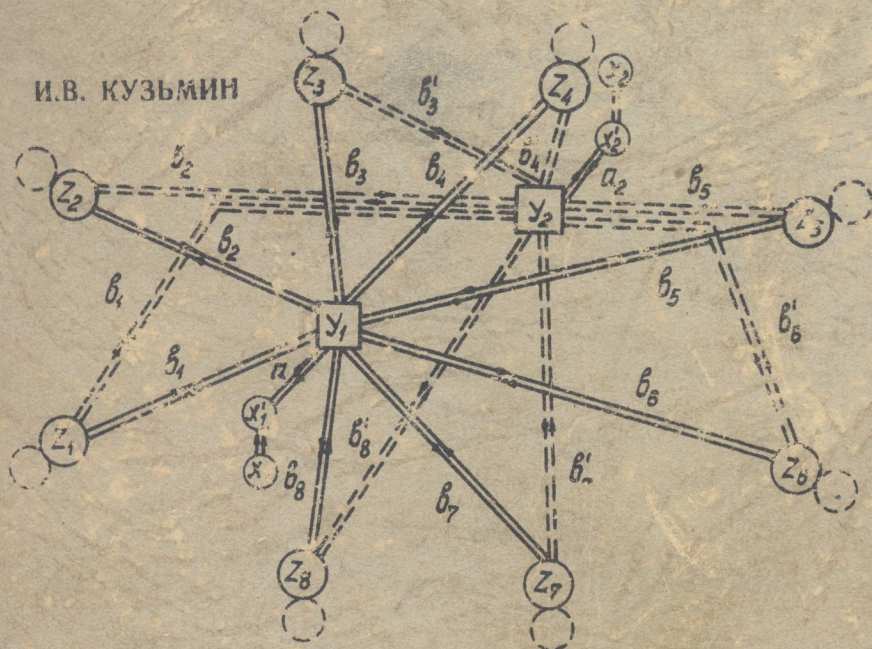


КНИВ

И.В. КУЗЬМИН



# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕЛЕМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ

Часть I

ЭЛЕМЕНТЫ СИНТЕЗА СТРУКТУР

Харькѳв

1967

681,52

ХАРЬКОВСКОЕ  
ВЫСШЕЕ КОМАНДНО-ИНЖЕНЕРНОЕ УЧИЛИЩЕ

K 89

И. В. КУЗЬМИН

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕЛЕМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ

Часть I

*ЭЛЕМЕНТЫ СИНТЕЗА СТРУКТУР*

БИБЛИОТЕКА  
 Учебный фонд  
 Инв. № 423739  
 ХВКНУ

ПРОБЕЖИ  
1969

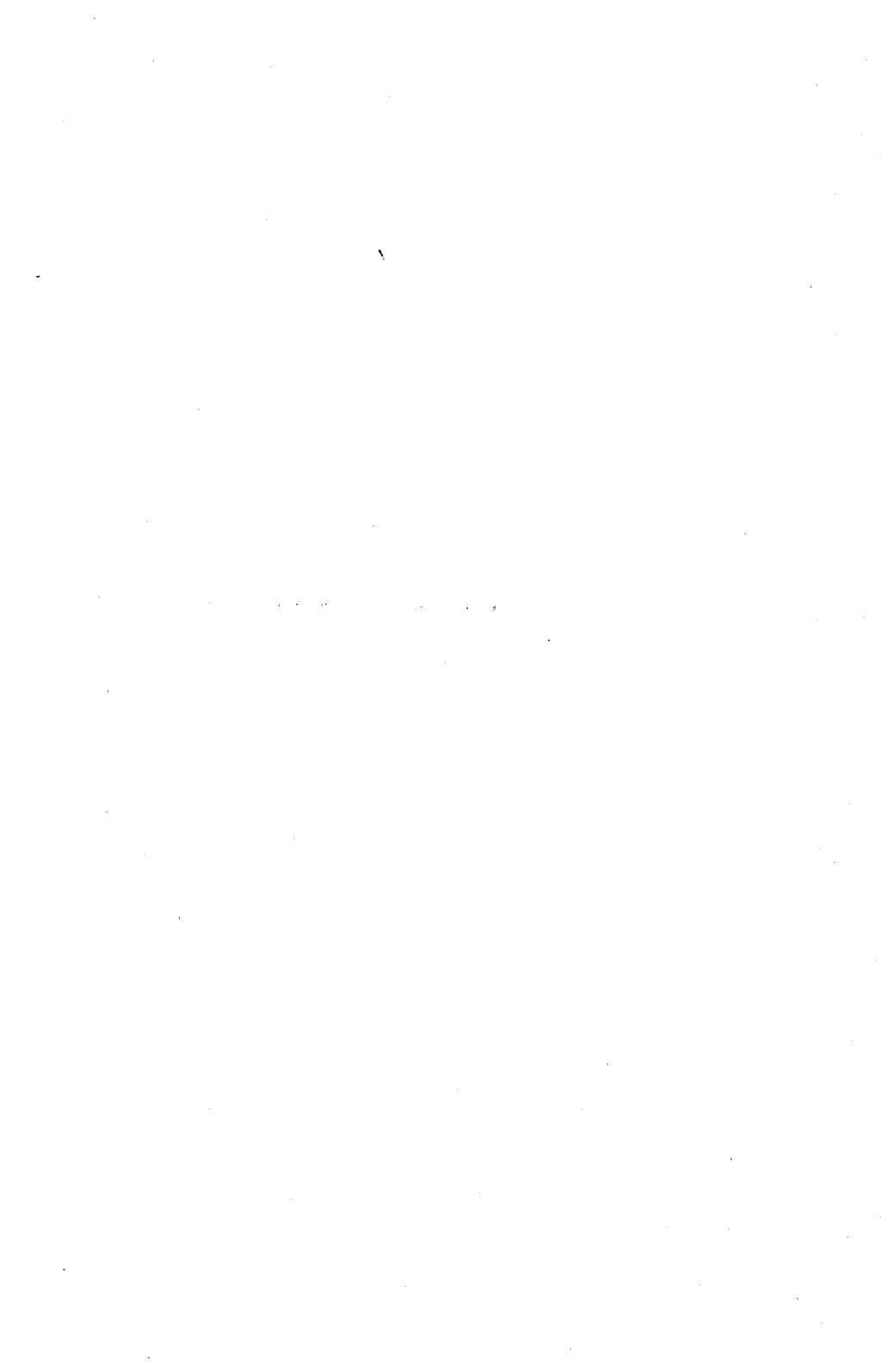
БИБЛИОТЕКА  
 УЧЕБНЫЙ  
 Инв. № 423739

Харьков  
1967

681.52 + 621.398

В первом выпуске пособия описываются основы построения функционально-статистических моделей телемеханических систем контроля и управления, рассматриваются некоторые аспекты теории оптимизации этих систем. Выпуск может служить пособием по курсу „Проектирование телемеханических систем контроля и управления“, а также по проектированию этих систем в ОКБ и НИИ.

*Посвящаю памяти  
Ивана Викторовича  
Лапигина*



## ПРЕДИСЛОВИЕ

Системы «большого масштаба» находят все более и более широкое распространение в гражданской и военной технике. Эти системы отличаются от малых технических систем не только обилием сложных частей и органов, но и более высоким уровнем организации, более сложными функциональными взаимосвязями этих частей и органов [1].

В качестве примеров таких систем можно привести континентальную систему ПВО США, систему управления комплексами ракет «Минитмен», автоматическую систему слепой посадки, автоматические системы управления нефтяными скважинами, предприятиями, гидроузлами и т. п.

