интеграла с целью повышения помехоустойчивости системы [9].

В измерительной технике для увеличения точности отсчета измеренных величин измерение повторяют несколько раз. Чем больше измерений, тем меньше влияние различных случайных помех. Ошибка уменьшается пропорционально квадрату числа измерений.

Большую помехоустойчивость обеспечивают методы накопления информации с устройствами интегрирования.

На рис. 114 показана схема установки, применявшейся при радиолокации положений Луны на небосклоне. Передатчик 1 генерирует высокочастотные колебания, которые через антенну 2, вращающуюся равномерно, синхронно и синфазно с коммутатором 4, излучаются в пространство. Напряжение с выхода приемника поочередно поступает в накопители (интеграторы) 5, в качестве которых использовались водородные вольтметры (кулонметры), измеряющие количество электричества

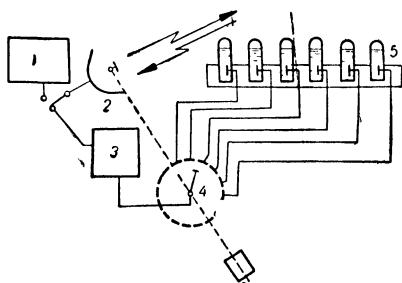


Рис. 114. Схема установки, применявшаяся для радиолокации положения Луны на небосклоне.

$$q = \int_0^T idt$$

по количеству водорода, выделяемого при электролизе.

Регистрация месторасположения Луны производится по отклонению уровня водорода в одном вольтметре по сравнению с другими.

В результате многократного повторения радиолокации вольтметры, работающие при отражении луча от тех мест небосклона, где нет Луны, накапливают меньше водорода, чем вольтметр, отвечающий направлению на Луну. Это объясняется тем, что помеха знакопеременна и случайна, в то время как сигнал, отраженный от Луны, имеет одну и ту же полярность.

Количество водорода, возникающее благодаря действию помех, пропорционально числу повторений локации, а количество водорода, возникающее благодаря отражению от Луны, растет пропорционально квадрату числа повторений¹.

Число повторений n сигнала, необходимое для уверенного приема слабого сигнала с вероятностью p , определяется по формуле, приведенной в работе [9],

$$n = \frac{P_{\text{пом}}}{P_c} \cdot \frac{1}{1-p};$$

при $p = 0,9$ и $\frac{P_{\text{пом}}}{P_c} = 10$ $n \approx 100$ раз.

Характеризуя в общих чертах метод накопления, можно сказать, что при этом методе, как и при других методах выделения сигнала, повышение помехоустойчивости достигается удлинением времени действия сигнала (снижения быстродействия системы).

С помощью метода накопления можно обнаруживать весьма слабые сигналы, если время наблюдения не ограничено.

Примером использования метода накопления в технике экстремального регулирования может служить экстремальный регулятор шагового типа с простым однократным интегрированием и с интегрированием по способу «чересполосицы» (см. рис. 91).

Напомним, что уменьшения влияния высокочастотных помех в шаговой системе можно достичь не только интегрированием, но и путем выбора способа измерения показателя экстремума.

Запоминающие устройства шаговых систем в зависимости от их конструкции (наличие вентиля на входе) могут реагировать на максимальное или на последнее по времени значение показателя экстремума. При наличии случайных помех последний способ дает более точную работу.

¹ Подробнее см. Р. А. Казарьян, В. И. Кувшинов и М. А. Назаров, Элементы общей теории связи, 1957.

Однократное интегрирование. В системе с интегратором на запоминающие устройства подается напряжение, равное интегралу от показателя экстремума за некоторый отрезок времени Δt ,

$$U = \int_0^{\Delta t} \varphi dt.$$

Регулятор сравнивает между собой значения двух интегралов за два равные отрезка времени $\Delta t = \Delta t_1$ и $\Delta t = \Delta t_2$, один из них берут до шага изменения регулирующего воздействия, а другой — после него. Если второй интеграл больше, то это значит, что среднее значение показателя экстремума после шага возросло. Когда мы ищем максимум, то в этом случае следующий шаг нужно сделать в том же направлении.

Интегрирование по способу «чересполосицы» означает, что участки интегрирования для первого и второго запоминающего устройства чередуются несколько раз, прежде чем сравниваются их суммы. Например, цикл управления шаговой системы можно выбрать так, что она делает то шаг вперед, то шаг назад несколько раз подряд. После каждого шага вперед интегрируется показатель экстремума за определенное время со знаком плюс, а после каждого шага назад — со знаком минус. Таким способом в конце всего цикла интегрирований мы получаем разность, знак которой показывает, в какую сторону должна идти система, чтобы достичь экстремума.

Интегрирование по способу «чересполосицы» лучше устраняет действие помех, чем способ однократного интегрирования. Однако преимущество «чересполосицы» сказывается лишь при сравнительно низких частотах помех. Покажем это.

Пусть, например, на объект регулирования действует ряд синусоидальных помех $N = N \sin(\omega t + \beta)$. При способе однократного интегрирования на выходе интегратора мы получаем

$$S_1 = \int_0^{0,5T} N \sin(\omega t + \beta) dt,$$

где T — полное время выбора направления движения системы. При интегрировании по способу «чересполосицы»

(для примера принимаем пять полос) получим

$$S_2 = \int_0^{0,1T} N \sin(\omega t + \beta) dt + \int_{0,2T}^{0,3T} N \sin(\omega t + \beta) dt + \\ + \int_{0,4T}^{0,5T} N \sin(\omega t + \beta) dt + \int_{0,6T}^{0,7T} N \sin(\omega t + \beta) dt + \\ + \int_{0,8T}^{0,9T} N \sin(\omega t + \beta) dt.$$

Построением графиков (аналогичных графикам, изображенным на рис. 113) легко установить, что высокочастотные составляющие помехи¹, для которых $\frac{2\pi}{\omega} \ll T$, почти одинаково влияют как на S_1 , так и на S_2 независимо от значений β ; то же относится и к низкочастотным помехам при больших углах β . В отличие от этого низкочастотные составляющие (например, с периодом $\frac{2\pi}{\omega} = T$) значительно увеличивают S_1 и почти не влияют на S_2 при малых β . Таким образом, при наличии низкочастотных составляющих помехи с малыми углами β обнаруживается превосходство способа «чересполосицы» в сравнении с однократным интегрированием.

Частота «чересполосицы» (число переключений интегратора за секунду) должна быть выбрана равной частоте, при которой спектральная плотность помехи минимальна или просто достаточно мала.

Способ «чересполосицы» имеет еще одно преимущество практического порядка: диапазон (шкала) интеграторов используется значительно лучше, так как максимальное значение интеграла при способе «чересполосицы» в несколько раз меньше, чем при однократном интегрировании.

Сравнивая эти выводы с предыдущими, можно легко установить эквивалентность действия коррелятора и интегрирования по способу «чересполосицы». Оба эти приема увеличения помехоустойчивости систем экстремального регулирования обладают одинаковыми свойствами и действуют в равной степени.

Шаговая система с «чересполосицей» и система с моду-

¹ Рассматриваются помехи, поступающие в систему после нелинейной части объекта регулирования и до интегратора.

лирующим воздействием с коррелятором в одинаковой степени помехоустойчивы.

Оба способа устраняют влияние всех составляющих помехи, кроме составляющих определенных частот при определенной их фазе сдвига. Мы практически всегда имеем возможность произвольно выбирать эти опасные частоты так, чтобы их не было в реальном объекте. Поэтому оба способа можно рекомендовать для широкого использования на практике.

Известны способы повышения помехоустойчивости радиосвязи и телеуправления при помощи синхронных детекторов сигналов. В рассмотренных выше экстремальных системах используются эти способы.

Метод усложнения поискового (модулирующего) сигнала

В технике связи для увеличения отношения $\frac{\text{сигнал}}{\text{помеха}}$ применяется так называемый метод усложнения поискового сигнала. Этот метод имеет то преимущество, что он в меньшей мере связан с замедлением действия системы.

Метод усложнения поискового сигнала состоит в увеличении объема информации, содержащейся в полезном сигнале. Какой-нибудь «особенный» сигнал легче отличить от помех, чем «простой» сигнал.

Метод используется, например, в цифровой радиолокации, где импульс, которым передатчик облучает окружающие предметы, имеет сложную форму цифры двоичного кода.

В системах экстремального регулирования усложнение пробного сигнала также позволяет поднять отношение $\frac{\text{сигнал}}{\text{помеха}}$ (приблизительно в 2—3 раза).

Пример осуществления метода усложнения модулирующего сигнала в системе экстремального регулирования показан на рис. 115. Модулирующий сигнал может быть принят в виде формы, показанной на рис. 115. Тогда справа от экстремума после прохождения через объект и детектор он дает сигнал, отвечающий букве *К* по азбуке Морзе (тире — точка — тире), а слева — букве *И* (две точки). Далее следует применить селектор, отличающий букву *К* от буквы *И*, и подать от него управляющий сигнал на сервомотор. Возможна разработка и других принципов усложнения сигнала,

В данной системе мы перешли уже от рассмотрения непрерывного гармонического модулирующего сигнала к импульсной модуляции. Это открывает добавочные возможности повышения помехоустойчивости. Так, например, в работах В. И. Чайковского [68] предложено для импульсных систем синхронно выключать подачу основного сигнала $f(t)$ на умножитель в течение времени τ , пока сигнал проходит линию задержки (в автокорреляционной систе-

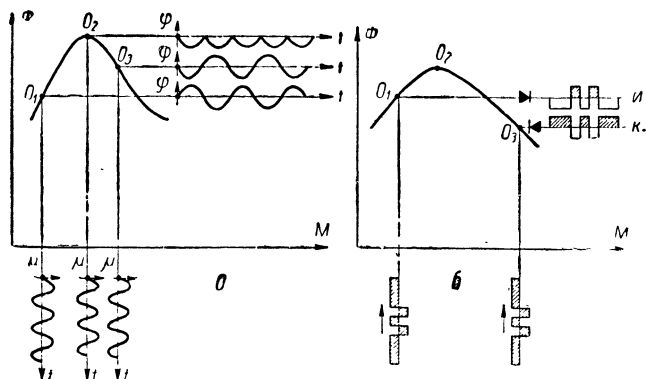


Рис. 115. Пояснение метода усложнения модулирующего сигнала в системе экстремального регулирования:

а — система с гармонической модуляцией; *б* — система с более сложным модулирующим сигналом.

ме). Это дает дополнительный выигрыш в увеличении отношения $\frac{\text{сигнал}}{\text{помеха}}$ порядка 30%. Место включения синхронного выключателя показано на рис. 110 пунктирным кружком.

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ

В настоящее время мы еще не располагаем опытом длительной эксплуатации различных систем экстремального регулирования в промышленных установках. Первый в СССР промышленный экстремальный регулятор — регулятор отношения $\frac{\text{пар}}{\text{топливо}}$ на максимум (разработанный в Институте электротехники АН УССР совместно с Киевэнерго) проработал только несколько сотен часов. Тем не менее мы можем использовать опыт, имеющийся в технике связи. Теперь открывается большая возможность для при-

менения выводов теории связи в автоматическом регулировании. По-видимому, в автоматике мы получим то же повышение помехоустойчивости. Если усреднить небольшие отклонения, имеющиеся в работах по технике связи, то при равной длительности сигнала (т. е. при равном быстродействии систем) повышение отношения $\frac{\text{сигнал}}{\text{помеха}}$ в различных системах характеризуется такими цифрами:

метод автокорреляционный	0,8—0,9
» взаимокорреляционный	1,0
« накопления (интегрирования)	1,0
» фильтрации сигнала и взаимокорреляционный	1,1—1,2
» усложнения сигнала	более 1,5

За единицу здесь принято повышение отношения $\frac{\text{сигнал}}{\text{помеха}}$, достигаемое по взаимокорреляционному методу.

Системы связи являются системами разомкнутого типа, а системы автоматического регулирования в большинстве случаев замкнуты. Однако это обстоятельство несколько не мешает переносить все способы повышения помехоустойчивости систем связи в автоматике, так как задача сводится к устранению помех на конкретном участке системы (от объекта до логического элемента). Мы рассматриваем замкнутый контур системы автоматического регулирования (систему с обратной связью), подверженную совместному воздействию полезного сигнала и помехи и стремимся к всемерному уменьшению действия помехи на конкретном разомкнутом участке контура.

Более полным эквивалентом замкнутых систем автоматического регулирования может быть информационный канал, охваченный обратной связью. Теория помехоустойчивости подобного рода каналов в настоящее время только разрабатывается. Однако важно отметить, что *уже сейчас ясно, что наличие отрицательной обратной связи в канале связи любого типа не может ухудшить помехоустойчивость*. При этом преимущества того или иного метода разделения сигнала и помехи сохраняются. Указанные выше цифры помехоустойчивости при учете действия обратной связи должны быть несколько увеличены, но порядок методов, расположенных по силе их действия, останется одним и тем же.

ВЫБОР СИСТЕМЫ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ШИРОКОГО ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Сравнивая выводы исследования помехоустойчивости взаимокорреляционной системы и системы по методу накопления (интегрирование по способу «чересполосицы»), мы установили эквивалентность этих методов в смысле повышения помехоустойчивости. С практической стороны взаимокорреляционный метод проще. Поэтому наиболее перспективными являются взаимокорреляционный метод и метод усложнения сигнала.

На рис. 89 была представлена схема экстремального регулирования температуры топки с модулирующим воздействием, использующая взаимный коррелятор, сервомотор постоянной скорости и устройство форсировки. Так как системы по методу усложнения сигнала еще никем не разрабатывались, то эта принципиальная схема, по-видимому, является наиболее пригодной для многих практических задач экстремального регулирования.

Следует отметить, что почти вся аппаратура, необходимая для осуществления взаимокорреляционного экстремального регулирования с модулирующим воздействием (при сервомоторе постоянной скорости с устройством форсировки, называемым также изодромом), серийно выпускается нашей промышленностью.

Включив выход сглаживающего фильтра на вход электронного регулятора, где имеется устройство форсировки [16], мы получим универсальный экстремальный регулятор, который, по-видимому, уже сейчас можно внедрять в промышленность в широких масштабах.

Отдельные схемы для разных задач будут отличаться одна от другой только типом измерительных и вычислительных элементов, вырабатывающих напряжение постоянного тока, пропорциональное показателю качества φ .

Наконец, заметим, что в случае объектов с переменными свойствами может потребоваться введение прерывистого регулирования во взаимокорреляционной системе. В этом случае устройство форсировки не нужно. Передаточные числа регуляторов, связывающих сервомотор и модулятор с исполнительными элементами, могут быть значительно уменьшены (редукторы упрощаются).

Не исключается, конечно, возможность применения в отдельных случаях и регуляторов других, известных, ти-

пов, но наибольшую область применения, безусловно, найдет система с сервомотором постоянной скорости и устройством форсировки (изодромом).

Расчет устройства форсировки можно найти в работе [16].

УМЕНЬШЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОМЕХ ПРИ ПОМОЩИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ СХЕМ И МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТА РЕГУЛИРОВАНИЯ

Выше были рассмотрены как способы уменьшения влияния помех путем улучшения действия компаундирующих связей (условия инвариантности), так и путем улучшения действия контура обратной связи (введение второй производной, нелинейные обострители, выбор периода включения сервомотора и амплитуды регулирующего воздействия, выбор способа замера, интегрирования, показателя экстремума, применение корреляторов и др.).