Характерными особенностями систем большого масштаба являются:

— определенная целостность по выполнению единой поставленной перед системой задачи с определенной эффективностью;

— большие размеры системы, большая сложность и высокая стоимость; иногда системы настолько сложны, что различные их функциональные подсистемы сами относятся к системам большого масштаба;

— сложность функционирования системы со всевозможными перекрывающимися, перекрещивающимися и обратными связями;

— высокая степень автоматизации, достигаемая применением телемеханических систем, вычислительных машин и всевозможных непрерывных и дискретных автоматов;

— статистическая природа управляющих сигналов и внешних возмущений, а также статистическая природа нагрузки;

— наличие конкурирующих сторон (например, сигналов управления, с одной стороны, организованные и неорганизованные помехи, — с другой).

Проектирование систем большого масштаба можно разделить на выбор алгоритма функционирования, структуры системы в целом и выбор компонентов систем.

Проектирование компонентов ведется с помощью теории электрических машин, теории электрических аппаратов, теории про-

водной связи, радиотехники, технической механики, оптики, атомной техники и т. п. Функционально-структурное проектирование ведется на основе алгебры логики и теории алгоритмов, теории вероятностей и математической статистики, теории вычислительных машин и теории автоматического регулирования, теорий массового обслуживания, игр, линейного и нелинейного программирования, теории моделирования и технической психологии.

В пособии основное внимание уделяется некоторым аспектам функционально-структурного проектирования телемеханических систем контроля и управления сложными объектами.

Предполагается, что проектирование компонентов телемеханической системы контроля и управления, а также компонентов автоматического управления непосредственно сложным объектом, организующих большую систему, будет дано в последующих выпусках пособия.



## ГЛАВА I

# СТРУКТУРА И ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ТЕЛЕМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ

### ВВЕДЕНИЕ

В главе дается классификация телемеханических систем, их состав и описываются возможные структуры. Кроме того, описываются отличительные особенности телемеханических систем от систем дистанционного управления.

#### § 1.1. СОСТАВ ТЕЛЕМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Телемеханика занимается всем комплектом вопросов, связанных с управлением на расстоянии и контролем состояния неподвижных и подвижных объектов, является составной частью техники управления различного рода процессами. Это сближает ее с автоматикой — другой, наиболее развитой частью техники управления. Часто телемеханические системы дополняют системы автоматки, совместно решая общую задачу управления и образуя единую большую систему.

По выполняемым функциям системы телемеханики можно подразделить на следующие [2]:

— *системы телеизмерения (ТИ)*, осуществляющие передачу непрерывного ряда значений измеряемых величин на объекте для наблюдения за этими величинами, их регистрации или для ввода данных в автоматические устройства;

— *системы телесигнализации (ТС)*, передающие различного рода дискретные сообщения о ходе процессов на объекте: сигналы о достижении контролируемыми параметрами предельных значений, о возникновении аварийного состояния, о вводе в действие и выводе из работы технологического оборудования (системы ТИ и ТС называют еще системами телеконтроля);



— системы телеконтроля (ТК), осуществляющие измерение сравнение результатов измерения с допусками на измеряемые величины, принимающие логическое заключение об объекте в простейшем случае типа «годен—негоден», «меньше—норма—больше» и передающие данные контроля всевозможных систем объекта, а также данные контроля хода различного рода простых и сложных процессов;

— системы телеуправления (ТУ), применяющиеся для передачи команд управления объектами: включения и отключения оборудования в определенной последовательности, изменения нагрузки, скорости движения, регулирование подачи жидкости и газов, изменения курсов и т. п.

В зависимости от характера команд, передаваемые сообщения могут быть как непрерывными (например, плавное изменение нагрузки, давления или уровня жидкости), так и дискретными (например, включение и отключение оборудования). Сообщения, передаваемые в системах телеуправления, в месте их приема преобразуются в необходимые первичные воздействия на различные цепи системы автоматизации управляемых объектов или цепи других устройств;

— системы автоматизации (СА), обеспечивающие непосредственное выполнение определенных первичных команд управляемыми машинами, механизмами и исполнительными органами или поддержание заданного режима их работы.

Выполнение команд системы автоматизации осуществляют путем связывания между собой без участия человека нескольких простых процессов в определенной последовательности друг с другом, а также с учетом изменения тех или иных внешних факторов.

В настоящее время все большее применение в системах автоматизации находят различного рода управляющие и вычислительные машины и, в частности, электронные цифровые машины, которые обеспечивают не только точный учет многих и различных факторов, но и выполняют необходимые расчеты и формально логические операции, позволяющие задать всей автоматической системе оптимальный режим работы [3].

Системы телеуправления, телеконтроля и автоматизации являются связанными и взаимно дополняющими друг друга.

## § 1.2. ОСОБЕННОСТИ ТЕЛЕМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Теоретической основой передачи сигналов телеуправления и телеконтроля является также как в связи теория информации, уделяющая основное внимание вопросам преобразования сигналов и ее передачи по линии связи, теория вероятности и надежности, позволяющие вероятностными и статистическими методами производить анализ и синтез систем телеуправления и телеконт-

роля. Однако телемеханические каналы связи отличаются от телефонных и телевизионных каналов связи [4].

Если в системе связи входными и выходными элементами и устройствами являются микрофон, телефон, экран кинескопа и иконоскопа, то в телемеханике соответственно ключи управления, датчики ТИ, указывающие и регистрирующие приборы, исполнительные реле и другие исполнительные органы.

В системе ТУ по каналу связи передается часто большое число элементарных и, сравнительно редко следующих приказов управления типа «ДА»—«НЕТ», предназначенных для различных приемников информации. Это приводит в ряде случаев к специфическим способам осуществления многоканальности и усложнению оконечной аппаратуры.

В устройствах телеизмерения необходимо передавать с малой погрешностью величину измеряемого параметра, включая ее постоянную составляющую. В связи с этим необходимо иметь высокостабильные по коэффициенту передачи первичные и вторичные преобразователи.

В системах телемеханики высокие требования предъявляются к надежности передачи информации в каждый момент времени. Даже кратковременные перерывы в тракте передатчик—приемник информации во многих случаях значительно ухудшает работу системы телемеханики или делают ее неработоспособной. Весьма незначительный процент непрохождений может вызвать передачу ложных приказов и привести к тяжелым последствиям. Также недопустимы существенные запаздывания в передаче информации.

В отличие от этого в телефонной и телеграфной связи перерывы или значительные запаздывания в передаче информации часто считаются нормальным явлением. В результате этого телеграммы передаются подобно эстафете с остановками, а телефонные разговоры представляются в определенное время.

В системах телемеханики отдельные источники и приемники информации соединены с одним или весьма ограниченным числом пунктов управления, т. е. имеет место значительная большая их централизация. Обмен информацией производится между местными объектами и человеком на пункте управления или между автоматами на диспетчерском пульте и управляемыми объектами, в то время, как в связи передача информации производится между людьми на различных пунктах.

Исходя из вышеперечисленных особенностей телемеханических систем, можно сделать вывод, что наибольшее распространение имеют системы, к которым можно предъявить особые требования по надежности и по быстродействию. В последнее время в этих системах вместо элементов с электрическими контактами, электрическими машинами и кинематическими узлами все большее применение находит бесконтактная аппаратура (полупроводниковые и магнитные элементы). В связи с этим более остро ставятся

вопросы о построении рациональных структур и о строении сигналов в системах телемеханики.