Способ уменьшения влияния помех при помощи применения дифференциальных схем занимает по своим свойствам некоторое среднее положение. Этот способ, как и применение обратных связей, устраняет влияние всех внешних помех, а не только основных возмущающих воздействий; с другой стороны, дифференциальные схемы устраняют ошибку только при малых отклонениях вблизи нуля характеристики. Рассмотрим сначала хорошо изученные схемы электронных усилителей (рис. 116).

На рис. 116,*а* показана схема обычного усилителя и его характеристика. Как видно из рисунка, помехи (например, изменение напряжения сети U_c) действуют на выходное напряжение.

Применение дифференциальной схемы (рис. 116,*б*) дает возможность устранить влияние всех внешних помех (кроме изменения характеристик оборудования) в области малых отклонений (вблизи нуля). Наконец, применение управления по основному возмущению и его производным (рис. 116,*в*) дает возможность полностью устранить влияние изменения анодного напряжения. Таким образом, мы убеждаемся, что способ уменьшения влияния помех при помощи дифференциальных схем действительно занимает некоторое среднее положение между указанными выше способами (улучшение компаундирующих связей и замкнутого контура).

Пример дифференциальной системы регулирования дан на рис. 117. В этой системе вместо компаундирующей связи по основным возмущениям применена еще одна система экстремального регулирования. Необходимо, чтобы обе системы были по возможности одинаковыми, находились

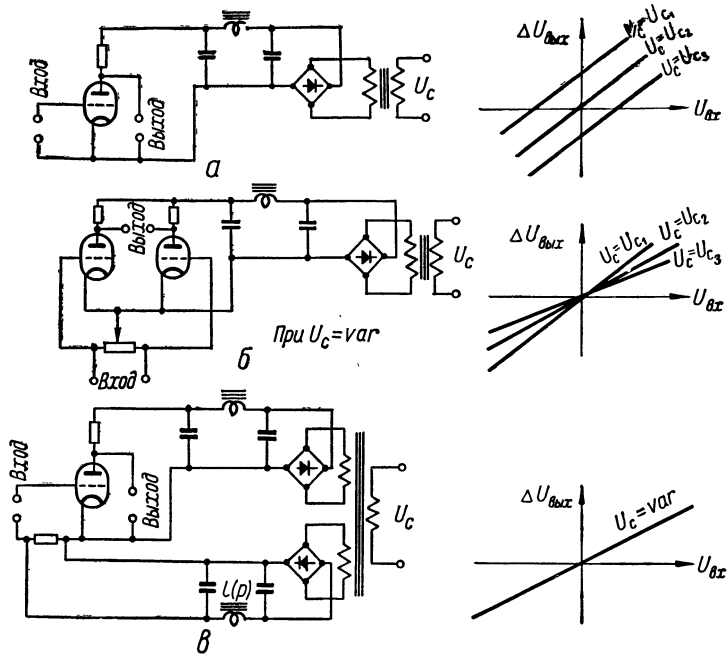


Рис. 116. Схемы электронных усилителей-аналогов экстремальных систем и их характеристики при изменении напряжения питающей цепи $V_c = \text{var}$:

a — аналог простой одинарной системы; *б* — аналог дифференциальной системы; *в* — аналог комбинированной системы с регулированием по производным от возмущений.

почти в одинаковых режимах и подвергались одинаковым внешним воздействиям.

Цикл команд дифференциального регулятора выбирается так, что в одном объекте регулирующее воздействие (в данном примере подача воздуха) увеличивается, а в другом объекте одновременно на эту величину уменьшается. Сравнивая значения показателя экстремума (температуры) двух объектов по их разности, легко установить, следует

увеличивать или уменьшать постоянную составляющую регулирующего воздействия, чтобы достичь экстремума.

Как уже указывалось, действие небольших помех в такой дифференциальной системе взаимно исключается.

Пользуясь хорошо разработанной теорией переходных процессов в дифференциальных усилителях, можно показать, что не только статическая ошибка Δ_1 , но и динамическая Δ_2 также уменьшается почти до нуля по сравнению

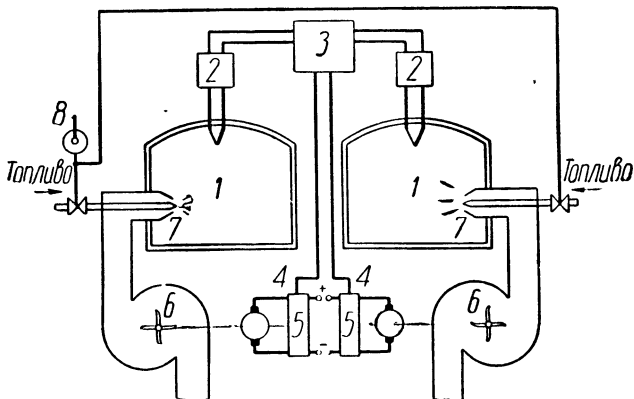


Рис. 117. Экстремальный регулятор температуры топки по дифференциальной схеме (одну из двух частей схемы можно заменить точной моделью):

1 — топки, 2, 3 — усилители, 4 — уставки регуляторов, 5 — регуляторы скорости, 6 — вентиляторы, 7 — форсунки, 8 — общий задатчик режима.

с одинарной системой, что приводит к существенному повышению быстродействия. Время перехода от одного экстремума к другому резко уменьшается.

Одну из систем, входящих в общую дифференциальную схему, можно заменить моделью или вычислительным устройством. Однако ясно, что такая модель должна достаточно точно отражать собой все свойства реального объекта регулирования.

ВОПРОСЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрение схем кибернетических или приспособляющихся систем автоматического управления мы начали с элементов логического действия (ЭЛД). Разработка этих элементов еще только начата, но уже сейчас ясно, что уп-

равляющие машины с ЭЛД для автоматизации производственных процессов будут совсем не похожи на существующие большие вычислительные машины, применяемые в математике.

Аппаратура управляющих машин должна работать во много раз надежнее, чем вычислительных. Но главное различие заключается в возникающих проблемах. Специалист по вычислительным машинам не занимается вопросами помехоустойчивости и приспособления, автоколебаний и жесткости, вопросами инвариантности, комбинированных систем и т. п. Поэтому вычислительные и управляющие машины следует отнести к родственным, но совершенно отличным друг от друга областям техники. Вычислительная техника — это еще не автоматика.

Разработка управляющих машин автоматики прежде всего связана с разработкой ЭЛД. Необходима дальнейшая разработка различных ЭЛД как релейного, так и пропорционального действия с различными размерностями входных и выходных величин. Еще не начата разработка измерительных элементов, непосредственно дающих отношение $\frac{p\varphi}{p\mu}$.

Установленная выше аналогия принципиальных схем систем с самоизменением уставки, программы, параметров, закона следования и нелинейностей, алгоритмов действия и преобразования, вероятностных зависимостей, области действия, импульсных воздействий и структуры (в случае, когда качество приспособления может быть оценено одним показателем) еще не означает полное тождество этих систем. Примененная нами линеаризация уравнений является только первым приближением и как всякая линеаризация действительна только для достаточно малых отклонений. Более точные решения могут быть получены из рассмотрения *линейных уравнений с переменными во времени коэффициентами* (типа уравнений Хилла, Матье и др.), а также нелинейных уравнений. Следует однако учесть хорошо известное из практики положение, что переходные процессы перенастройки регулятора с постоянными коэффициентами (у которого $\Sigma = -m_0\Phi + k_0\Psi$), вызываемые изменением напряжения задатчика $k_0\Psi$, и процессы в системе с переменными коэффициентами, вызываемые изменением напряжения измерительного элемента при малых амплитудах, практически совпадают по форме. Поэтому, прежде чем при-

менять более сложный математический аппарат, нужно убедиться в необходимости такого усложненного исследования (см. рис. 72).

Должны быть разработаны методы объективного выявления рода и числа возмущающих и регулирующих воздействий и приближенного расчета оптимальных характеристик компаундирования, так как для этой задачи одной физической интуиции исследователя часто недостаточно. В широком плане речь идет о методе, который может дать ответ на вопрос, что лучше: варьировать в данной системе параметры или нелинейности, структуру или коды импульсов и т. п. Таких общих методов еще нет. Более узкая задача состоит в выборе варьируемых параметров, которые нужно изменять для достижения более полного экстремума более простым методом. Пример решения такой задачи приведен выше (стр. 324). Из этого примера легко установить, что грубо *приближенный* метод Ж. Дютиля дает *точные* ответы на *главные вопросы о числе и роде* регулирующих воздействий. Нелинейность компаундирующих связей уточняется затем экспериментально. Границы области существования экстремальных характеристик могут быть выяснены только экспериментально. Таким образом, ни одна задача не может считаться решенной до конца без экспериментальной проверки. Все это уменьшает значение точных аналитических методов, которые, как это было показано выше, еще имеют тот недостаток, что не учитывают нелинейности системы и свободную составляющую ошибки.

Следует развивать приближенные методы, сочетаемые с экспериментальным уточнением. Должны быть разработаны методы выявления основных *возмущающих и регулирующих воздействий*. Особенно перспективно спектральное исследование знакопеременных сигналов корректирующих следящих систем, работающих в составе комбинированных систем, с применением принципов разомкнутого и замкнутого управления одновременно. В некорректирующих следящих системах, по-видимому, основным возмущением является ускорение, в корректирующих — величины $\frac{A}{a}$ и k . Методы измерения возмущений представляют собой отдельную важную тему (метод Барта и др.).

Статистические методы (разработанные главным образом для линейных следящих систем) могут быть применены и для систем стабилизации, а также для определения опти-

мальных нелинейных характеристик (от типа S до типа M). В частном случае, когда объектом кибернетического управления является обычная система регулирования, эти методы (как и их параллель — методы компромиссной настройки) могут быть применены дважды: первый раз — для синтеза замкнутого контура основной системы и второй — для кибернетического вторичного регулятора.

Представляет интерес разработка вопросов многократного кибернетического приспособления как последовательных приближений к идеальному регулятору.

Еще недостаточно разработаны вопросы устойчивости систем регулирования, снабженных кибернетическими вторичными регуляторами.

Особое значение имеет разработка вопросов повышения помехоустойчивости. В этой области следует продолжать использование опыта общей теории связи, в частности, по импульсной радиосвязи и по цифровой радиолокации. Помехоустойчивость информационных каналов, охваченных обратной связью, еще не исследовалась и предстоит решить эту задачу сначала в плане общей теории связи, а затем для кибернетических систем. Следует отметить, что техника связи значительно ближе к рассматриваемым системам, чем устройства вычислительной техники.

Перечислим еще более частные, но достаточно важные вопросы, требующие разработки: 1) сравнение шаговых систем и систем с модуляцией; 2) более детальное исследование уравнений динамики (в форме A); 3) исследование формирования экстремальных характеристик (при дискретных μ); 4) разработка систем с несколькими показателями качества и, в частности, систем с самоизменением программы и алгоритмов; 5) исследование динамики систем с несколькими регулирующими воздействиями (метод «по очереди», «наискорейшего спуска», «кратных частот модуляции» и др.); 6) разработка экстраполяторов для систем с дискретным измерением φ ; 7) разработка теории релейных корреляционных функций и вопросов их практического применения (например, в установках с синхронным детектированием); 8) разработка средств улучшения динамики взаимокорреляционной системы с модулирующим воздействием (разработка устройств форсировки, вопросов прерывистого регулирования и др.); 9) разработка методов сравнения точности обычных систем и систем с приспособлением; 10) дальнейшее развитие теории инвариантности

я комбинированных систем в применении как к обычным системам с постоянными характеристиками, так и к кибернетическим системам с приспособлением, включая вопросы применения накапливающих (затягивающих) фильтров [16].

Предметом исследований должна явиться и разработка интерполяторов показателя качества Φ , применяемых для систем с дискретным измерением.

Некоторые из перечисленных вопросов являются предметом дальнейших исследований автора и его сотрудников (канд. техн. наук И. К. Парра, В. И. Иваненко, В. М. Кунцевича, аспирантов В. И. Костюка, П. И. Акинина, Ю. В. Крементуло, Б. Ю. Мандровского-Соколова и др.) в лаборатории автоматического регулирования Института электротехники АН УССР, а также кафедры автоматики Киевского политехнического института.



Глава X

КОМБИНИРОВАННОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ КАК ОБЩИЙ СЛУЧАЙ РЕГУЛИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ И КОЛИЧЕСТВА

КОМБИНИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ, В КОТОРЫХ СЛЕДУЕТ РАЗЛИЧАТЬ РЕГУЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ И КОЛИЧЕСТВА

В большинстве систем регулирования можно указать две переменные величины (обозначаемые нами буквами Φ и L), взаимосвязанные между собой через нагрузку по обобщенному закону, аналогичному закону Ома: следствие пропорционально причине. В пневматических устройствах такими величинами являются давление и расход газа, в электрических объектах — напряжение и ток, в двигателях — скорость и момент нагрузки и т. п.

До тех пор, пока задача регулирования сводится только к стабилизации одной из этих величин, никакого затруднения с выбором названия задачи не возникает. В таких случаях легко указать как регулируемую величину, так и основное возмущение. В системах стабилизации напряжения ток нагрузки называют основным возмущением и, наоборот, в системах стабилизации тока возмущением следует назвать напряжение. В комбинированных системах изменение коэффициентов компаундирующих связей переводит систему из режима стабилизации одной величины в режим стабилизации другой. Такие системы получают все большее распространение в технике. В качестве примера можно указать системы регулирования электродвигателей, обеспечивающие так называемую экскаваторную характеристику¹. На электростанциях в последнее время начали при-

¹ См., например, J. M. Pestarini, Some remarks on cybernetics, Fachtagungstechnik, Heidelberg, 1956.

меняться регуляторы возбуждения генераторов, обеспечивающие стабилизацию напряжения при малых токах, автоматически переходящие в режим стабилизации тока при малых напряжениях. Изменение режима может происходить плавно (при помощи нелинейных связей) или ступенчато (при помощи реле).

Если оба режима (стабилизация тока и стабилизация напряжения) имеют место в *одной и той же системе*, хотя и неодновременно, и являются равновероятными, то возникает вопрос, какую же из указанных двух величин следует назвать регулируемой величиной, а какую основным возмущением?

В комбинированных системах с широким диапазоном плавного изменения настроек приходится отказаться от терминов: «регулируемая величина», «основное возмущение» и применить какие-либо другие, более общие термины.

Не располагая другими подходящими терминами, можно использовать старые, заимствованные из классической теории регулирования, а именно термины «состояние» и «количество», так как они однозначно определяют то, что нужно выразить. Состоянием можно назвать величину числителя закона Ома (и ему аналогичных законов) — давление, напряжение, скорость и т. п., а количеством — величину знаменателя этого обобщенного закона — расход газа, жидкости или энергии, ток нагрузки, момент нагрузки и др. Эти названия нет необходимости изменять при плавном изменении настройки комбинированной системы от одного предельного режима к другому.

В классической теории автоматического регулирования, разработанной в трудах Максвелла, Вышнеградского, Стодоль, Жуковского и многих других, можно найти достаточно точное определение понятий «регулятор состояния» и «регулятор количества», а также указания на различие этих систем.

Например, в книге Т. Штейна¹, в которой изложены основные положения классической теории, мы находим:

«Регулировка состояния: управляемое количество (например, количество пара) влияет на зарядное состояние (например, на давление пара) буфера (объема трубопровода) и соответственно с этим зарядным состоянием регулятор давления пара управляет органом».

¹ Т. Штейн, Регулирование и выравнивание в паровых установках, ГИТИ, 1931, стр. 323.

«Количественная регулировка: управляемые количества (например, количество дымовых газов) сами влияют на регулировочный орган посредством регулятора количества».