Теоретической основой синтеза и анализа телемеханических систем являются теория построения структуры дискретных систем [1.4], которая рассматривает методiku синтеза структур устройств релейного действия при заданной системе сигналов или заданном порядке действия их и решает задачу получения наиболее простых схемных решений для заданных условий работы устройства. Эта теория позволяет решать задачи трех видов:

— задачу синтеза, т. е. получение быстродействующей, надежной и малостоящей структуры дискретного устройства по заданным для нее условиям работы (например, заданной последовательности по времени срабатывания элементов устройства);

— задачу равносильных преобразований, т. е. задачу перехода от одной структуры к другой, более простой или более сложной, при точном сохранении соответствия структуры устройства заданными для нее условиями работы;

— задачу анализа, т. е. определение для уже готовой структуры устройства условий работы ее элементов (например, определение последовательности действия их во времени, выяснение действия устройства при повреждениях и т. п.), оценку надежности, быстродействия и стоимости.

Теория построения сигналов рассматривает методы комбинирования импульсов и импульсных признаков, а также условия перехода одних сигналов в другие и позволяет определить, каким образом можно осуществить передачу заданного числа сигналов в заданное время и с необходимой надежностью.

Таким образом, теория построения сигналов имеет две стороны: качественную и количественную.

При рассмотрении качественной стороны решается вопрос о том, как должны быть построены сигналы при заданном количестве передаваемой информации, заданных физических свойствах импульсов, используемых для построения сигналов и заданных искажениях.

При рассмотрении количественной стороны исследуется вопрос о том, какова вероятность искажения данного сигнала при заданных вероятностях составляющих его элементов, каковы вероятности искажения отдельных элементов при заданных уровнях передачи и помехах в линии связи, а также при аппаратурных искажениях, или каковы вероятности перехода сигналов друг в друга, или, наконец, каковы соотношения между вероятностями искажения сигналов, построенных на различных принципах комбинирования.

Искажения могут возникать как в результате действия естественных и организованных помех или изменения параметров каналов связи, так и в передающей и приемной аппаратуре при аппаратурных повреждениях, недопустимых изменениях параметров

каких-либо элементов или изменениях параметров питающих источников тока.

Необходимо отметить, что теория построения сигналов находится еще в стадии разработки. В разработке качественной теории построения сигналов достигнуты некоторые успехи, однако такие вопросы, как исследование косвенных показателей искажений сигналов и методов построения систем сигналов с их использованием, нахождение оптимумов для различных систем сигналов и т. д. нуждаются в дальнейшем исследовании.

В количественной теории построения телемеханических сигналов достаточно хорошо разработана теория потенциальной помехоустойчивости каналов связи [6]. Слабо разработаны вопросы, связанные с природой реальных (не только функциональных) помех с изучением повреждений отдельных элементов и влиянием аппаратурных искажений в телемеханических системах. Почти совершенно не разработана теория синтеза системы сигналов с заданной помехоустойчивостью.

### § 1.3. ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕХАНИКИ

В качестве примера рассмотрим простейшую телемеханическую систему проверки автомата угловой стабилизации летательного аппарата на функционирование. Принцип действия этой системы заключается в следующем.

Для отклонения рулей в определенную сторону оператор на пульте нажимает кнопку (при автоматизированной системе сигнал на проверку подает автомат). При нажатии кнопки команда (напряжение) определенной величины и определенного знака подается на кодирующее устройство и далее в канал связи. Декодирующее устройство восстанавливает сигнал в аналоговой форме и направляет в соответствующий канал усилителя-преобразователя и далее на управляющие обмотки рулевых машин. Рулевые машины отклоняют рули в соответствии с действием управляющего напряжения, кроме этого, они перемещают в определенном направлении движок потенциометра обратной связи (ПОС).

О стороне и величине отклонения рулей можно судить по отклонению стрелки вольтметра, расположенного на пульте и соединенного посредством телеизмерительного канала с соответствующим ПОС.

В случае полной автоматизации проверок отпадает нужда в операторе. Его функции по подаче команды и наблюдении за результатами ее действия заменит автомат, работающий по определенной программе.

Таким образом, можно указать на следующие основные функции телемеханических систем:

— подача воздействий, извне осуществляемых человеком, или воздействий от каких-либо автоматов или устройств технологического процесса;

— переработка этих воздействий в кодированные сигналы управления в соответствии с назначением телемеханической системы;

— передача переработанных воздействий реагирующим органам объектов;

— выдача объектом ответного сигнала на воздействие, передача каналом связи и преобразование его в необходимую для восприятия человеком или автоматом форму. В соответствии с этим будем называть элементы, выполняющие эти функции, функциональными и разделять их на воспринимающие и кодирующие (рис. 1).

Воспринимающие элементы предназначены для восприятия воздействий извне, преобразования их в соответствующие изменения напряжения или тока и замыкания или размыкания (или изменение параметров) в соответствии с воздействием отдельных цепей телемеханического устройства. Этими элементами являются ручные или автоматические переключатели или ключи, переключаемые от руки человеком или изменяющие свое положение под воздействием машин и механизмов, или реле, реагирующее на изменение параметров каких-либо технологических процессов;

Кодирующее устройство обеспечивает преобразование различной физической природы команд в его входных цепях (первичные сигналы) в соответствующие кодированные сигналы управления, подаваемые на вход канала связи. Кодированные сигналы управления в дальнейшем будем называть сигналами управления.

Сигнал управления — сигнал, содержащий необходимую совокупность признаков, определяющих передачу той или иной команды.

Канал связи обеспечивает передачу различных сигналов пункта на другой пункт системы телеуправления и телеконтроля. В зависимости от вида энергии, передаваемой на расстоянии, и диапазона частот используемых колебаний различают электрические, оптические и акустические каналы связи. В телемеханике используются преимущественно электрические проводные и радиоканалы связи.

В отличие от линий электропередачи, предназначенных для передачи энергии, в каналах связи передается сообщение (информация), т. е. некоторая совокупность сведений, содержащаяся в законе изменения во времени напряжения или тока. Канал связи включает приемное и передающее устройства.

Декодирующее устройство обеспечивает разделение сигналов, предназначенных для воздействия на различные выходные преобразователи и в соответствии с передаваемой командой, обеспечивает необходимое изменение напряжения (тока) в воспринимающих частях этих преобразователей. Иными словами, декоди-

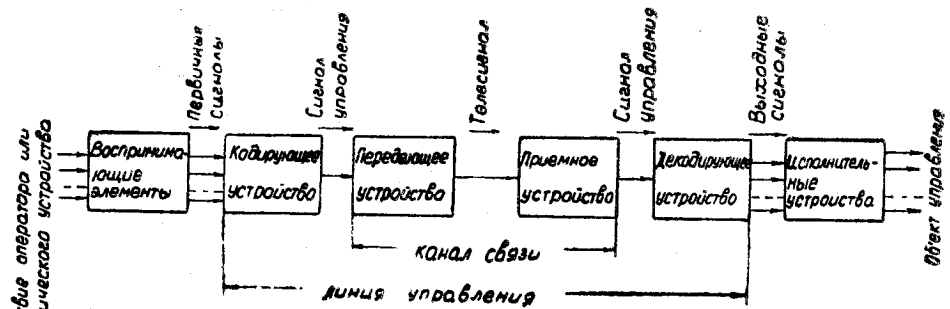


Рис. 1. Элементы ТМ систем.

рующее устройство преобразует сигналы управления в выходные сигналы, воздействующие на исполнительные элементы.

Исполнительные элементы предназначены для управления объектами, на которые устройство должно воздействовать. К ним относятся различного рода электромагниты, воздействующие на органы управления машин, механизмов и других устройств, управляемых устройством телемеханики.

Элементы сигнализации предназначены для индикации различного рода состояний объекта.