В соответствии с этим регуляторы скорости вращения, напряжения, давления, уровня, частоты и других показателей следует отнести к группе регуляторов состояния, а регуляторы момента нагрузки, тока, расхода газа или воды, энергии и мощности — к группе регуляторов количества.

Комбинированная система содержит как измерительный элемент состояния, так и измерительный элемент количества.

Целью нашего исследования в данной главе является выявление добавочных возможностей, которые комбинированная система имеет в установившихся и динамических (переходных) режимах по сравнению с вырожденными предельными системами, предусматривающими регулирование одного только состояния или одного количества.

Наше исследование является несколько односторонним, так как мы рассматриваем все вопросы с точки зрения выбора коэффициентов усиления и сигналов управления (кибернетики), оставляя в стороне другую часть вопроса, связанного с распределением мощности в системах. Энергетическую сторону системы мы не затрагиваем. В связи с этим и принятые нами в качестве примеров системы значительно отличаются от реальных систем. Например, в некоторых системах компаундирующие связи подаются не на вход усилителя, а непосредственно на объект. В системах без сервомотора для решения вопросов, указанных выше, это отличие не имеет принципиального значения.

Второе упрощение рассмотренных задач связано с применением линейных уравнений. Мы ограничиваемся рассмотрением нагрузок, подчиняющихся обобщенному закону Ома.

РЕГУЛЯТОРЫ СОСТОЯНИЯ

Чтобы сделать наши рассуждения, имеющие общий характер, более конкретными, лучше всего пользоваться примерами. Такими примерами, иллюстрирующими общие положения, могут служить система регулирования скорости (автоматизированный электропривод, рис. 118), система регулирования напряжения генератора (рис. 119) и система стабилизации напряжения у потребителя (рис. 120). Устройство и работа таких систем хорошо известны.

Регуляторы состояния мы получим, если рубильники 1 и 2 поставим в верхнее, а рубильники 3 и 4 в нижнее положение. Рассматриваемые системы при $\Psi > 0$ представ-

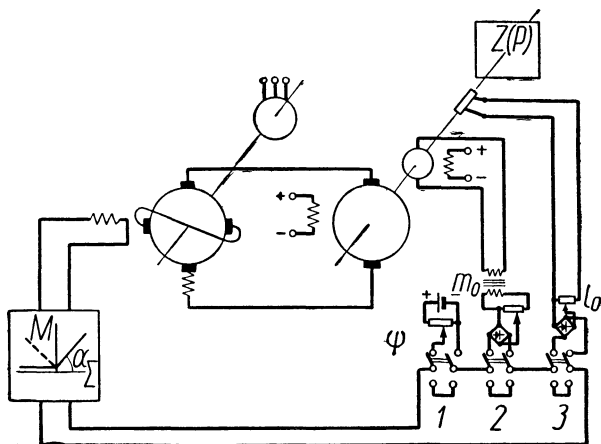


Рис. 118. Система комбинированного регулирования скорости двигателя постоянного тока.

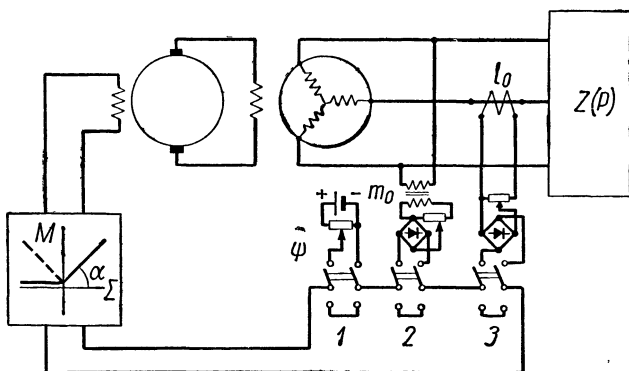


Рис. 119. Система комбинированного регулирования напряжения генератора переменного тока.

ляют собой системы стабилизации скорости или напряжения и осуществляют компенсационный принцип Ползунова—Уатта, т. е. принцип регулирования по отклонению регулируемой величины, называемый также принципом отрицательной обратной связи. Рассмотрим установившие-

ся режимы системы с обратной связью при действии на нее одного основного возмущения L .

Примем обозначения:

Φ — регулируемая величина (скорость, напряжение, т. е. показатель состояния);

L — основное возмущающее воздействие (момент нагрузки, ток нагрузки, т. е. показатель количества);

M — регулирующее воздействие, создаваемое регулятором;

Σ — величина на входе усилителя;

Ψ — величина, снимаемая с задатчика.

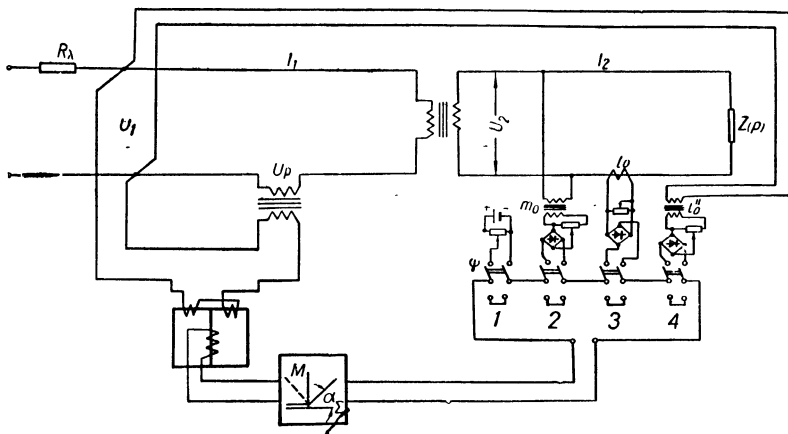


Рис. 120. Система комбинированного регулирования напряжения на приемном конце линии.

Для установившегося режима системы регулирования состояния можно составить следующие уравнения статики (при абсолютном отсчете переменных от нуля):

закон регулирования

$$\Sigma = \Psi - m_0 \Phi;$$

усилитель

$$M = \alpha_1 \Sigma;$$

объект

$$\Phi = A + \alpha_2 M - \beta L.$$

Исключая промежуточные переменные Σ , M , находим уравнение статической характеристики системы

$$\Phi = \Phi_0 - \gamma_\varphi L.$$

Значение регулируемой величины на холостом ходу (уставка)

$$\Phi_0 = \frac{A + \alpha_1 \alpha_2 \Psi}{1 + \alpha_1 \alpha_2 m_0}.$$

Коэффициент статизма системы по основному возмущению

$$\gamma_{\Psi} = \frac{\beta}{1 + \alpha_1 \alpha_2 m_0}.$$

Составим теперь уравнения динамики элементов системы (дифференциатор $m(p)$ на схемах рис. 118, 119, 120 не показан):

закон регулирования

$$\Sigma = \Psi - m(p) \Phi;$$

усилитель

$$M = Y_1(p) \Sigma;$$

объект

$$\Phi = A + Y_2(p) M - \beta(p) L;$$

нагрузка¹

$$\frac{\Phi}{L} = Z(p).$$

Уравнение динамики всей системы в целом

$$\left[1 + Y_1(p) Y_2(p) m(p) + \frac{\beta(p)}{Z(p)} \right] \Phi = A + Y_1(p) Y_2(p) \Psi.$$

Характеристическое уравнение (для переменной Φ)

$$1 + Y_1(p) Y_2(p) m(p) + \frac{\beta(p)}{Z(p)} = 0.$$

Корни характеристического уравнения определяют собой устойчивость системы. Условие статической (апериодической) устойчивости

$$s_{\varphi} = 1 + \alpha_1 \alpha_2 m_0 = 1 + \alpha_{\varphi} > 0.$$

Рассмотрим теперь полученные выражения.

¹ Необходимость учета влияния свойств нагрузки на устойчивость системы была показана в диссертации В. Л. Иносова (см. «Сборник трудов Института электротехники АН УССР», вып. 1 и 2, 1948). Особенностью данного рассмотрения является учет оператора нагрузки. Для объектов и нагрузок, где обобщенный закон Ома не действует ни для абсолютных значений, ни для отклонений величин, некоторые из выводов могут измениться.

По-видимому, наиболее эффективным средством влияния на свойства системы является выбор значений величины Ψ , снимаемой с задатчика, и коэффициента усиления $\alpha_\varphi = a_1 a_2 m_0$. Действительно, путем изменения Ψ легко смещать статическую характеристику системы по плоскости $\Phi - L$ параллельно самой себе. Однако если уставка системы задана $\Phi_0 = \text{const}$, то *увеличение Ψ равносильно увеличению α_φ* . При увеличении Ψ для сохранения $\Phi_0 = \text{const}$ приходится увеличивать m_0 соответственно равенству

$$m_0 = \frac{A - \Phi_0}{\alpha_1 \alpha_2 (\Phi_0 - \Psi)}.$$

Поэтому увеличение Ψ при $\Phi_0 = \text{const}$ влияет на устойчивость системы в сторону ее уменьшения. *Чем больше величины Ψ и Φ , вычитающиеся на входе усилителя, относительно их разности Σ , тем больше коэффициент усиления системы α_φ и тем ниже ее устойчивость [16].*

Аналогичным образом влияет на устойчивость и прямое повышение коэффициента усиления системы другими способами (например, путем увеличения α_1 или α_2). Таким образом, в исследуемой системе фактически удобным варьируемым параметром, влияющим как на статику, так и на динамику системы, является только один параметр — коэффициент усилителя α_φ .

Коэффициент усиления является варьируемым параметром, влияющим как на устойчивость, так и на статизм одновременно, что видно из рассмотрения выражения коэффициента статизма и характеристического уравнения. Если в системе имеются еще варьируемые параметры, влияющие непосредственно только на устойчивость (постоянные времени элементов, коэффициенты дифференциаторов и гибких обратных связей), то, используя их возможности для повышения устойчивости, мы снова переходим к задаче комприссионной настройки, правда, при большем значении жесткости системы.

Выясним теперь основные показатели системы.

В качестве меры устойчивости системы можно принять так называемую степень устойчивости $c_{\text{мин } \varphi}$, под которой понимают наименьший из показателей затухания системы, точнее, наименьшую действительную часть комплексных корней характеристического уравнения системы.

В качестве меры жесткости системы обычно используется знаменатель всех коэффициентов статизма, по всем возму-

щениям, действующим на систему. Как видно из полученных выражений, при наличии обратной связи все отклонения Φ , чем бы они не были вызваны, уменьшаются в $s_\varphi = 1 + \alpha_\varphi$ раз. Величина s_φ характеризует жесткость системы и называется степенью точности [15].

Наконец, мерой точности установившегося режима в отношении заданного возмущения L является коэффициент статизма γ_φ .

Итак, мы приходим к выводу, что в данной системе, располагая одним варьирующим параметром α_φ , нам приходится выбрать наилучшие значения трех величин:

$$s_{\min \varphi}; \quad s_\varphi = 1 + \alpha_\varphi; \quad \gamma_\varphi = \frac{\beta}{s_\varphi},$$

характеризующих устойчивость, жесткость и статизм системы (последние две величины жестко связаны, являясь взаимно обратными). Неоднократно было показано, что в одноконтурной системе увеличение коэффициента усиления вызывает снижение устойчивости и повышение жесткости [16]. Отсюда вытекает важное положение о необходимости *компромиссной настройки* системы, при которой α_φ выбирается так, чтобы жесткость была достаточной и система находилась еще далеко от границы устойчивости. Условие компромиссной настройки для системы второго порядка обычно определяется значением $s_{\min \varphi} \approx 0,25$. Необходимость компромиссной настройки одноконтурных систем¹ является одним из основных положений теории этих систем. Несмотря на это, в большинстве учебников по теории регулирования оно даже не упоминается.

При увеличении коэффициента усиления α_φ наклон характеристики, измеряемый от горизонтального направления (статизм), уменьшается. Однако только при $\alpha_\varphi = \infty$ мы получим горизонтальную характеристику, для которой $\gamma_\varphi = 0$ (рис. 121). Отрицательный статизм в данной системе получить нельзя.

Практически усилитель с бесконечным коэффициентом усиления может быть заменен интегрирующим элементом (сервомотором). При наличии такого элемента система стабилизации тождественно астатична по всем возмущениям.

¹ В работе [16] показано, что в многоконтурных системах с достаточно большим числом членов закона регулирования ($N > 3$) необходимость в компромиссной настройке системы снимается. При этом, достигая жесткости одного какого-нибудь контура, мы не заботимся о жесткости остальных контуров.

Рассмотрим еще режим работы системы при отсутствии задатчика, т. е. при $\Psi = 0$. Знак Σ совпадает со знаком Ψ , что и обеспечивает отрицательный характер обратной связи [16]. Если напряжение, снимаемое с задатчика, уменьшается до нуля ($\Psi \rightarrow 0$) и $\Psi < m_0\Phi$, то система становится системой с положительной обратной связью, теряет статическую устойчивость, т. е. «опрокидывается».

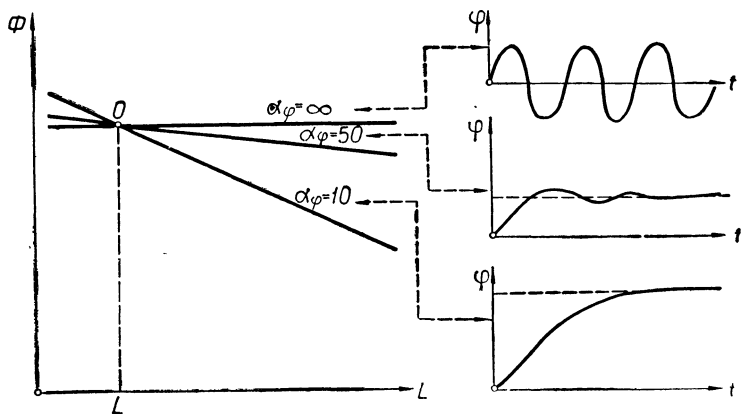


Рис. 121. Влияние увеличения коэффициента усиления α_φ на статическую характеристику и устойчивость системы регулирования состояния Φ .

Встречаются исключения — регулятор температуры холодильника, шахтный подъем и другие, у которых обратная связь является отрицательной и при $\Psi = 0$. Это объясняется отрицательным наклоном характеристик упомянутых объектов. Такие системы часто называют *системами торможения*.

РЕГУЛЯТОРЫ КОЛИЧЕСТВА

Регуляторы количества мы получим, если на схемах (рис. 118, 119, 120) рубильники 1 и 3 поставим в верхнее положение, а рубильник 2 — в нижнее. При этом рассматриваемые схемы будут представлять собой системы компаундирования (при $\Psi = 0$) или системы стабилизации момента нагрузки и тока нагрузки (при $\Psi > l_0L$). Системы компаундирования осуществляют принцип Понселе по воз-

мущению, а системы стабилизации — принцип компенсационного регулирования Ползунова — Уатта¹.

Рассмотрим установившиеся режимы систем регулирования количества (момента нагрузки, тока нагрузки и др.). Сохраняя принятые выше обозначения, напишем уравнения установившегося режима:

закон регулирования

$$\Sigma = \Psi - l_0 L;$$

усилитель

$$M = \alpha_1 \Sigma;$$

объект

$$\Phi = A + \alpha_2 M - \beta L.$$

Исключая промежуточные переменные, находим уравнение статической характеристики системы

$$L = L_0 - \gamma_\lambda \Phi.$$

Значение возмущения при $\Phi = 0$ (уставка)

$$L_0 = \frac{A + \alpha_1 \alpha_2 \Psi}{\beta + \alpha_1 \alpha_2 l_0}.$$

Коэффициент статизма системы

$$\gamma_\lambda = \frac{1}{\beta + \alpha_1 \alpha_2 l_0}.$$

Уравнения динамики элементов системы регулирования количества имеют в весьма общем случае следующий вид (дифференциатор $l(p)$ на рис. 118, 119, 120 не показан): закон регулирования

$$\Sigma = \Psi - l(p) L;$$

усилитель

$$M = Y_1(p) \Sigma;$$

объект

$$\Phi = A + Y_2(p) M - \beta(p) L;$$

нагрузка

$$\frac{\Phi}{L} = Z(p).$$

¹ Таким образом, утверждение о том, что регуляторы количества всегда осуществляют принцип регулирования по возмущению (принцип Понселе), является неправильным.