Иногда вместо кодирующих устройств, канала связи и декодирующих устройств выделяются промежуточные элементы, предназначенные для переработки и передачи воздействий от воспринимающих элементов к исполнительным. При помощи их фиксируются различного рода кратковременные воздействия, получаемые устройством, устанавливается определенная последовательность работы исполнительных элементов во времени, если она предусмотрена, или обеспечивается работа элементов при определенной последовательности во времени получаемых извне воздействий и т. п. Такие системы называются системами дистанционного управления и контроля (ДУ и ДК).

Иногда функции промежуточных и исполнительных элементов в устройствах ДУ и ДК совмещаются. В этих случаях исполнительные элементы воздействуют непосредственно на управляемые устройства, кроме того, они могут также воздействовать на другие исполнительные или промежуточные элементы.

Помимо функциональных элементов, в телемеханических устройствах имеется ряд других элементов. К основным из них можно отнести:

— питающие элементы (генераторы постоянного и переменного тока, трансформаторы, преобразователи и т. п.), предназначенные для питания различного рода элементов системы телемеханики;

— соединительные элементы (соединительные кабели провода, соединительные контакты, клемники и т. п.), предназначенные для соединения функциональных элементов между собой.

В радиотехнических системах роль соединительных элементов выполняет аппаратура радиоканала.

Ограничивающие элементы (постоянные сопротивления, вентильные элементы, предохранители, фильтры и т. п.) предназначены для различного рода ограничений всевозможных воздействий, автоматической защиты от коротких замыканий и обрывов. Необходимо отметить, что деление телемеханических систем на функциональные элементы позволяет рассматривать их по частям и значительно облегчает их анализ и синтез.

Рассмотренные элементы телемеханических систем составляют системы телеконтроля и телеуправления, а также их комбинаций разомкнутых и замкнутых телемеханических систем.

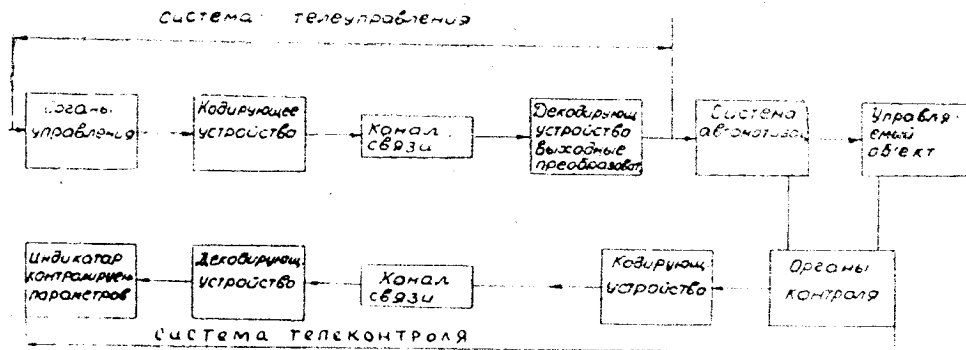


Рис. 2. Блок-схема разомкнутой ТМ системы.

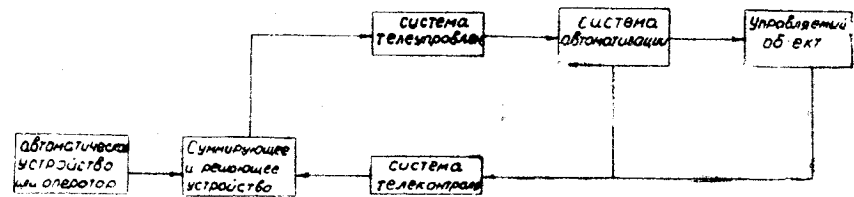


Рис. 3. Блок-схема замкнутой ТМ системы.



В разомкнутых телемеханических системах (рис. 2) нет непосредственного воздействия системы телеконтроля на систему телеуправления.

В замкнутых телемеханических системах (рис. 3) воздействия на систему телеуправления производятся с непосредственным автоматическим учетом реального состояния управляемого объекта. В этом случае специальные суммирующие и решающие устройства, установленные на пункте управления, сопоставляют информацию, передаваемую системой телеконтроля, с внешними воздействиями, выполняют определенные математические и логические операции и в результате вырабатывают необходимое воздействие на систему телеуправления.

Замкнутая телемеханическая система может рассматриваться как замкнутая система регулирования или телерегулирования. Необходимо заметить, что будущее принадлежит, безусловно, системам телерегулирования, поскольку именно они позволяют полностью автоматизировать процессы управления сложными объектами.

#### § 1.4. СТРУКТУРА И ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ТЕЛЕМЕХАНИКИ

Телемеханические системы обслуживают как стационарные (неподвижные), так и подвижные объекты. К стационарным объектам относятся большая часть сооружений на заводах и электростанциях, нефтяных и газовых промыслах, на транспорте и коммунальном хозяйстве, стартовые площадки ракет и др.; к подвижным объектам относятся, прежде всего, самолеты, ракеты, подвижные старты ракет и т. п.

Передающая и приемная аппаратура систем телемеханики может устанавливаться как на неподвижном или подвижном объектах, называемыми управляющими или *диспетчерскими пунктами (ДП)*, так и на неподвижном или подвижном *исполнительном пункте (ИП)*.

В простейшем случае управления и контроля на расстоянии имеются один исполнительный и один диспетчерский пункты, на которых располагается приемная и передающая аппаратура систем телеуправления и телеконтроля.

В этой книге основное внимание будет уделено наиболее широко распространенным системам со стационарными объектами.

Стационарные объекты могут быть как собранные в одном месте, так и разбросанными поодиночке или небольшими группами.

Телемеханическая система, обслуживающая стационарные объекты, собранные в одном пункте, называется системой с *сосредоточенными объектами*.

Телемеханическая система, обслуживающая стационарные объекты, разбросанные поодиночке, называется системой с *рассредоточенными объектами*.

Сосредоточенные объекты типичны, например, для электростанций и подстанций, а также ракетных стартовых площадок: на каждой из них может размещаться значительное число (несколько десятков) объектов контроля и управления, телеконтроль и телеуправление которыми осуществляется операторами с диспетчерского пункта.

Примером систем с *рассредоточенными объектами* могут служить системы телеуправления насосными установками на нефтепромыслах, а также система управления несколькими стартовыми позициями ракет с одного диспетчерского пункта. Здесь каждая из многочисленных установок, находящихся на территории промысла или на территории ракетодома, является отдельным исполнительным пунктом. Телемеханическая система обслуживает большую группу таких исполнительных пунктов.

Для обеспечения централизованного телеуправления и телеконтроля большого числа исполнительных пунктов могут быть применены системы с *раздельными для каждого ИП каналами связи* и системы с *общим для всех ИП каналом связи*. Возможно также и комбинированное использование этих двух способов, когда для разных групп ИП используются разные каналы связи, а ИП одной группы имеют общий канал связи.

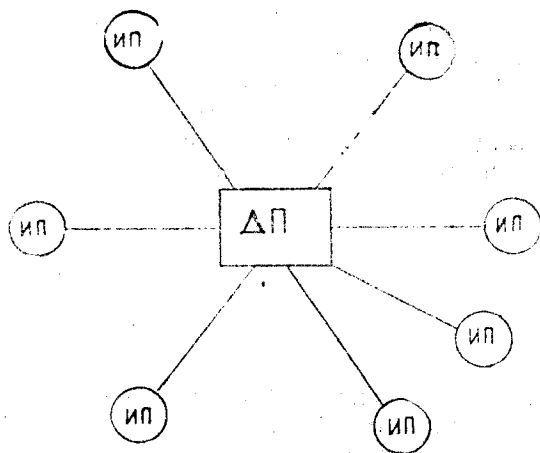
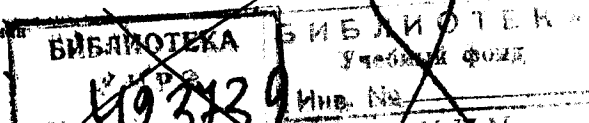


Рис. 4. Система ТМ с раздельными каналами связи.

Раздельные каналы связи для разных ИП используются при радиальном расположении этих ИП относительно ДП (рис. 4).

Передача сообщений данному ИП с ДП в этом случае производится путем посылки сигнала по соответствующему каналу



связи. Приемная аппаратура системы телеуправления на ИП в этом случае получает сигналы, предназначенные для данного ИП. Приемная аппаратура в соответствии с принимаемым сигналом выбирает необходимую цепь и оказывает на нее требуемое воздействие.

Например, если на ИП имеется несколько выключателей, то в соответствии с полученным сигналом приемная аппаратура телеуправления должна обеспечить замыкание одного или нескольких выключателей. Передача информации от ИП на ДП в этом случае также идет по разным каналам связи и поэтому сигналы контроля должны содержать лишь сведения о состоянии того или иного механизма этого ИП, или о значении того или иного контролируемого параметра и не имеют дополнительных отличий, определяющих принадлежность их к данному ИП.

При использовании общего для всех ИП канала связи (рис. 5а) сигналы сообщения, передаваемые с ДП, должны содержать характерные отличия, определяющие ИП, для которого они предназначены, и характер операций, которые должны быть выполнены на этом ИП.

Приемная аппаратура системы телеуправления на ИП должна реагировать на эти характерные отличия, т. е. должна из всех сигналов, передаваемых по каналу связи, отбирать сигналы, предназначенные для данного ИП, и в соответствии с характером принимаемого сигнала обеспечивать выполнение необходимой операции.

Точно также сигнал сообщения, передаваемый с данного ИП, должен содержать характерные отличия, определяющие существо передаваемой информации, и дополнительные отличия, которые позволяют приемной аппаратуре на ДП определить, с какого ИП данная информация передается. Общий проводной канал связи целесообразно использовать при линейном расположении ИП

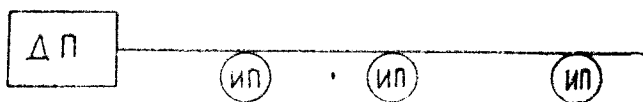


Рис. 5 а. Система ТМ с линейным расположением ИП.

(рис. 5а). Такое расположение ИП имеет место при управлении коммутационной аппаратурой электрических связей, объектами обслуживания газопроводов, нефтепроводов и пр.

Если при отдельных радиоканалах связи для приемника каждого ИП выделяется определенная несущая частота, то при общем радиоканале связи приемники всех ИП настраиваются на одну и ту же несущую (волну).

Таким образом, использование общего для разных ИП канала связи позволяет уменьшить затраты на устройство этого канала, но требует некоторого усложнения приемной и передающей

аппаратуры систем телеуправления и телеконтроля. Однако такое усложнение, как правило, является более рентабельным, чем использование отдельных каналов связи. В некоторых случаях для получения более надежной системы передачи телемеханических сигналов общий канал связи замыкается в кольцо. ДП при этом может быть включено либо непосредственно в кольцо

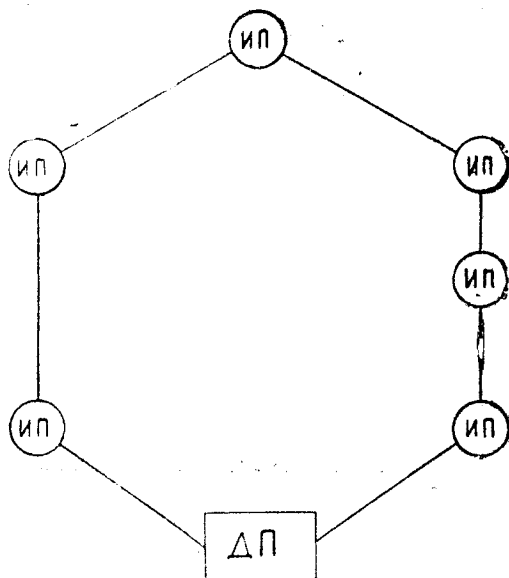


Рис. 5 б. Кольцевая система ТМ с ДП, включенными в кольцо.

(рис. 5б), либо вынесен из кольца и соединен с ним специальными линиями связи (рис. 5в).

Иногда бывает необходимо обеспечить телеуправление и телеконтроль нескольких ИП с разных ДП, причем последние могут быть равноправными и неравноправными (рис. 6), а структура каналов связи может вырождаться в радиальную, кольцевую или смешанную. Может также в структуру включаться центр связи.

Центр связи и избирания (рис. 7), получив сигнал от того или иного ДП, в соответствии с характером этого сигнала производит выбор необходимого ИП и обеспечивает передачу на него сигнала. В роли ИП в этом случае может выступать целая ТМ система с несколькими ИП и ДП, соединенными в какой-нибудь из указанных структур.

Примером подобного центра связи и избирания, иногда называемого центральным командным пунктом (ЦДП), является центральная автоматическая телефонная станция (ЦАТС), которая, кроме телефонного разговора двух абонентов, может быть ис-

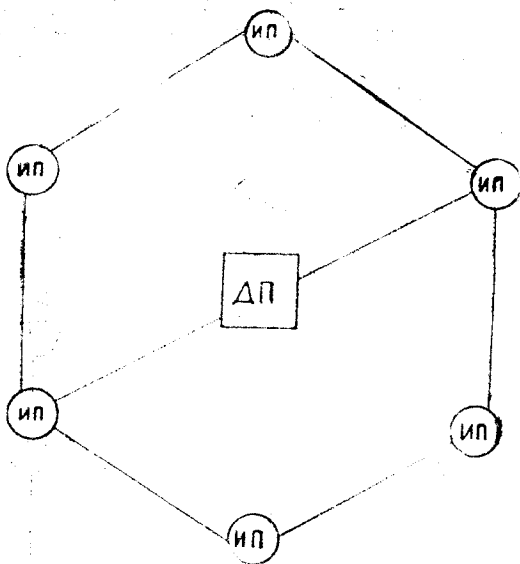


Рис. 5 в. Кольцевая система ТМ, с ДП включенным специальными линиями.

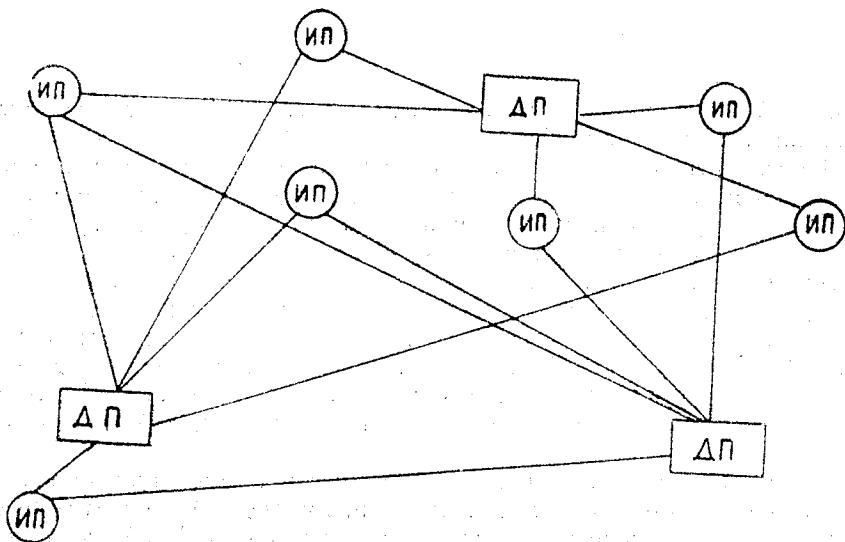


Рис. 6. Система ТМ с несколькими ДП и ИП.