Уравнение динамики системы

$$[\beta(p) + Y_1(p)Y_2(p)l(p) + Z(p)]L = A + Y_1(p)Y_2(p)\Psi.$$

Характеристическое уравнение системы (для переменной L)

$$\beta(p) + Y_1(p)Y_2(p)l(p) + Z(p) = 0.$$

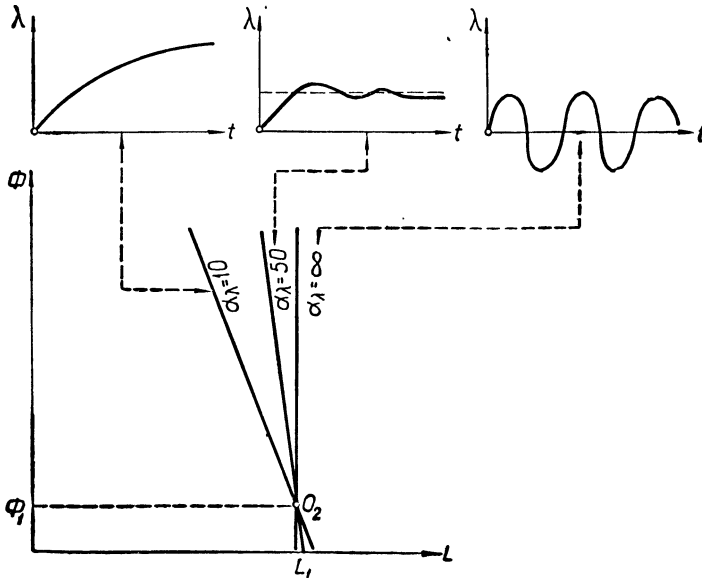


Рис. 122. Влияние увеличения коэффициента усиления α_λ на статическую характеристику и устойчивость системы регулирования количества L .

Полученные выражения подобны предыдущим, поэтому аналогичны и выводы их исследований (рис. 122). Изменение напряжения задатчика Ψ вызывает перемещение статической характеристики системы, причем она остается параллельной самой себе. Если уставка постоянна $L_0 = \text{const}$, то увеличение Ψ равносильно увеличению коэффициента усиления $\alpha_\lambda = \alpha_1 \alpha_2 l_0$. При этом условии мы располагаем в процессе настройки системы только одним варьируемым параметром α_λ , влияющим как на статические, так и на динамические свойства. В то же время система характеризуется тремя показателями: степенью устойчивости $s_{\text{мин}}$ (определяемой из характери-

ческого уравнения), степенью точности $s_\lambda = \beta + \alpha_\lambda$ (являющейся показателем жесткости) и коэффициентом статизма $\gamma_\lambda = \frac{1}{S_\lambda}$.

При увеличении коэффициента усиления коэффициент статизма и устойчивость снижаются, а жесткость растет. Отсюда снова вытекает необходимость *компромиссной настройки*, сводящейся к выбору оптимального соотношения величин γ_λ , $c_{\min \lambda}$ и s_λ . Как бы мы ни увеличивали коэффициент усиления α_λ , коэффициент статизма остается положительным и только при $\alpha_\lambda = \infty$ имеет место $\gamma_\lambda = 0$.

Практически усилитель с бесконечно большим коэффициентом усиления может быть заменен интегрирующим усилителем (сервомотором). При наличии сервомотора статическая характеристика системы вертикальна, а степень точности $s_\lambda = \infty$ по всем воздействиям.

При отсутствии задатчика, когда $\Psi = 0$, как уже отмечалось, получаем систему, которую принято называть *системой компаундирования*. Регулятор по одному только возмущению $\Sigma = I_0 \Delta$ не обладает сползанием нуля и является работоспособным при условии наличия саморегулирования объекта [16].

Система компаундирования с сервомотором при $\Psi = 0$ стремится поддержать $L = 0$, т. е. выключить систему. В отношении переменной Φ степень точности системы компаундирования $s_\varphi = 1$. Это означает, что она уменьшает только действие данного возмущения L на систему. Все остальные возмущения вызывают такие же отклонения Φ , как и при отсутствии системы компаундирования. Системы по возмущению не обладают жесткостью и могут быть применены только там, где не требуется высокая точность.

РАЗЛИЧИЕ СВОЙСТВ РЕГУЛЯТОРОВ СОСТОЯНИЯ И РЕГУЛЯТОРОВ КОЛИЧЕСТВА

До сих пор мы обращали внимание только на общее в свойствах регуляторов состояния и количества. Могла возникнуть мысль о том, что вообще никакого принципиального различия между указанными системами нет. Однако это неверно. Отличие систем связано с различием взаимосвязей между переменными, характеризующими режим объекта регулирования. Допустим, что мы имеем дело с объектом, имеющим одну регулируемую величину Φ ,

одно регулирующее воздействие M и два основных возмущающих воздействия L_1 и L_2 . Примером такого объекта может быть генератор, у которого Φ — напряжение, M — ток возбуждения, L_1 — ток нагрузки генератора, L_2 — изменение скорости первичного двигателя.

Если бы взаимосвязи величин Φ , M , L_1 , L_2 были симметричными, то никакой разницы в свойствах регуляторов состояния Φ и количества L_1 , L_2 не наблюдалось бы. Но в действительности влияние одной величины на другую и обратно является неодинаковым, что отражается в структуре уравнения объекта регулирования и нагрузки. Например, скорость вращения непосредственно на ток нагрузки генератора не влияет, напряжение на скорость вращения также не действует и т. д.

Для данной схемы взаимосвязей можно, например, сделать следующие выводы.

1. Для систем стабилизации количеств L_1 или L_2 (при $m_0 = 0$):

$$\alpha_\varphi = 0; \quad s_\varphi = 1; \quad c_{\min \varphi} = \infty.$$

Свойства этих систем не отличаются от известных свойств систем компаундирования по L_1 и L_2 . Всевозможные отклонения Φ , вызванные причинами, не связанными с изменением L_1 и L_2 , остаются без изменения при включении регуляторов L_1 и L_2 (степень точности $s_\varphi = 1$). Стабилизация L_1 не изменяет влияния на величину Φ всех остальных возмущений и, в частности, L_2 . Стабилизация L_2 также не уменьшает влияния на Φ всех других возмущений и, в частности, L_1 .

2. Для систем стабилизации состояния Φ (при $l_0 = 0$):

$$\alpha_\lambda = 0; \quad s_\lambda = 1; \quad c_{\min \lambda} = \infty.$$

Всевозможные отклонения величин L_1 и L_2 , вызванные причинами, не связанными с изменением Φ , остаются без изменения при включении регулятора (степень точности $s_\lambda = 1$, степень точности $s_\varphi \gg 1$). Стабилизация Φ несколько не изменяет влияния L_1 на L_2 (тока на скорость), но резко (в s_φ раз) уменьшает влияние L_2 на L_1 (изменений скорости на ток).

Таким образом, изучая в каждом конкретном случае физические свойства объекта, можно найти небольшие отличия в свойствах регулятора состояния Φ и регулято-

ров количества L_1 или L_2 . Эти различия связаны с физическими особенностями конкретных объектов регулирования и могут быть разными от случая к случаю.

КОМБИНИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ

Комбинированные системы объединяют принципы регулирования состояния и количества. Комбинированные системы регулирования, т. е. системы, осуществляющие как принцип Ползунова — Уатта, так и принцип Понселе одновременно, мы получим, если на схемах (рис. 118, 119 и 120) переключим все рублильники вверх, на измерительные элементы.

Рассмотрим установившиеся режимы комбинированной системы. Составим уравнения статики элементов системы: закон регулирования

$$\Sigma = \Psi - m_0\Phi - l_0L;$$

усилитель

$$M = \alpha_1 \Sigma;$$

объект

$$\Phi = A + \alpha_2 M - \beta L.$$

Уравнение статической характеристики системы напишем в виде:

$$\left. \begin{aligned} \Phi &= \Phi_0 - \gamma_\varphi L \\ L &= L_0 - \gamma_\lambda \Phi \end{aligned} \right\} \frac{\Phi}{\Phi_0} + \frac{L}{L_0} = 1.$$

Отрезки, отсекаемые характеристикой на осях (уставки):

$$\Phi_0 = \frac{A + \alpha_1 \alpha_2 \Psi}{1 + \alpha_1 \alpha_2 m_0}; \quad L_0 = \frac{A + \alpha_1 \alpha_2 \Psi}{\beta + \alpha_1 \alpha_2 l_0}.$$

Тангенсы углов наклона характеристики: от горизонтальной прямой

$$\gamma_\varphi = \frac{\beta + \alpha_1 \alpha_2 l_0}{1 + \alpha_1 \alpha_2 m_0},$$

от вертикальной прямой

$$\gamma_\lambda = \frac{1 + \alpha_1 \alpha_2 m_0}{\beta + \alpha_1 \alpha_2 l_0}.$$

Очевидно,

$$\text{arc tg } \gamma_\varphi + \text{arc tg } \gamma_\lambda = \frac{\pi}{2} \quad \text{и} \quad \gamma_\varphi \cdot \gamma_\lambda = 1.$$

Уравнения динамики элементов комбинированной системы в общем случае имеют следующий вид:
закон регулирования

$$\Sigma = \Psi - m(p) \Phi - l(p) L;$$

усилитель

$$M = Y_1(p) \Sigma;$$

объект

$$\Phi = A + Y_2(p) M - \beta(p) L;$$

нагрузка

$$\frac{\Phi}{L} = Z(p).$$

Уравнения динамики системы:
для переменной Φ

$$\left[1 + Y_1(p) Y_2(p) m(p) + \frac{\beta(p) + Y_1(p) Y_2(p) l(p)}{Z(p)} \right] \Phi =$$

$$= A + Y_1(p) Y_2(p) \Psi;$$

для переменной L

$$[1 + Y_1(p) Y_2(p) m(p)] Z(p) + [\beta(p) + Y_1(p) Y_2(p) l(p)] L =$$

$$= A + Y_1(p) Y_2(p) \Psi.$$

Как известно, в одноконтурной системе с обратной связью безразлично, относительно какой из переменных составляется характеристическое уравнение для определения устойчивости и показателей затухания: для любой переменной оно получается одним и тем же. В комбинированной системе *характеристическое уравнение для переменной Φ отличается от уравнения для переменной L на множитель $Z(p)$, что и следовало ожидать, так как*

$$\frac{\Phi}{L} = Z(p).$$

Рассмотрение полученных выражений показывает, что в отличие от предыдущих систем здесь имеется два удобно варьируемых параметра — коэффициенты усиления $\sigma_\varphi = \alpha_1 \alpha_2 t_0$ и $\alpha_\lambda = \alpha_1 \alpha_2 l_0$, влияющих одновременно на статику и динамику системы. Однако в общем случае, когда система работает на резко наклоненных характеристиках (рис. 123), оптимальная настройка существенно не облегчается, так как при двух варьируемых параметрах α_φ и α_λ в системе необходимо выбирать шесть показателей:

$$c_{\min \varphi}; \quad s_\varphi; \quad \gamma_\varphi; \quad c_{\min \lambda}; \quad s_\lambda; \quad \gamma_\lambda, \quad \text{где } \gamma_\varphi \gamma_\lambda = 1.$$

В частных же случаях, когда комбинированная система используется для стабилизации Φ или для стабилизации L , настройка резко упрощается.

При условии постоянства уставок $\Phi_0 = \text{const}$ или $L_0 = \text{const}$ изменение величины, снимаемой с задатчика Ψ , эквивалентно изменению коэффициентов усиления.

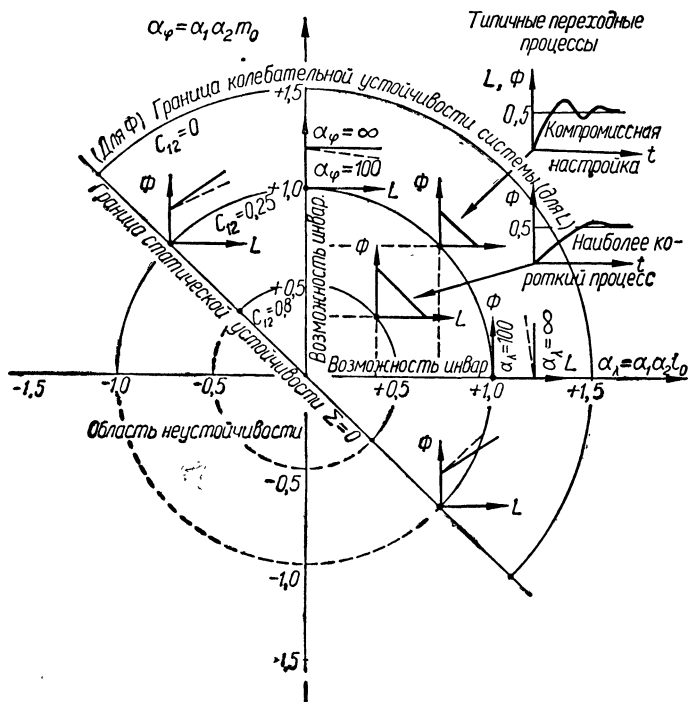


Рис. 123. Зависимость наклона статической характеристики и устойчивости комбинированной системы от соотношения величин и знаков коэффициентов α_ϕ и α_λ . Закон регулирования $\Sigma = \Psi - m_0\Phi - l_0L$.

Если комбинированная система настраивается как система стабилизации состояния Φ , то, варьируя $\alpha_\phi, \alpha_\lambda$, можно выбрать любые требуемые значения коэффициента статизма γ_ϕ и степени устойчивости $c_{\text{мин } \phi}$.

Если комбинированная система настраивается как система стабилизации количества L , то, изменяя $\alpha_\phi, \alpha_\lambda$, можно выбрать любое требуемое значение коэффициента γ_λ и степени устойчивости $c_{\text{мин } \lambda}$. Если бы на комбинированную

систему стабилизации действовало только одно возмущение L , по которому осуществлена компаундирующая связь l_0L , то, располагая двумя варьируемыми параметрами $\alpha_\varphi, \alpha_\lambda$, мы могли бы произвольно выбрать степень устойчивости $s_{\text{мин } \varphi}$ и коэффициент статизма γ_φ . Необходимость в компромиссной настройке как будто отпала. Однако это не так. Реально на систему действует много возмущений и помех, по которым нет компаундирующих связей. *С учетом этих второстепенных возмущений компромиссная настройка в комбинированной системе также необходима.* Коэффициент усиления α_φ нужно выбрать так, чтобы жесткость системы s_φ была бы достаточной при допустимом снижении степени устойчивости $s_{\text{мин } \varphi}$. Вторым варьируемым параметром α_λ можно после этого использовать для в значительной степени произвольного выбора коэффициента статизма γ_φ по основному возмущающему воздействию (устойчивость Φ при изменении α_λ изменяется мало). *Таким образом, один коэффициент усиления выбирается из условия компромиссной настройки, а другой — из условий заданного статизма.*

Аналогичные положения можно сформулировать и для системы стабилизации L .