пользована для передачи других сообщений и, в частности, для передачи сигналов управления и контроля. Структура соединения

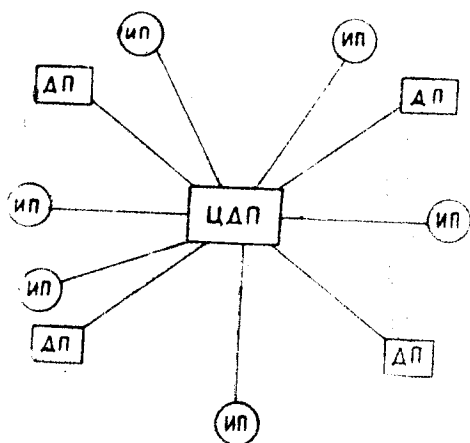


Рис. 7. Система ТМ и ЦДП.

каналов связи при этом может быть также радиальной, кольцевой и другой более простой или сложной.

#### § 1.5. ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ОТ ТЕЛЕМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Кроме телемеханических систем, управление и контроль на расстоянии можно осуществлять также с помощью систем дистанционного управления и контроля.

Отличительной особенностью систем дистанционного управления и контроля является отсутствие кодирующих и декодирующих устройств, а также то, что, как правило, число каналов связи в них равно, а иногда и превышает число входных цепей систем автоматизации или число индикаторов контролируемого параметра.

В системах ДУ и ДК (рис. 8 и 9) используются лишь проводные каналы связи, ибо радиоканалы связи требуют неперемного кодирования сигналов ввиду значительного уровня и многообразия помех, действующих на входе радиоприемного устройства.

На рис. 10 приведена простейшая система ДУ, обеспечивающая подключение питания к цепям I, II, III при замыкании соответственно контактов  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$  органов управления. В системе используются три канала связи.

Так как в системах ДУ и ДК необходимо иметь, как правило, большее число каналов связи, чем в системах ТУ, ТК, то ДУ и ДК используются лишь при малых (порядка нескольких десятков

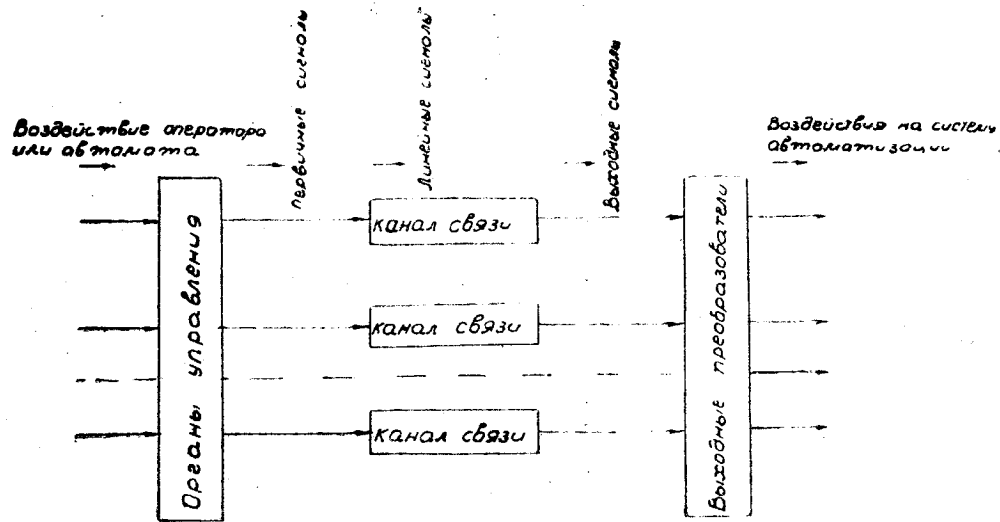


Рис. 8. Система ДУ.

и сотен метров) расстояниях между управляемым или контролируемым объектом и пунктом управления и контроля.

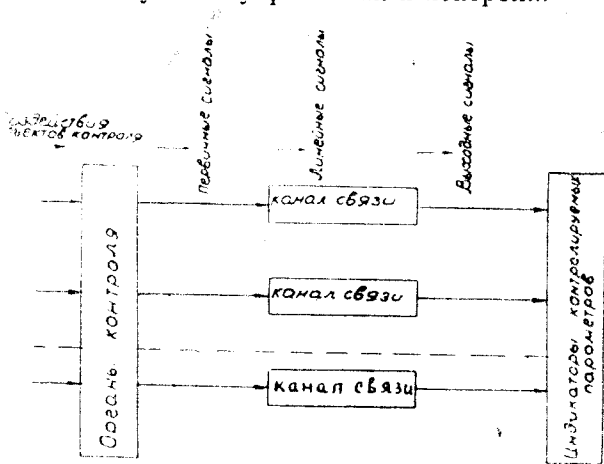


Рис. 9. Система ДК.

С увеличением расстояния управления и контроля стоимость дополнительных каналов связи превосходит стоимость оборудо-

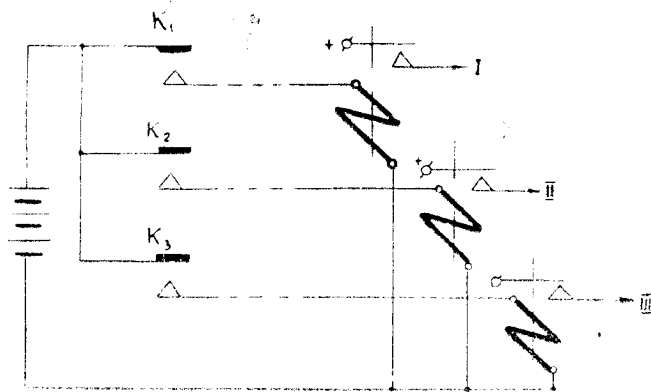


Рис. 10. Схема включения источников питания.

вания (аппаратуры), необходимого для кодирования и декодирования сигналов, и потому применение систем ДУ и ДК становится нерентабельным.



## ГЛАВА II

# ОСНОВЫ ТЕОРИИ ОРИЕНТИРОВАННЫХ И ЛОГИКО- ВЕРОЯТНОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ ТЕЛЕМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

### ВВЕДЕНИЕ

Для сравнительной оценки различных структур телемеханических систем контроля и управления удобно применить математическую модель, основанную на ориентированных логико-вероятностных графах. Этот аппарат позволяет описывать сложные структуры с большим числом взаимозависимых и независимых переменных с учетом их детерминированных логических и вероятностных свойств, а также оценивать ошибки и выполнять оптимизацию процессов телемеханического контроля и управления.

Ориентированный логико-вероятностный граф — есть диаграмма прохождения сигналов, в которой направление прохождения сигналов обозначается дугами, а промежуточный и итоговый результат обработки сигналов — вершинами. Кроме того, как дуги, так и вершины в статистическом смысле являются случайными событиями.

Ориентированный логико-вероятностный граф является дальнейшим развитием представления диаграммы прохождения сигналов в виде блок-схем.

В главе изложены основные методы составления и преобразования логико-вероятностных графов.