Коэффициенты статизма комбинированной системы γ_φ и γ_λ могут принимать нулевые и отрицательные значения, т. е. статические характеристики могут иметь отрицательный наклон, причем система не теряет статической устойчивости (рис. 123). Например, может быть $\gamma_\varphi < 0$ при $\alpha_\varphi > 0$ (см. выражение для γ_φ).

Условия статической устойчивости $s_\varphi > 0$, $s_\lambda > 0$ могут быть удовлетворены при $m_0 < 0$ или при $l_0 < 0$ благодаря тому, что закон регулирования имеет *три слагаемых*. При двух слагаемых получить отрицательный статизм нельзя, так как для этого было бы необходимо, чтобы $\Psi < m_0\Phi$ или $\Psi < l_0L$. Для комбинированной системы $\Psi > (m_0\Phi + l_0L)$ и одно из слагаемых $m_0\Phi$ или l_0L может быть отрицательной величиной. Внешне эта особенность комбинированной системы выражается в том, что ее статические характеристики могут принимать отрицательный наклон (рис. 123).

Следует отметить, что при настройках, отвечающих 2-му и 4-му квадранту (рис. 123) отрицательный статизм имеется только по тому возмущению L , по которому осуществлена компаундирующая связь. По другим возмущениям достигается астатическая или почти астатическая

характеристика с необычайно большой жесткостью (степенью точности). Условия устойчивости системы в этих квадрантах значительно облегчены.

Для устойчивости параллельной работы объектов между собой часто полезно иметь большие значения коэффициентов статизма. Комбинированная система позволяет применить в этом случае отрицательные компаундирующие связи ($l_0 < 0$ или $m_0 < 0$), при которых сохраняется значительная жесткость системы (s_φ или s_λ), несмотря на большой статизм по данному количеству или состоянию.

Отрицательная связь по количеству $l_0 < 0$ в системе стабилизации Φ дает возможность увеличить коэффициент связи по регулируемой величине m_0 (при сохранении $\gamma_\varphi = \text{const}$) и тем поднять жесткость системы в отношении всех возмущений и помех, характеризуемую величиной степени точности

$$s_\varphi = 1 + \alpha_\varphi = 1 + \alpha_1 \alpha_2 m_0.$$

Аналогичным образом отрицательная связь по состоянию $m_0 < 0$ в системе стабилизации L дает возможность увеличить коэффициент связи по количеству l_0 (при сохранении $\gamma_\lambda = \text{const}$) и тем самым поднять жесткость системы в отношении всех возмущений и помех, характеризуемую величиной степени точности

$$s_\lambda = 1 + \alpha_\lambda = 1 + \alpha_1 \alpha_2 l_0.$$

Если в комбинированной системе применить сервомотор, что равноценно $\alpha_1 = \infty$, то статическая характеристика системы определится выражением

$$\Sigma = \Psi - m_0 \Phi - l_0 L = 0$$

или

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{1}{m_0} \Psi = \frac{l_0}{m_0} L; \\ \gamma_\varphi &= \frac{l_0}{m_0}; \quad \gamma_\lambda = \frac{m_0}{l_0}, \end{aligned}$$

т. е. система вовсе не будет астатической, как в указанных выше случаях, если $m_0 \neq 0$ и $l_0 \neq 0$. Интересно отметить, что при этом характеристика будет тождественно астатической, горизонтальной по всем другим возмущениям (по которым нет измерительных связей).

При отсутствии задатчика, когда $\Psi = 0$, получим систему компаундирования, у которой:

$$\Sigma = -m_0\Phi + l_0L \text{ или } \Phi = -\frac{l_0}{m_0}L.$$

В отличие от обычной системы компаундирования, где $\Sigma = l_0L$ и $m_0 = 0$, эта система может быть устойчива как при жестких связях, так и при использовании сервомотора, а степень точности ее может быть значительно больше единицы $s_\varphi = 1 + \alpha_1\alpha_2 m_0 > 1$.

Системы компаундирования без задатчика иногда называют дифференциальными регуляторами. Такой принцип регулирования впервые использовался В. Н. Чиколевым в регуляторах псложения электродов дуговых ламп. При отсутствии задатчика в комбинированной системе получаем систему, осуществляющую принцип дифференциального регулятора Чиколева, имеющую статическую характеристику с положительным статизмом. Эта система может работать как с пропорциональным усилителем, так и с сервомотором. Принцип Чиколева используется в дроссельном приводе с асинхронным двигателем, разработанном в Институте электротехники АН УССР [17].

Перейдем теперь к рассмотрению полученных выше выражений с точки зрения устойчивости и условий инвариантности (максимальной точности и быстродействия).

Из рассмотрения характеристических уравнений системы для переменной Φ

$$1 + Y_1(p)Y_2(p)m(p) + \frac{\beta(p) + Y_1(p)Y_2(p)l(p)}{Z(p)} = 0$$

и для переменной L

$$[1 + Y_1(p)Y_2(p)m(p)]Z(p) + \beta(p) + Y_1(p)Y_2(p)l(p) = 0$$

можно сделать вывод, что:

а) компаундирующая связь $l(p)$ является разомкнутой и не влияет на устойчивость колебаний переменной Φ только при $Z(p) \rightarrow \infty$ (холостой и почти холостой ход объекта) или при выполнении условия инвариантности переменной Φ во второй форме

$$\frac{\beta(p) + Y_1(p)Y_2(p)l(p)}{Z(p)} = 0.$$

Только в этих случаях систему регулирования по возмущению (количеству) можно считать разомкнутой¹;

б) компаундирующая связь $m(p)$ является разомкнутой и не влияет на устойчивость колебаний переменной L только при $Z(p) \rightarrow 0$ (короткое замыкание и большая нагрузка объекта) или при выполнении условия инвариантности для переменной L во второй форме

$$[1 + Y_1(p) Y_2(p) m(p)] Z(p) = 0.$$

В общем случае компаундирующие связи $l(p)$ или $m(p)$ являются замкнутыми и непосредственно влияют на устойчивость, т. е. на затухание колебаний как переменной Φ , так и переменной L .

В следящих и программных системах компаундирующую связь по сигналу $K(p)\Psi$ всегда можно считать разомкнутой и здесь оператор $K(p) = k_0 + k_1 p + k_2 p^2 + \dots$ на устойчивость не влияет [16]. В отличие от этого в системах стабилизации Φ или L компаундирующую связь по нагрузке $l(p)L$ (в регуляторе состояния) или $m(p)\Phi$ (в регуляторе количества) можно считать разомкнутой только при выполнении условий инвариантности во второй форме. Этот вывод относится ко всем системам, где величины Φ и L связаны между собой по обобщенному закону Ома.

Рассмотрим применение условий инвариантности (во второй форме) к комбинированным системам. Уравнения динамики системы написаны выше.

Для инвариантности переменной Φ необходимо, чтобы

$$\frac{\beta(p) + Y_1(p) Y_2(p) L(p)}{Z(p)} = 0,$$

а для инвариантности переменной L необходимо выполнить условие

$$[1 + Y_1(p) Y_2(p) m(p)] Z(p) = 0.$$

Первое условие дает практические указания для выбора оператора $l(p)$, а второе — для выбора $m(p)$. Оба условия одновременно и во всех режимах выполнить нельзя:

¹ В реальных нелинейных системах следует различать сопротивление для постоянной и для переменной составляющих движения. Условие $Z(p) = \infty$ означает отсутствие проводимости для переменной составляющей. Оно выполняется, если небольшие отклонения регулируемой величины не вызывают изменения возмущения, т. е. если $\lambda \neq f(\varphi)$.

первое используется при стабилизации Φ , а второе — при стабилизации L .

Условия инвариантности могут быть выполнены только в астатических (по данному возмущению) системах регулирования состояния или количества.

Геометрическое место точек плоскости $\alpha_\varphi, \alpha_\lambda$, отвечающее выполнению условий инвариантности Φ , почти совпадает с осью этой переменной. Чем больше степень точности, тем меньше отклонение от оси.

Аналогично выполнение условий инвариантности переменной возможно в точках, лежащих вблизи оси L (см. рис. 123).

СИСТЕМЫ С НЕСКОЛЬКИМИ ОСНОВНЫМИ ВОЗМУЩЕНИЯМИ

Пример системы с двумя основными возмущениями (регулирование напряжения генератора) мы привели выше. Другим примером может служить система стабилизации напряжения на приемном конце линии (см. рис. 120). Здесь регулируемой величиной Φ является выходное напряжение U_2 , возмущением L_1 — ток I_2 (проводимость нагрузки), возмущением L_2 — входное напряжение U_1 , регулирующим воздействием M — напряжение U_p , вводимое в систему от регулятора¹.

Если в этой системе включим рубильники 1 и 2 вверх, то получим стабилизатор Φ ; при включении рубильников 1 и 3 — стабилизатор L_1 , а при включении рубильников 1 и 4 — стабилизатор L_2 . Легко установить, что система имеет три варьируемых коэффициента усиления $\alpha_\varphi, \alpha_{\lambda_1}, \alpha_{\lambda_2}$, и девять показателей, которые должны удовлетворять девяти требованиям.

В частных случаях, например, при использовании системы для стабилизации Φ задача упрощается: параметр α_φ выбирается из условия компромиссной настройки, а параметры α_{λ_1} и α_{λ_2} — из условий заданного статизма.

Таким образом, задача настройки и ее решение по сложности таковы, как и в системе с одним возмущением. Сделанные выше выводы о влиянии компаундирующих связей на устойчивость и о роли свойств нагрузки и условий инвариантности остаются также в силе.

¹ Регулирование входного напряжения $U_1 = U_2$ становится возможным благодаря включению балластного сопротивления R_λ .

ЧЕТЫРЕ ФОРМЫ УСЛОВИЙ ИНВАРИАНТНОСТИ

Представим себе систему стабилизации переменной φ , находящуюся в состоянии покоя (т. е. при нулевых действительных начальных условиях). Допустим теперь, что в момент времени $t = 0$ к системе прикладывается изменяющееся по некоторому закону $\lambda(t)$ возмущающее воздействие, которое и вызывает в этой системе переходный процесс.

Если отсчет переменных вести в отклонениях от значений, отвечающих начальному невозмущенному состоянию, то $\varphi = \Phi - \Phi_0$; $\lambda = L - L_0$.

Условиями инвариантности переменной φ называются условия, накладываемые на величину коэффициентов связей линейной системы и на основные возмущающие воздействия, при выполнении которых данная переменная остается тождественно равной нулю в течение всего переходного процесса.

Аналогичным образом определяется условие инвариантности переменной λ . Для краткости изложения мы будем говорить только об инвариантности переменной φ .

Условия инвариантности применимы также к программным и следящим системам. В них при полной инвариантности угол рассогласования φ тождественно равен нулю, если начало движения соответствовало нулевым действительным начальным условиям (покою системы). При частичном выполнении условий инвариантности достигается значительное уменьшение ошибки.

В работах акад. В. С. Кулебакина [35] — [37] указаны три формы условий инвариантности в линейной системе, уравнение динамики которой имеет вид

$$a_3(p) \varphi(t) = -b_3(p) \lambda(t).$$

Эти формы условий инвариантности следующие:

- 1) $b_3(p) \neq 0, \lambda(t) = 0$;
- 2) $b_3(p) = 0, \lambda(t) \neq 0$;
- 3) $b_3(p) \neq 0, \lambda(t) \neq 0$, но $\frac{b_3(p)}{a_3(p)} \lambda(t) = 0$.

Рассмотрим эти формы условий инвариантности подробнее.

Первая форма не имеет практического значения; она только показывает, что для отсутствия ошибки достаточно, чтобы на систему не действовали никакие возмущения.

Вторая форма условий инвариантности является наиболее сильной, так как при выполнении этой формы условий ошибка системы будет равна нулю при возмущении $\lambda(t)$, изменяющемся по любому неизвестному нам закону во времени. Никакие ограничения на модуль возмущения не накладываются, так как линейная система (если она действительно линейна) одинаково подходит для любых амплитуд колебаний. В реальных нелинейных системах с ограниченным участком линейности приходится ограничивать возмущение по *ускорению*, так как именно ускорение (а не модуль возмущения) выводит систему за пределы линейных участков характеристик [16].

При выполнении второй формы условий инвариантности устраняется как свободная, так и установившаяся составляющая ошибки линейной системы, вызываемая возмущениями, по которым осуществлены компаундирующие связи $l(p)\lambda$ (достигается полная или абсолютная инвариантность). Ошибка, вызываемая другими возмущениями, связью по данному возмущению λ не устраняется.

Физическое объяснение полного устранения ошибки связано с наличием в системе двух каналов для передачи действия возмущения на данную инвариантную величину. Фаза и амплитуда колебаний на выходе этих двух каналов подбирается так, что одна выходная величина полностью компенсирует другую¹. Возможна как недокомпенсация, так и перекомпенсация ошибки. Перекомпенсация обычно связана с ухудшением устойчивости системы [16].

Из представления о двух каналах легко заключить, что:

а) условие инвариантности φ во второй форме может быть выполнено только в комбинированных системах стабилизации, где имеется компаундирующая связь $l(p) = l_0 + l_1 p + l_2 p^2 + \dots$, представляющая второй канал. Для программных и следящих систем вторым каналом является связь по заданию $K(p) = k_0 + k_1 p + k_2 p^2 + \dots$;

б) условие инвариантности φ во второй форме может быть выполнено только тогда, когда скорости передачи воздействия по обоим каналам (через объект и компаундирующую связь) будут одинаковы. В системах, описываемых уравнениями динамики, у которых левая и правая

¹ Работы по вопросам «двух каналов» принадлежат чл.-корр. АН СССР Б. Н. Петрову.

части имеют равный порядок высшей производной ($n = m$), условие инвариантности выполнить полностью нельзя. Условие $n > m$ является необходимым условием осуществления полной инвариантности.

Системы регулирования напряжения (см. рис. 119, 120) описываются уравнениями динамики, имеющими $n = m$, поэтому решения этих уравнений содержат *импульсные составляющие*, которые нельзя устранить с помощью второго канала. В этих системах полное удовлетворение условий инвариантности невозможно, хотя установившаяся составляющая ошибки устраняется легко. Математически это выражается в том, что условия инвариантности дают недостаточное число расчетных уравнений для определения коэффициентов системы [16].

Системы регулирования скорости (см. рис. 118) описываются уравнениями динамики, у которых $n > m$, и поэтому в них можно полностью удовлетворить условия инвариантности во второй форме, т. е. устранить как установившуюся, так и переходную составляющую ошибки. Закон изменения момента нагрузки $\lambda(t)$ может быть произвольным, однако нужно учесть, что ускорения системы должны быть ограничены так, чтобы система не выходила за пределы линейного участка; в противном случае исходное линейное уравнение динамики становится недействительным. Кроме того, как указывалось выше, начальные условия движения системы должны быть действительно нулевыми. При отсутствии возмущения система не должна иметь ошибки. Условия инвариантности выполняются только в астатических системах (вблизи оси Φ , рис. 123).

Хотя условие инвариантности во второй форме является очевидным (правая часть уравнения равна нулю), все же возможно привести его доказательство. Доказательство связано с применением понятия «эквивалентных начальных условий».

Переходный процесс, описываемый уравнением динамики

$$a_3(p)\varphi = -b_3(p)\lambda,$$

не отличается по форме от процесса, описываемого однородным уравнением

$$a_3(p)\varphi = 0$$

при определенном выборе (по формулам О. М. Крыжановского) начальных условий, которые называются

эквивалентными начальными условиями. Если эквивалентные начальные условия равны нулю, то отклонение регулируемой величины $\varphi \equiv 0$ (ошибка полностью устраняется на протяжении всего переходного процесса).