### § 2.1. ДЕТЕРМИНИСТСКИЕ ОСНОВЫ ОРИЕНТИРОВАННЫХ И ЛОГИЧЕСКИХ ГРАФОВ

При построении ориентированного графа некоторые переменные  $x$  и  $y$ , например уравнения [7]

$$y = ax, \quad (2.1.1)$$

представляются вершинами графа, а соотношение между этими переменными — в виде дуги (рис. 11).

В этом графе дуга направлена от вершины  $x$  к вершине  $y$  и показывает визуально, что она увеличивает в  $a$  раз вершину  $x$  при передаче в вершину  $y$ . При этом за вес вершины  $y$  принимают величину сигнала  $ax$ , переданного к ней по дуге.

Различают исходные и целевые вершины. Вершина, из которой дуга исходит, называется *исходной*, а вершина, в которую дуга направляется, называется *целевой*.



Рис. 11. Простейший граф.

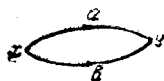


Рис. 12. Граф параллельного соединения.

Дуги могут быть классифицированы как *параллельные*, *последовательные* и *петлевые*.

Параллельные дуги исходят из одной и той же вершины и заканчиваются в одной и той же целевой вершине (рис. 12). Дуга  $x, a, y$  умножает  $x$  на  $a$  и передает результат  $ax$  в вершину  $y$ . Дуга  $x, b, y$  умножает  $x$  на  $b$  и передает результат  $bx$  в вершину  $y$ .

Вес целевой вершины  $y$  является алгебраической суммой двух сигналов  $ax$  и  $bx$ :

$$y = ax + bx = (a + b)x. \quad (2.1.2)$$

Таким образом, граф (рис. 12) можно представить в виде графа, изображенного на рис. 13.

Следовательно, две (или больше) параллельные дуги эквивалентны одной с весом, равным сумме весов параллельных дуг.

Последовательными дугами называются дуги, образующие граф (рис. 14з) в котором исходная вершина одной и, дуга является целевой вершиной другой, при этом граф представляет уравнения

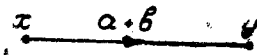


Рис. 13. Эквивалентный граф параллельному соединению.

$$y = ax; \quad (2.1.3)$$

$$z = by.$$

При исключении из них  $y$  получается уравнение

$$z = abx, \quad (2.1.4)$$

представляемое графом (рис. 15).

Таким образом, дуга умножает вес своей исходной вершины на вес дуги и передает результирующее произведение в свою целевую вершину.



Рис. 14. Граф последовательного соединения.

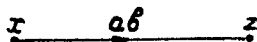


Рис. 15. Эквивалентный граф последовательного соединения.

Следовательно, две (или больше) последовательные дуги эквивалентны одной дуге с весом, равным произведению весов последовательных дуг.

Петлевая дуга или петля берет начало и заканчивается в одной и той же вершине (рис. 16).

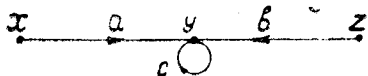


Рис. 16. Граф петли.

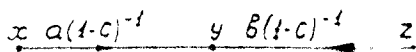


Рис. 17. Эквивалентный граф петли.

Этот граф представляет уравнение

$$y = cy + ax + bz, \quad (2.1.5)$$

или


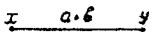
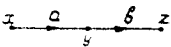
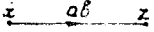
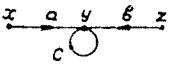
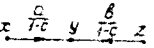
$$y = \frac{ax + bz}{1 - c}. \quad (2.1.6)$$

Уравнение (2.1.6) можно представить в виде графа (рис. 17).

Таким образом, при наличии петли на вершине вес вершины умножается на  $(1-c)^{-1}$ , а каждая дуга, приходящая в такую вершину, при исключении петли умножается на  $(1-c)^{-1}$ .

Основные преобразования, применяемые в трех классах дуг, приведены в таблице 1.

Все это позволяет проводить сокращение числа вершин в сложном ориентированном графе без нарушения математической строгости графа.

Первоначальный граф	Преобразование	Преобразованный граф
	Сложение параллельных дуг	
	Умножение последовательных дуг	
	Исключение петли	

## Система уравнений

$$aw = x;$$

$$bx = y;$$

$$cy = z$$

(2.1.7)

представляется графом (рис. 18), который последовательным исключением дуг  $w, a, x; x, b, y; y, c, z$  может быть сведен к графу (рис. 19).

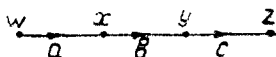


Рис. 18. Последовательное соединение трех дуг.

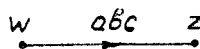


Рис. 19. Эквивалентный граф последовательного соединения.

Таким образом, из всякого сложного графа можно исключить целые последовательности вершин при предварительном исключении их петель, если они имеются. Веса дуг, образующих в графе непрерывные пути прохождения сигнала, в дугах сокращенного графа представляются в виде произведений.

Пути прохождения сигнала берут начало в исходной вершине, образуют непрерывный путь одинаково направленных дуг и кончаются в целевой вершине без прохождения более одного раза через любую вершину.

Например, для графа (рис. 20) можно проследить следующие пути:

$$u, a, c, d, f, g;$$

$$v, b, v;$$

$w, d, e, w;$

$z, i, d, f, g, z;$

$y, g, h, y.$

Вес пути есть произведение весов его дуг. Различаются два типа путей. Путь, исходная вершина которого отличается от целевой, — незамкнутый путь или просто путь. Путь, целевая вершина которого является в то же время исходной, — замкнутый путь или контур. В графе (рис. 20) первый из указанных путей является путем, остальные — контуры.

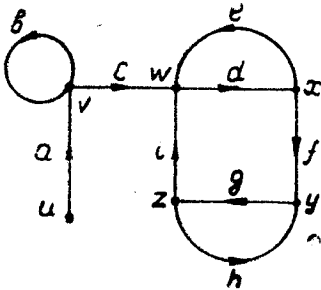


Рис. 20. Сложный граф.

Если в каждом контуре по крайней мере не исключается одна вершина, то промежуточные вершины, через которые проходят пути, могут быть исключены в один этап.

Инверсия пути — это операция реверса направления пути таким образом, что его целевая вершина и исходная вершина взаимно изменяют свою функцию на обратную, а функциональная зависимость, обозначающая путь, инвертируется. Например, инверсия дуги  $x, a, y$  графа (рис. 21 а) изменяет ее в дугу  $y, 1/a, x$  в графе (рис. 21 б).

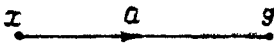


Рис. 21 а. Простейший граф.



Рис. 21 б. Инверсия простейшего графа.

При инвертировании пути дуг различают три типа вершин: — собирательную, являющуюся для нескольких дуг целевой и только для одной исходной (рис. 22);

— распределительную, являющуюся целевой для одной дуги и исходной — для нескольких дуг (рис. 23);

— обыкновенную, являющуюся исходной и целевой для числа дуг больше одной (рис. 24).

Обыкновенная вершина с помощью операции расщепления вершин представлена собирательной и распределительной вершиной, соединенными между собой дугой с весом, равным единице (рис. 25).

Любая дуга, не входящая в путь прохождения сигнала, но подводящая сигнал к вершине или отводящая сигнал от вершины на пути прохождения сигнала, является присоединенной дугой.

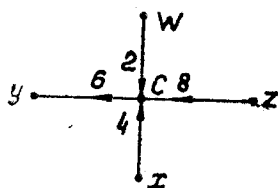


Рис. 22. Граф с собирательной вершиной.

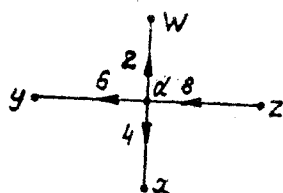


Рис. 23. Граф с распределительной вершиной.