Рассмотрение формул О. М. Крыжановского показывает, что эквивалентные начальные условия равны нулю именно при $b_3(p) = 0$. Кроме того, эти формулы позволяют получить условия инвариантности во второй форме при ненулевых значениях действительных начальных условий [16].

Выполнение условий инвариантности во второй форме при условии разомкнутого характера компаундирующих связей не влияет на условия устойчивости системы. Это наглядно видно из рис. 95, где иллюстрируется так называемое свойство ортогональности условий инвариантности и устойчивости.

Третья форма условий инвариантности

$$\frac{b_3(p)}{a_3(p)} \lambda(t) = 0$$

показывает способы для устранения только установившейся составляющей ошибки. В отличие от второй формы условий, где возмущение может быть неизвестным, закон изменения возмущения $\lambda(t)$ (начиная с момента $t = 0$, когда система находилась в покое) должен быть задан в *общем буквенном виде*. Он выбирается как наиболее типичный или наиболее опасный для данной системы. Например, если при $t > 0$ $\lambda(t) = vt$, то для устранения установившейся ошибки следования достаточно, чтобы выполнялось равенство

$$\frac{b_3(p)}{a_3(p)} = K(p) C(p) = p^2 C(p),$$

где

$$K(p) = p^2.$$

Тогда

$$\frac{b_3(p)}{a_3(p)} \lambda(t) = C(p) \cdot p^2 \cdot vt \equiv 0$$

и ошибка следования будет устранена, так как $p^2 t \equiv 0$.

Таким образом, для устранения ошибки следования при $\lambda(t) = vt$ достаточно, чтобы в $Y_3(p) = \frac{b_3(p)}{a_3(p)}$ содержался множитель $K(p) = p^2$. Для устранения ошибки следования, вызываемой гармоническим сигналом $\lambda(t) = \sin \omega t$, до-

статочно, чтобы в $Y_2(p) = \frac{b_2(p)}{a_2(p)}$ был множитель $K(p) = \frac{p}{Lp} = p^2 + \omega^2$, так как $(p^2 + \omega^2)\sin \omega t = 0$ и т. д.

На подобных примерах легко убедиться, что для устранения установившейся ошибки достаточно выбрать $Y_3(p) = \frac{b_3(p)}{a_3(p)}$ так, чтобы эта операторная функция имела бы в качестве сомножителя оператор В. С. Кулебакина

$$K(p) = \frac{p}{L(p)} = \frac{1}{S(p)},$$

где $L(p)$ — операторное изображение заданного возмущения по Хевисайду;

$S(p)$ — операторное изображение по Лапласу.

Для устранения свободной (переходной) составляющей ошибки использовать третью форму условий инвариантности нельзя, поскольку нельзя подобрать $K(p)$ так, чтобы $K(p) \cdot \lambda(t) = 0$ как в нулевой момент, так и во время движения. Закон изменения возмущения $\lambda(t)$ задан только в интервале времени $0 < t < \infty$. В момент начала движения по заданному закону в системе возникает переходный процесс. Ввиду этого условие инвариантности в третьей форме практически нельзя выполнить в начале движения системы.

Поэтому условие инвариантности в третьей форме можно использовать только для устранения установившейся (вынужденной) составляющей ошибки. Условие инвариантности в третьей форме может быть практически выполнено *двумя совершенно различными способами*:

а) оператор $K(p)$ содержится множителем в $\frac{1}{a_3(p)}$,

б) оператор $K(p)$ содержится множителем в $b_3(p)$. При первом способе тождественно устраняется установившаяся ошибка от всех возмущений, входящих в правую часть уравнения динамики $\lambda, \lambda', \lambda'', \dots, \lambda^m$, а при втором — только от данного. Но оба способа дают только устранение установившейся составляющей ошибки. Действительно, при наличии, например, двух возмущений уравнение динамики системы принимает вид

$$a_2(p) \varphi = -b_2(p) \lambda + b'_2(p) \lambda'.$$

Условия инвариантности (в третьей форме) имеют вид: для возмущения $\lambda(t)$

$$\frac{b_3(p)}{a_3(p)} \cdot \lambda(t) = 0,$$

для любого другого возмущения $\lambda'(t)$

$$\frac{b'_3(p)}{a_3(p)} \cdot \lambda'(t) = 0.$$

Так как знаменатель операторной проводимости для каждого из условий инвариантности один и тот же и равен $a_3(p)$, то ясно, что наличие оператора $K(p)$ в выражении $\frac{1}{a_3(p)}$ является гарантией устранения установившейся ошибки при действии любого из возмущений.

Системы с так называемым астатизмом первого порядка (примером могут служить системы с сервомотором), в которых функция $\frac{1}{a_3(p)}$ содержит множитель $K(p) = p$. Функция $\frac{1}{a_3(p)}$ систем с астатизмом второго порядка содержит множитель $K(p) = p^2$. Как показал Н. Минорский¹ [82], в этих системах ошибка следования (скоростная ошибка) тождественно равна нулю для всех возмущений. Операторы Минорского p, p^2, p^3, \dots, p^n позволяют устранить ошибки следования при равномерном, равноускоренном и т. п. движениях системы. Таблица операторов акад. В. С. Кулебакина насчитывает более ста операторов для различных возмущений, заданных в общем, буквенном, виде, причем операторы Н. Минорского входят в нее как частные случаи.

При первом способе, когда оператор $K(p)$ входит как множитель в проводимость $\frac{1}{a_3(p)}$, *третья форма условий инвариантности может быть осуществлена в системах с принципом управления по отклонению регулируемой величины.*

Основная идея одного из основоположников математической теории инвариантности Г. В. Щипанова именно и заключалась в широком использовании первого способа. Известную работу Г. В. Щипанова о создании универсального регулятора (см. «Автоматика и телемеханика», № 1, 1939) можно, по-видимому, рассматривать как смелое предельное

¹ С теоремами Минорского можно познакомиться в сборнике «Автопилоты», под ред. Г. В. Щипанова, Оборонгиз, 1939.

обобщение теорем Минорского, приведшее, однако, к нереализуемым результатам. Полная инвариантность (полное устранение ошибки) в системах управления по отклонению не достижима, так как переходная составляющая ошибки при помощи третьей формы условий инвариантности не устраняется¹. Кроме того, повышение порядка астатизма системы ухудшает ее устойчивость.

С точки зрения выполнения условий инвариантности отчетливо выступает преимущество комбинированных систем, где возможно как полное устранение ошибки (при использовании второй формы условий инвариантности), так и значительно расширяется возможность частичного устранения ошибки путем выполнения условий инвариантности в третьей форме.

Действительно, легко составить схемы систем с компаундирующими связями по возмущению и его производным. В этих системах несложно получить множитель $K(p) = p$ или $K(p) = p^2$ в выражении $b_3(p)$ (второй способ) и, следовательно, устранить ошибку следования, вызываемую только возмущением, по которой имеется компаундирующая связь. Ошибка, вызываемая другими возмущениями, по которым нет компаундирующих связей, а также нелинейностью, не устраняется.

Выполнение условия инвариантности в третьей форме при первом способе сильно связано с изменением устойчивости систем, а при втором выполнение указанных условий не вызывает изменения устойчивости системы, если только компаундирующие связи являются разомкнутыми. (Эти условия рассмотрены нами в гл. VIII).

Практические трудности получения второй и более высоких порядков производных от воздействий известны. Между повышением порядка астатизма системы в соответствии с третьей формой (случай 3а) и неполным выполнением условий инвариантности во второй или третьей (случай 3б) форме имеется некоторая аналогия. В том и другом случае мы ограничиваемся введением небольшого числа первых производных, имеющих порядок ниже некоторого ε . Отсюда возник термин «инвариантность до ε » как синоним введения неполного числа производных, необходимых для полного устранения ошибки.

¹ Это относится к одноконтурным системам. В двух и многоконтурных системах абсолютная инвариантность может быть достигнута и при отсутствии связей по возмущению (см. «Автоматика» № 1, 1961).

Автором предложена новая, четвертая, форма условий инвариантности. Для уяснения этой формы напомним снова уравнение динамики системы в виде, показывающем влияние на нее по меньшей мере двух внешних возмущений

$$a_3(p)\varphi = -b_3(p)\lambda + b'_3(p)\lambda',$$

где λ — возмущение, изменяющееся независимо от нас по заданному закону;

λ' — дополнительное регулирующее воздействие, подаваемое на вход усилителя.

Четвертая форма условий инвариантности имеет вид

$$-b_3(p)\lambda + b'_3(p)\lambda' = 0.$$

Особенность четвертой формы условий инвариантности состоит в том, что здесь закон изменения $\lambda(t)$ должен быть задан в частном числовом виде [например, $\lambda(t) = 10(1 - e^{-3t})$], но в отличие от третьей формы в данном случае можно устранить не только установившуюся, но и переходную (свободную) составляющую ошибки. Для этого достаточно выбрать определенным способом закон изменения внешнего воздействия $\lambda'(t)$, которое искусственно вводится в систему с целью увеличения ее точности и быстродействия.

Практически воздействие $\lambda'(t)$ осуществляется при помощи устройства форсировки. В случае программного управления применение отдельного устройства форсировки не требуется. Здесь можно просто изменить форму задания с тем, чтобы достичь точной формы движения на выходе системы. Форма нового задания должна быть суммой старого задания и его первых двух производных по времени [16].

Выполнение условий инвариантности в четвертой форме не связано с изменением устойчивости системы.

Идея полной инвариантности принадлежит Г. В. Щипанову¹. Возможность создания физически реализуемых динамических систем, удовлетворяющих условиям инвариантности (мостовых схем), была показана акад. В. С. Кулебакиным ([35] — [37]). Затем автором были разработаны системы автоматического регулирования (обладающие направленным действием), удовлетворяющие условиям инвариантности (см. «Сборник трудов Института электротехники АН УССР», вып. 6, 1951 г. и вып. 10, 1953 г.).

¹ См. «Автоматика и телемеханика», № 1, 1939.

К этому же времени относятся и работы И. Р. Моора [83]. Таким образом, практическая ценность теории инвариантности была доказана. Как выяснилось, ошибка проф. Г. В. Щипанова состояла в том, что он допускал возможность полного устранения ошибки в системах направленного действия, использующих принцип управления по отклонению, тогда как в этих системах возможно только устранение установившихся составляющих ошибки путем повышения степени астатизма (форма 3а, табл. 13). Последнее было показано для равномерного и равноускоренного движения еще в работах Н. Минорского [82]. Остальные формы условий инвариантности могут быть выполнены только в системах, использующих принцип управления по возмущению и в комбинированных системах¹.

НЕКОТОРЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Как указывалось в начале главы, нашей целью было выяснение основных преимуществ (с точки зрения задач настройки, управления, т. е. кибернетики) комбинированных систем по сравнению с предельными вырожденными системами регулирования одного состояния или одного количества.

Теперь мы можем подвести некоторые итоги исследования.

В установившемся режиме дополнительные возможности комбинированных систем выявляются в том, что облегчается настройка системы и расширяются ее пределы. В частности, возможна работа системы с отрицательным статизмом (встречное регулирование) и работа с большим статизмом γ при большой жесткости $s = 1 + \alpha_p$ (что требуется для параллельной работы объектов).

Энергетические преимущества комбинированных систем с точки зрения уменьшения мощности корректора известны. Преимущества комбинированных систем для управления (кибернетики) также весьма значительны. Чем больше требования к точности и быстродействию системы, тем больше преимущества комбинированной системы [16]. Только в сравнительно грубых и медленнодействующих системах

¹ Это утверждение не относится к многоконтурным системам, где условия инвариантности принимают вид условий автономности (независимости) отдельных частей системы

Таблица 13

Четыре формы условий инвариантности и их основные свойства

Уравнение: $a_3(p) \Phi = b_3(p) L_1 + b_3''(p) L_2$, где $p = \frac{d}{dt}$

Формы условий инвариантности	Задание возмущений	Какая составляющая ошибки устраняется	Средства осуществления	
$L_1(t) = 0;$ $L_2(t) = 0$ (1)		Практического значения не имеет		
$\frac{b_3(p)}{a_3(p)} = 0$ (2)	$\frac{1}{a_3(p)} \rightarrow 0$ (2a)	В произвольном виде (для нелинейных систем с ограничением по ускорению [16])	Уменьшается ошибка, вызываемая всеми возмущениями, в том числе и изменением параметров во времени. Неабсолютная инвариантность	Жесткие многоконтурные системы с «клювообразной» частотной характеристикой. Неединичная операторная обратная связь в следящих системах (см. «Автоматика», № 1, 1960)
	$b_3''(p) = 0$ $b_3(p) = 0$ (2b)	То же	Устраняется вся ошибка, вызываемая возмущениями L_1 и L_2 . Абсолютная инвариантность	Регулирование по возмущениям и их производным по времени [16]
$\frac{b_3(p)}{a_3(p)} L(t) = 0$ (3)	$\frac{1}{a_3(p)} L(t) = 0$ (3a)	В буквенном, общем, виде	Только установившаяся составляющая, вызываемая всеми возмущениями	Интегральное управление по Н. Минорскому и В. С. Кулебакину
	$b_3(p) L(t) = 0$ (3b)	То же	Только установившаяся составляющая, вызываемая одним возмущением L_1	Регулирование по возмущениям и их производным по времени
$b_3(p) L_1(t) + b_3''(p) L_2(t) = 0$ (4)		В числовом виде	Вся ошибка, вызываемая возмущением L_1	Устройство смещения $L_2(t)$ (форсировки), а также искусственное изменение задания для программных систем (см. [16], стр. 293)

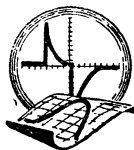
можно обойтись без комбинированного регулирования, пользуясь измерением одного только показателя состояния или показателя количества. Для точных и быстродействующих систем нужно измерять то и другое, т. е. применять комбинированное регулирование.

Основные положения теории инвариантности можно свести в следующую таблицу (табл. 13).

С точки зрения *динамических переходных режимов* преимущества комбинированных систем сказываются в том, что расширяется возможность применения условий инвариантности для улучшения динамики системы. Вторая форма условий, дающая полную инвариантность, может быть выполнена только в комбинированных системах. Третья форма условия (устраняющая установившуюся часть ошибки) хотя принципиально и может быть применена в системах управления по отклонению, но в комбинированных она получает дополнительную возможность удовлетворения. Четвертая форма связана с осуществлением только комбинированного регулирования.

Применение условий инвариантности в комбинированных системах не связано с изменением устойчивости системы, если выполняются указанные выше условия разомкнутости комбинированных связей (свойство ортогональности). Настройка комбинированных систем может производиться способом «по частям», при котором сначала выбираются значения варьируемых параметров, входящих в левую часть уравнения динамики (по правилам компромиссной настройки), а затем — параметры, входящие только в правую часть (по условиям инвариантности).

Указанные правила настройки комбинированных систем являются общими как для обычных, так и для кибернетических систем с приспособлением характеристик.



Список

известных применений кибернетических приспособляющихся систем (кроме примеров, указанных в данной книге)

Объект управления	Воздействия		Показатель качества	Литература
	возмущающие	регулирующие		
Гидравлическая турбина или ветродвигатель	Нагрузка турбины, напор воды (ветра)	Угол поворота лопастей	К. п. д. турбины	[5], [6]
Двигатель внутреннего сгорания	Нагрузка, качество топлива	Подача топлива и воздуха, угол зажигания	К. п. д. двигателя	[76]
Самолет	Спротивление полету	Подача топлива и воздуха, угол зажигания	Удельный расход топлива на единицу пути или максимум скорости	[86]
Трактор, локомотив и др.	Спротивление движению	Подача топлива и воздуха, угол зажигания	Удельный расход топлива или максимум скорости	[19]
Буровой агрегат	Твердость породы	Нагрузка на долото	Скорость бурения	Ю. И. Островский, М. Г. Эскин, Экстремум-регулятор для турбинного бурения, «Автоматика и телемеханика», т. XVII, № 9, 1956

Объект управления	Воздействия		Показатель качества	Литература
	возмущающие	регулирующие		
Нагревательные котлы	Условия охлаждения	Подача воздуха	Температура	[65]
Печи (мартеновские и др.)	Тепловая нагрузка	Подача воздуха	Температура или отношение $\frac{\text{топливо}}{\text{воздух}}$	[65] Экспресс-информация. серия АУ, вып. 35, сентябрь 1958
Автоматический диспетчер электростанции, энергосистемы	Изменение нагрузки	Распределение нагрузки между агрегатами	К. п. д. системы, показатели надежности работы	[19], Экспресс-информация, серия АУ, вып. 25, июнь 1958, вып. 47, декабрь 1958
Паровой котел	Нагрузка котла, качество топлива	Отношение $\frac{\text{воздух}}{\text{топливо}}$	Отношение $\frac{\text{пар}}{\text{топливо}}$	[19], Ю. М. Булавицкий, В. М. Кунцевич, Сборник «Элементы дискретной техники», 1959
В специализированных вычислительных машинах для расчета магнитных усилителей	Частота, индукция и др.	Параметры усилителя	Вес усилителя или коэффициент усиления	[24]
Следящие системы стабилизации обычного типа с постоянными характеристиками	Изменение нагрузки (режима)	Коэффициенты связей по возмущению и его производным (нелинейные компаундирующие связи)	Ошибка системы	[16, стр. 368]

Продолжение приложения

Объект управления	Воздействия		Показатель качества	Литература
	возмущающие	регулирующие		
Выпарной аппарат для сахарного производства	Расход сока, изменение концентрации, параметры греющего пара	Уровень сока	Удельный коэффициент передачи	[16]
Синхронно-следящая система с автоколебательным управлением	Помехи в линиях связи	Угол поворота следящего вала	Ошибка системы	[16], [19]
Металлорежущий станок (обдирочные работы)	Профиль детали, твердость металла, качество резца	Подача резца	Вес снимаемой стружки	[19]
Отстойник свекловичного сока	Расход и качество сока	Приток сока	Производительность	[19]
Дробилка колчедана, камня и др.	Величина и твердость кусков	Скорости отдельных частей дробилки	То же	[19]
Потребители электроэнергии	Изменение характера нагрузки	Возбуждение синхронных компенсаторов, переключение конденсаторов	Коэффициент мощности	[3]
Контроль диаметра движущейся проволоки	Скорость, качество проволоки, температура	—	Отклонение диаметра	[19]

Продолжение приложения

Объект управления	Воздействия		Показатель качества	Литература
	возмущающие	регулирующие		
Рифулеры и гидромониторы	Твердость породы	Скорость перемещения струн, ее шаг, время действия	Производительность	[19], Б. Ю. Мандровский-Соколов, А. М. Чапка, «Автоматика», № 2 и 3, 1959
Шунтовой электродвигатель для привода электроходов	Момент нагрузки	Ток в шунтовой обмотке	Скорость вращения	[19]
Циркулярная пила для металла или дерева	Твердость материала, качество пи- лы	Подача пи- лы (нелинейные компаундирующие связи)	Средняя производи- тельность	[17]
Упругая связь трактора и машины	Профиль поля	Упругость пружины, затухание	Амплитуда колебаний	[19]
Следящий прожектор	Движение предмета	Угол пово- рота прожек- тора	Яркость предмета	[19]
Печь для получения сернистого газа	Потери се- ры в огарке	Подача воздуха в печь	Произво- дительность печи	[19]
Паровой котел	Темпера- тура и коли- чество газов	Сопротив- ление подо- гревателя	К. п. д. подогревате- ля	[19]
Гидроэлек- тростанции, работающие на морском прибое	Сила прибоя	Угол на клона щитов	Высота подъема воды	[19]

Продолжение приложения

Объект управления	Воздействия		Показатель качества	Литература
	возмущающие	регулирующие		
Оптимизатор (прибор для выбора параметров систем регулирования на модели)	Помехи	Схема и параметры системы	Показатели точности системы	Р. И. Стаховский, Разработка и исследование автоматического оптимизатора, доклад на конференции по импульсной технике, М., 1958
Установка для получения высокооктанового бензина	Изменение состава входных продуктов	Добавление тетраэтилсвинца	Стоимость бензина	Экспресс-информация, серия АУ, вып. 10, март 1958
Нефтеперерабатывающий завод	Изменение состава входных продуктов	Изменение технологических параметров	Производительность	[69] Экспресс-информация, серия АУ вып. 22, июнь 1958
Колонна второй сатурации	Концентрация ионов кальция и величина рН сока	Добавление сатурационного газа	Минимум функции рН	Экспресс-информация, серия АУ, вып. 33, сентябрь 1958
Стан непрерывной горячей прокатки полос металла	Изменение твердости по длине	Изменение программы проката	Отклонения во всех точках программы	И. И. Перельман, Регулирование по принципу саморегулирующейся программы, «Автоматика и телемеханика» № 9, 1958
Антенна радиолокационных станций сопровождения	Изменение положения цели	Изменение азимута и угла местности	Минимальное рассогласование (ошибка)	[10]

Продолжение приложения

Объект управления	Воздействия		Показатель качества	Литература
	возмущающие	регулирующие		
Вагранка для получения жидкого чугуна	Изменение состава шихты	Подача воздуха	Максимальная температура (наилучшие механические свойства чугуна)	О. М. Крыжановский, В. И. Врублевский, В. Э. Солтык, Экстремальное регулирование дутья вагранки, «Автоматика», № 1, 1956
Манометр со следящей системой дистанционной передачи показаний	Изменение давления (уровня ртути)	Перемещение измерительного элемента	Минимальное рассогласование (ошибка)	[2]
Доменная печь	Состав загрузки и топлива	Уставки регуляторов температуры, влажности дутья и др.	Производительность	К. Б. Карандеев, Доклад на Всесоюзном совещании по автоматизации производственных процессов Металлургиздат, 1956
Дуговая электрическая печь	Состав ванны	Сила тока	То же	Ю. Е. Ефремович, Доклад на Всесоюзном совещании НГО приборостроения, Сборник под ред. В. В. Солодовникова, Машгиз, 1958
Металлорежущий станок (точная обработка)	Форма детали, твердость материала	Скорости подачи	Производительность	Д. Т. Васильев, Л. Н. Фицнер, Сборник под ред. В. В. Солодовникова, Машгиз, 1958

Продолжение приложения

Объект управления	Воздействия		Показатель качества	Литература
	возмущающие	регулирующие		
Автоклав для химической промышленности	—	—	Производительность	Б. Н. Петров, Автоматическая оптимизация управляемых систем, 1958, «Instruments and Automation», № 11, 1956
Речное судно	Силы сопротивления движению, изменение русла	Число оборотов	Удельный расход топлива при движении по реке против течения	Г. Е. Павленко, Сопротивление воды движению судов, Судопромгиз, 1956
Самолет	Условия полета	Положение рулей	Вертикальное ускорение	[92], М. Ф. Маркс
Электролитические ванны	Изменение режима работы	Перемещение анода	Производительность	Р. Б. Попов, Доклады Института автоматки Госплана УССР Изд во АН УССР, 1958
Определитель узлов и пучностей в трубах	Изменение режима работы	—	—	В. В. Казкевич, В. В. Алферов, «Техника молодежи», № 1, 1958
Шибер в газопроводе	Нагрузка и состав газов	Избыток воздуха	Минимум потерь	Т. Штейн, Регулирование и выравнивание в паровых установках, ГНТИ, 1931
Установка для испытания емкостей	—	—	Качество, точность испытаний	Журнал «Control Engineering», № 2, февраль 1959

Продолжение приложения

Объект управления	Воздействия		Показатель качества	Литература
	возмущающие	регулирующие		
Установка для обезвоживания этилобензина	Изменения входных потоков	Температура, скорость подачи	Качество выходного продукта	Журнал «Control Engeneering», № 2, февраль 1959
Дистилляционная колонна нефтезавода	То же	—	Стоимость продукта	То же
Тепловая электростанция	Изменение нагрузки	Подача воды для поддержания вакуума	Стоимость электроэнергии	[46]

ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматы, Сборник статей под ред. К. Э. Шеннона и Дж. Маккарти, Изд. иностр. лит., 1956.
2. Автоматическое регулирование, Сборник материалов конференции в Крэнфильде, 1951, Изд. иностр. лит., 1954.
3. Акинин П. И., Исследование периодических режимов в экстремальных системах шагового типа, «Автоматика», № 2, 1958.
4. Батков А. М., Солодовников В. В., Метод определения оптимальных характеристик одного класса самонастраивающихся систем, «Автоматика и телемеханика», № 5, 1957.
5. Богомоллов В. А., Автоматическое регулирование мощности гидростанций по водотоку, Госэнергоиздат, 1950.
6. Богомоллов В. О., Бенін В. Л., Регулятор кута повороту лопатей гідротурбін залежно від напору, «Вісник АН УРСР», № 7, 1955.
7. Большая Советская Энциклопедия, разд. «Автоматика», изд. 2-е, стр. 209.
8. Василевский М. Н., Асинхронный привод шахтных подъемных машин, Углетехиздат, 1953.
9. Гольдман Станфорд, Теория информации, 1957.
10. Джеймс Х., Никольс Н., Филлипс Р., Теория следящих систем, 1951.
11. Дряхлов А. И., Вопросы автоматизации процесса установления и поддержания выгоднейшего режима бурения нефтяных скважин, Львовский политехнический институт, 1954.
12. Ефреимович Ю. Е., Электрические режимы дуговых сталеплавильных печей, Metallurgizdat, 1956.
13. Заде Л. А., Прикладная механика, Сборник переводов, № 1, 1952.
14. Иваненко В. И., Исследование систем автоматического регулирования скорости шахтной подъемной машины, Сборник статей «Автоматизация в угольной промышленности», Углетехиздат, 1956.
15. Ивахненко А. Г., Условия инвариантности при статическом задании возмущений, «Автоматика», № 3, 1957.
16. Ивахненко А. Г., Электроавтоматика, изд. 2-е, Гостехиздат УССР, 1957.

17. Ивахненко А. Г., Автоматическое регулирование скорости асинхронных двигателей небольшой мощности, Гостехиздат УССР, 1953.

18. Ивахненко А. Г., Системы автоматического регулирования, содержащие элементы логического действия, Труды сессии АН СССР по научным проблемам автоматизации производства, т. 2, сентябрь 1956.

19. Ивахненко А. Г., Самонастраивающиеся системы автоматического регулирования, Изд-во АН УССР, 1957.

20. Ивахненко А. Г., Задачи экстремального регулирования, «Автоматика», № 3, 1956.

21. Ивахненко А. Г., Элементы общей теории кибернетических систем, «Автоматика», № 1, 2, 3, 4, 1958 и № 1 и 2, 1959.

22. Ивахненко А. Г., Электроавтоматика, ч. I и II, изд. 1-е, Гостехиздат УССР, 1954.

23. Ивахненко А. Г., Элементы логического действия для простых релейных кибернетических систем, «Автоматика», № 4, 1957.

24. Ивахненко А. Г., Петина Н. В., Стабилизаторы напряжения с комбинированным управлением, Изд-во АН УССР, 1958.

25. Ивахненко А. Г., Шукайло Е. М., Метод расчета параметров дифференциатора переменного тока с преобразованием числа фаз, «Автоматика», № 2, 1957.

26. Каменков Г. В., Исследование одного особенного, по Ляпунову, случая задачи устойчивости движения, «Сборник научных трудов Казанского авиационного института», № 3, 1934; № 4, 1935; № 5, 1936.

27. Каменков Г. В., Об устойчивости движения на конечном интервале времени, Прикладная математика и механика, т. 17, вып. 5, 1933.

28. Китов А. И., Электронные цифровые машины, 1956.

29. Казарьян Р. А., Кувшинов В. И., Назаров М. А., Элементы общей теории связи, 1957.

30. Кольман, Что такое кибернетика, «Вопросы философии», № 3 и 4, 1955.

31. Котельников В. А., Теория потенциальной помехоустойчивости, ГЭИ, 1956.

32. Красивский С. П., Автоматика на сооружениях гидроэлектрических станций, Госэнергоиздат, 1954.

33. Кринецкий И. И., Исследование медленно затухающих переходных процессов в нелинейных системах, «Автоматика», № 3, 1958.

34. Крыжановский О. М., Кунцевич В. М., Исследование переходных процессов в системах экстремального регулирования, «Автоматика», № 3, 1958.

35. Кулебакин В. С., О методах повышения качества автоматически управляемых систем, Труды ВВИА им. Жуковского, вып. 5021, 1954, стр. 3—51.

36. Кулебакин В. С., Доклады АН СССР, т. 68, № 5, 1949.

37. Кулебакин В. С., Доклады АН СССР, т. 77, № 2, 1951.

38. Кунцевич В. М., О применении регулирования по возмущающим воздействиям (компаундирования) в системах экстремального регулирования, «Автоматика», № 1, 1958.

39. Кунцевич В. М., Приближенный частотный метод исследования экстремальных систем импульсного регулирования, «Автоматика», № 2, 1958.

40. Кунцевич В. М., Преобразователи непрерывных дискретных величин (обзор), «Автоматика», № 2, 1957.
41. Кунцевич В. М., Акинин П. И., Приближенные методы определения частоты и амплитуды автоколебаний в системах экстремального регулирования, «Автоматика», № 3, 1957.
42. Лернер А. Я., Улучшение динамических свойств автоматических компенсаторов при помощи нелинейных связей, «Автоматика и телемеханика», № 2 и 4, 1952.
43. Мандровский - Соколов Б. Ю., Улучшение характеристик следящей системы с помощью нелинейного RC-устройства, «Автоматика», № 3, 1958.
44. Нелинейные системы, Сборник статей под ред. проф. М. Ф. Шулейкина, Связьиздат, 1936.
45. Ольденбургер Р., Стабилизация систем регулирования при помощи специального сигнала, «Автоматика и телемеханика», № 5, 1957.
46. Паперный Е. А., Беркман Р. Я., Счетно-решающее устройство для непрерывного изменения коэффициента полезного действия парового котла, Львовский политехнический институт, Научные записки, вып. XXXII, Теплоэнергетическая сессия, № 1, 1955.
47. Панов Д. Ю., Ляпунов А. А., Мухин И. С., Автоматизация перевода с одного языка на другой, Труды сессии АН СССР, т. 1, сентябрь 1956, Пленарные заседания, Изд-во АН СССР, 1957.
48. Пугачев В. С., Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления, Государственное издательство технико-теоретической литературы, М., 1957.
49. Полетаев И. А., Сигнал, 1958.
50. Радунская И., Кибернетика и жизнь, «Огонек», № 29, 1957.
51. Самонастраивающиеся системы регулирования, Эспресс-информация ИНИ АН СССР, серия «Автоматическое управление», вып 37 и вып. 47, 1957; вып. 2, 1958.
52. Солодовников В. В., Некоторые черты кибернетики, Изд-во «Знание», 1956.
53. Солодовников В. В., Некоторые принципы построения и вопросы теории самонастраивающихся систем автоматического управления, Труды сессии АН СССР по научным проблемам автоматизации производства, т. 2, сентябрь 1956.
54. Солодовников В. В., Основные черты технической кибернетики, Сборник «Автоматическое управление и вычислительная техника», вып. 1, Машгиз, 1958.
55. Солодовников В. В., Введение в статистическую динамику систем автоматического регулирования, Госэнергоиздат, М., 1952.
56. Тартаковский Г. П., К анализу систем прерывистого регулирования с переменными параметрами, Труды сессии АН СССР, октябрь 1956.
57. Темников Ф. Е., Автоматические регулирующие приборы, Машгиз, 1954.
58. Теплов Л., Что такое кибернетика, «Техника молодежи», № 12, 1956.
59. Теплов Л., «Черепяхи» Уолтера Грея, «Техника молодежи», № 9, 1956.
60. Тетельбаум С. I., До питания по интенсивность та

спектральный склад метagalактичного випромінювання, «Доповіді Академії наук УРСР», № 1, 1955.

61. Тетельбаум С. И., К вопросу о круговороте материи в бесконечной Вселенной, Известия КПИ, т XVI, Киев, 1954.

62. Уланов Г. М., Доклады АН СССР, т. 96, № 3, 1954.

63. Фролов Ю. П., Современная кибернетика и мозг человека, «Вопросы философии», № 3, 1956.

64. Харкевич А. А., Очерки по общей теории связи, Госэнергиздат, 1950.

65. Цыпкин Я. З., Состояние и задачи развития теории систем автоматического управления дискретного действия, Труды сессии АН СССР, т. 2, сентябрь 1956.

66. Цянь Сюэ-Сень, Техническая кибернетика, Изд. иностр. лит., 1956.

67. Чернов Е. Н., О применении теории свертки к анализу систем автоматического регулирования с переменными коэффициентами, Труды Второго всесоюзного совещания по теории автоматического регулирования, т. 2, Изд-во АН СССР, 1955.

68. Чайковский В. И., Помехоустойчивость автокорреляционного метода приема импульсных сигналов, «Радиотехника», № 6, 1955; № 4, 1956; № 2, 1957.

69. Gordon Pask, Tomorrow's Control Systems Can Learn from Experience, Automation progress, № 2, 1959.

70. Ashby W. R., Design for a Brain. London, Chapman and Hall, 1952.

71. Benner A. H., Drenick R., An Adaptive Servo System. IRE Conv. Record, part, 4, March, 1955.

72. Burnet J. R., Shumate M. S., A Relationship between Rise Time and Peak Power in Servomechanisms., Proc., NEC, v. 12., p. 126.

73. Burt E. G., Self-Optimizing Systems., Fachtagung Regelungstechnik, Heidelberg, Beitrag, № 86, 1956.

74. Byron White., The Quasie Optimal Controller. Instr. and Aut., v. 29, № 1, 1956.

75. Casgriff A., Serves that Use Logic can Optimize. Contr. Eng. № 9, 1955.

76. Draper C. S., Li V. T., Principles of Optimizing Control Systems and an Application to the Internal Combustion Engine., Mass. Inst of Technology ASME, N—Y, 1951.

77. George Vasu., Experiments with Optimizing Controls Applied to Rapid Control of Engine Pressures with High Amplitude Noise Signals, Trans. of ASME, v 79, № 3, April, 1957.

78. Keiser B. E., The linear Input-Controlled Variable-Pass Network, Trans. IRE on Inform Theory, № 1, March, 1955.

79. Lange A., Anwendung der Korrelationsanalyse in den Nachrichtentechnik, Nachrichtentechnik, № 1, 2, 1957.

80. Li Y. T., Optimizing System for Process Control. Instr., v. 25, № 1, 2, 3, 1952.

81. Metcalf B. L., Guttle G. C., The Technique and Development of Automatic Winding in Mine shafts, Proc. IEE, Dec., 1953.

82. Minorsky N., Directional Stability of Automatically Controlled Bodies, Journ. of Am. Soc. of Naval Architesct, v. XXXIV, 1922,

см. также сборник «Автопилоты», под редакцией Г. В. Щипанова, Оборонгиз, 1939 г.).

83. Moore I. R., Combination Open-Cycle and Closed-Cycle Control Systems, Proc. IRE, v. 39, № 11, 1951.

84. Pestarini I. M., Some Remarks on Cybernetics. Fachtagung Regelungstechnik, Heidelberg, Beitrag № 73, 1956.

85. Serdengecchi, Optimizing Control in the Presence of Noise Interference, Jet prop № 6, 1956.

86. Shull I. R., An Automatic Cruise Control Computer for Long Range Aircraft, Trans. of IRE, № 12, 1952, El. Eng., v. 72, № 4, April, 1953.

87. Wiener N., Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine, N—Y, 1948.

88. Wiener N. Interpolation, Extrapolation and Smoothing of Stationary Time Series. Cambridge, Mass, 1950.

89. Mark Y., Pelegrin, Calcul Statistique des Systemes Asservis, Paris, 1953.

90. Drenick R. F., Shahbender R. A., Adaptive Servomechanisms, Trans. of AIEE, v. 76, p. 11, 1957.

91. Bolton N., Proc. of ISE, v. 40, 1952.

92. Aseltine J. A., Mancini A. R., and Sature C. W., A Survey of Adaptive Control Systems, Trans of IRE on Aut. Control, PGAC-6, Dec., 1958. В этой статье дан наиболее полный список литературы по кибернетическим приспособляющимся системам, вышедшей за границы.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	3
Глава I	
Автоматика и техническая кибернетика	
Основные принципы управления	10
Определение автоматике	10
Первые автоматические регуляторы	10
Автоматическое регулирование до появления кибернетики	13
Техническая кибернетика — основа комплексной автоматизации производства	14
Основные функции больших вычислительных машин	18
Автоматизация некоторых формальных видов умственного труда человека	19
Машины, сравнивающие большое число возможных вариантов и выбирающие один из них	20
Практическое применение машин с отбором наилучшего варианта	21
Машины, действующие по программе	23
Машины, подбирающие слова и звуки по определенным, заранее заданным правилам (алгоритмам) или критериям	23
Может ли машина достичь или превзойти возможности человеческого мозга?	24
Некоторые основные идеи кибернетики	27
Теория информации и автоматическое регулирование	29
Зависимость количества информации от вероятности сообщения	33
Теорема В. А. Котельникова	34
Статистическая теория случайных процессов	35
Краткие сведения из теории случайных величин	35
Основные теоремы теории вероятностей	38
Краткие сведения из теории случайных процессов	38

Глава II

Элементы логического действия (ЭЛД) для простых релейных кибернетических систем

Основные логические связи	48
Индикаторы источника тока, имеющего наибольшее значение напряжения (ИБН)	54
Индикаторы источника тока, имеющего наименьшее значение напряжения (ИМН)	60
Индикатор источника тока, напряжение которого отличается от заданного значения на наименьшую величину (ИЗН)	64
Ограничители напряжения	64
Запоминающие устройства (ЗУ) емкостно-триодного типа	65

Глава III

Кибернетические системы с самоизменяющейся уставкой (настройкой)

Об аналогии принципиальных схем различных по назначению кибернетических систем	69
Задачи экстремального регулирования	69
Примеры объектов экстремального регулирования	75
Обязательное условие, при котором применение экстремального регулирования рационально	77
Астатическая характеристика системы и оптимальная характеристика компаундирования	77
Классификация систем экстремального регулирования	78
Комбинированные системы экстремального регулирования	96
Неколебательные обратные связи	98

Глава IV

Кибернетические системы с самоизменяющейся программой или алгоритмом действия

Задачи самоизменения программы	102
Примеры систем с самоизменяющейся программой с одним показателем качества	103
Классификация систем с самоизменяющейся программой и одним показателем качества	107
Комбинированные системы с самоизменяющейся программой	115
Примеры систем с самоизменяющейся программой и несколькими показателями качества	119
О системах с самоизменением алгоритмов	122

Глава V

Кибернетические системы с самоизменяющимися параметрами

Задача самоизменения параметров	132
Примеры систем с самоизменением параметров	133

	Стр.
Классификация систем с самоизменением параметров	143
Комбинированные системы с самоизменением параметров	147
Практическое значение исследования следящих систем, находящихся под действием статистических знакопеременных входных сигналов	147

Глава VI

Кибернетические системы с самоизменяющимися нелинейными характеристиками или алгоритмом преобразования

Задача самоизменения нелинейностей	149
Примеры систем с самоизменяющимися нелинейными характеристиками	150
Классификация систем с самоизменяющимися нелинейными характеристиками	163
Комбинированная система с самоизменением нелинейных характеристик	164
Следящие системы с самоизменяющимся знаком следования	167
Системы с самоизменяющимся алгоритмом преобразования	169
Компенсаторы с самоизменением нелинейной характеристики и с самоизменением алгоритма преобразования	171
Самоулучшающиеся компенсационные преобразователи	172
Об «обучающихся» системах	174
Примеры системы с самоизменяющимся алгоритмом действия	177
Системы с самоизменением вероятностных характеристик	179
Самоулучшающиеся системы с учетом вероятности срабатывания элементов и системы с поиском циклических (повторяющихся) составляющих задания	180

Глава VII

Кибернетические системы с самоизменяющейся структурой

Задачи самоизменения структуры	181
Примеры систем, где требуется самоизменение структуры	182
Системы, состоящие из большого числа одинаковых элементов	189
Классификация систем с самоизменяющейся структурой	191
Системы разомкнутые с управлением по возмущениям	193
Системы с обратной связью с управлением по регулируемой величине	196
Комбинированные системы с самоизменяющейся структурой	204

Глава VIII

Основные вопросы общей теории кибернетических систем автоматического регулирования

Аналогия кибернетических систем автоматического регулирования и возможность создания для них общей теории	207
Статическая и статическая характеристики комбинированной экстремальной системы	215

Определение оптимальной характеристики компаундирования в системе с одним основным возмущающим воздействием	222
Определение оптимальной характеристики компаундирования в системе с несколькими основными возмущающими воздействиями	224
Суммирование действия нескольких компаундирующих связей	224
Составляющие ошибки систем экстремального регулирования	227
Основные положения теории установившихся режимов комбинированных экстремальных систем	229
Энергетические преимущества комбинированных систем в установившихся режимах	229
Кибернетические преимущества комбинированных систем в установившихся режимах	231
Методика расчета параметров комбинированных систем	232
Автоколебательная экстремальная система с регулированием по производным от показателя экстремума и регулирующего воздействия	240
Автоколебательная экстремальная система, удерживающая пиковое значение показателя экстремума	244
Уравнения динамики систем экстремального регулирования автоколебательного типа	246
Исследования поисковых автоколебаний системы	251
Экспериментальная проверка формул	255
Нелинейный обостритель экстремальной характеристики	256
Введение второй производной от показателя экстремума в закон регулирования системы	256
Система с вынужденными колебаниями с непрерывной модуляцией (поисковым сигналом)	257
Система с вынужденными колебаниями шагового типа	259
Преимущества комбинированных систем в переходных динамических режимах	263
Повышение точности и быстродействия систем улучшением компаундирующих связей по возмущениям	263
Уравнения динамики и условия инвариантности экстремальной системы с модулирующим воздействием	264
Два способа удовлетворения условий инвариантности в системах стабилизации, имеющих сервомотор	268
Выполнение условий инвариантности в системах с модуляцией при помощи измерительной компаундирующей связи $I(p)$	270
Выполнение условий инвариантности при помощи непосредственной (силовой) компаундирующей связи $I'(p)$	271
Повышение точности экстремальных систем улучшением действия обратной связи	274
Улучшение действия обратной связи с сервомотором постоянной скорости при помощи устройства форсировки (изодрома)	276
Ортогональность (независимость) двух основных методов повышения точности	279

Глава IX

Повышение помехоустойчивости систем

Выбор схемы систем и специальные способы повышения помехоустойчивости	287
---	-----

Обычные системы с постоянными характеристиками как объекты кибернетического управления	287
Системы обычного типа с постоянными характеристиками, управляемые по возмущениям	289
Системы обычного типа с постоянными характеристиками, управляемые по регулируемой величине	292
Применение статистических методов к выбору схемы и параметров контура обратной связи следящих систем	293
Применение статистических методов к выбору схемы и параметров контура обратной связи систем стабилизации	297
Наиболее простой расчет статистических характеристик четырехполосника	302
Комбинированные системы обычного типа с постоянными характеристиками	304
Уменьшение ошибки следящей системы при помощи кибернетического самоизменения ее характеристик	304
Определение оптимальных характеристик компаундирования аналитическими методами	307
Кибернетические системы с переменными характеристиками, управляемые по возмущениям	311
Измерение параметров спектральных плотностей помех и возмущений	312
Метод регулирования по возмущению, измеряемому при помощи двух частотных фильтров	315
Кибернетические системы с переменными характеристиками, управляемые по показателю качества	319
О многократном применении кибернетического самоизменения характеристик	320
Комбинированные кибернетические системы с переменными характеристиками	321
Система регулирования по производным от возмущений с самоизменением коэффициентов компаундирующих связей	322
Методы объективного выявления возмущающих и регулирующих воздействий	323
Кибернетическая система, управляемая по возмущению	329
Системы, стремящиеся уменьшить различие между основной системой регулирования и ее моделью	333
Выбор периода вынужденных колебаний экстремальных систем по статистическим критериям	333
Уменьшение действия помех при помощи квантования	339
Методы приема слабых сигналов при наличии помех	341
Метод фильтрации периодического сигнала	343
Автокорреляционный метод	347
Взаимокорреляционный метод	351
Зависимость действия гармонической помехи на систему с коррелятором от места входа помехи, ее частоты и фазы	355
Методы накопления (интегрирования)	357
Метод усложнения поискового (модулирующего) сигнала	361
Сравнение методов повышения помехоустойчивости	362

Выбор системы экстремального регулятора для широкого практического использования	364
Уменьшение влияния помех при помощи дифференциальных схем и моделей объекта регулирования	365
Вопросы дальнейших исследований	367

Глава X

Комбинированное регулирование как общий случай регулирования состояния и количества

Комбинированные системы, в которых следует различать регулирование состояния и количества	372
Регуляторы состояния	374
Регуляторы количества	380
Различие свойств регуляторов состояния и регуляторов количества	383
Комбинированные системы	385
Системы с несколькими основными возмущениями	392
Четыре формы условий инвариантности	393
Некоторые замечания	401
Приложение	404
Литература	412

Алексей Григорьевич Иващенко

Техническая кибернетика

Редактор канд. техн. наук *Г. Зайцев*

Ведущий редактор *Л. О. Полянская*

Художник *Г. Д. Зинченко*

Технический редактор *С. М. Матисевич*. Корректор *Л. Л. Кирденко*

Сдано в набор 8/IX 1961. Подписано к печати 19/XII 1961 г. Формат бумаги 84×108/12. Объем: 13,25 физич. лист., 21,73 условн. лист., 27,04 учетно-изд. лист. Тираж 20000. БФ 08592. Цена 1 руб. 10 коп.

Государственное издательство технической литературы УССР
Киев Пушкинская. 28

Отпечатано с матриц Книжной ф-ки им. Фрунзе Главолиграфиздата Министерства культуры УССР, Харьков, Донец-Захаржевская 68 типографии «Коммунист» Главолиграфиздата Министерства культуры УССР, Харьков, Пушкинская, 29. Зад. № 70/.