Присоединенные дуги, собирающие сигналы к вершине, называются собирательными дугами. Присоединенные дуги, отводящие сигнал от вершины, называются распределительными дугами.

При инвертировании пути через собирательную вершину (рис. 22) дуги пути должны быть инвертированы, а знак собирательных дуг должен быть изменен на обратный (рис. 26).

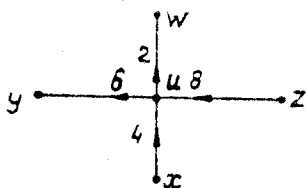


Рис. 24. Граф с обыкновенной вершиной.

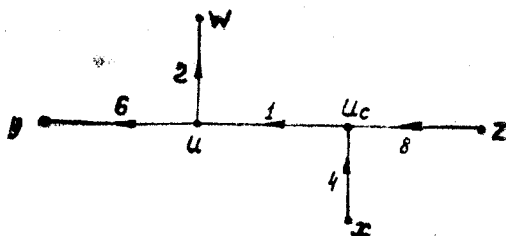


Рис. 25. Граф с расщепленными вершинами.

Для сравнительной оценки весов собирательных вершин  $c$  и  $c'$  вначале определим вес вершины до инвертирования

$$c = 8z + 2w + 4x, \quad (2.1.8)$$

откуда

$$z = \frac{1}{8} (c - 2w + 4x). \quad (2.1.9)$$

Из графа с инвертированным путем

$$z = \frac{1}{8} c'. \quad (2.1.10)$$

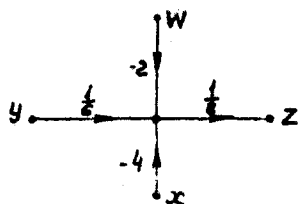


Рис. 26. Инвертированный граф с собирательной вершиной.

Сравнение уравнений (2.1.9) и (2.1.10) показывает, что

$$c' = c - 2w - 4x. \quad (2.1.11)$$

Инверсия пути через распределительную вершину (рис. 23) осуществляется простым инвертированием дуг пути (рис. 27). Так как распределительные дуги  $d, 2, w$  и  $d, 4, x$  ничего не добавляют к сигналу, проходящему по пути, то знаки распределительных дуг не должны изменяться при инвертировании пути.

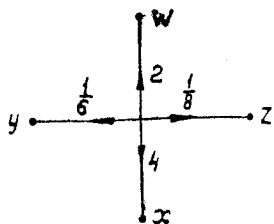


Рис. 27. Инвертированный граф с распределительной вершиной.

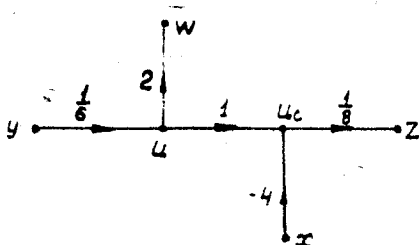


Рис. 28. Расщепление обыкновенной вершины графа.

Инверсия пути через обыкновенную вершину (рис. 24) может быть осуществлена изложенными выше методами после предварительного расщепления вершины (рис. 25 и 28).

Путь через вершину, не имеющую присоединенных дуг (рис. 29), может быть инвертирован в путь графа (рис. 30).

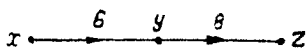


Рис. 29. Путь через вершину без присоединительных дуг.

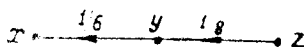


Рис. 30. Инвертированный путь.

Таким образом, при инвертировании пути прохождения сигнала необходимо:

- растянуть все обыкновенные вершины и инвертировать все дуги в пути прохождения сигнала;
- изменить знак всех собирательных дуг, собирающих сигналы в вершинах пути;
- оценить изменение в весе всех собирательных вершин пути прохождения сигнала.

В общем случае линейный ориентированный граф прохождения сигнала с  $n$  целыми вершинами представляет сумму  $n$  линейных алгебраических уравнений

$$\sum_{i=1}^n a_{ij} x_i + y_j = x, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (2.1.22)$$

методика решений которых изложена в работе [7].

Для анализа и синтеза структур телемеханических систем управления рассмотрим простейший частный случай теории направленных графов, когда любая вершина графа превращается в узел с весом, равным единице, а любая дуга графа может принимать значение 0 или 1, что соответствует ложному или истинному высказыванию математической логики, ложности или истинности значений логических переменных алгебры логики. Истинность и ложность логических переменных в телемеханических релейных системах моделируется замкнутым или разомкнутым состоянием цепей, замкнутым или разомкнутым состоянием реагирующих органов релейных элементов.

При подобном подходе ориентированные графы систем телемеханического контроля и управления преобразуются в логические графы, анализ и синтез которых ведется на основе алгебры логики.

В таблице 2 приведены формулы перехода от ориентированных графов к логическим. Более подробное и детальное обоснование переходов изложено в работе профессора Ю. А. Гоги-на [8].

Таблица 2

Ориентированный граф	Логический граф
Любая вершина с весом $c$	Узел с весом $c = \begin{cases} 1, \\ 0. \end{cases}$
Дуга с весом $a$	Дуга с весом $a = \begin{cases} 1, \\ 0. \end{cases}$
Алгебраическая сумма дуг с весом $a+b$	Логическая операция сложения „ИЛИ“ $a+b$ . Дизъюнкция логических переменных $a, b$ .
Алгебраическое произведение $ab$	Логическая операция умножения $ab$ . Конъюнкция логических переменных $a, b$ .

## § 2.2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНЫХ ГРАФОВ

Оценка эффективности и оптимизации логических графов структур телемеханических систем контроля и управления выполняется на основе статистической теории и, в частности, теорий вероятности, надежности и информации.

Переход к логико-вероятностным графам можно осуществить путем непосредственного построения графов методом перебора гипотез с использованием законов теории вероятностей [7] или путем перехода от логических формул, описывающих состояние графов, к вероятностным с использованием вероятностной логики [9].

Основными положениями перехода по первому способу являются следующие.



При статистическом подходе логические переменные  $a$  и  $\bar{a}$  означают случайные события появления  $a$  и не появления  $a$  соответственно. Формула  $ab$  означает одновременное (совместное) появление случайных событий  $a$  и  $b$ ;  $a \vee \bar{b}$  — или

К основным законам теории вероятностей следует отнести:  
 — вероятность совместного появления случайного события  $a$  и противоположного события  $\bar{a}$ , равную нулю:

$$p(a, \bar{a}) = 0. \quad (2.2.1)$$

— вероятность появления события  $a$ , состоящего в появлении хотя бы одного события из  $n$  несовместных событий  $b_1, b_2, \dots, b_n$ , равную сумме вероятностей событий  $b_1, b_2, \dots, b_n$ :

$$p(a) = \sum_{i=1}^n p(b_i), \quad (2.2.2)$$

где

$$p(b_i, b_j) = 0 \text{ при } i \neq j;$$

$$\sum_{i=1}^n p(b_i) = 1,$$

если  $n$  — число полной группы событий.

### Вероятность событий $a, b, c$

Условная вероятность  $p(b/a)$  события  $b$  при условии, что произошло событие  $a$ , можно представить графом (рис. 31).

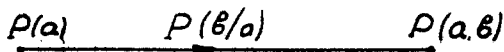


Рис. 31. Граф условной вероятности совместного появления двух событий.

Тогда условные вероятности совместного появления нескольких событий представляются графом (рис. 32).

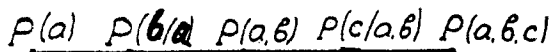


Рис. 32. Граф условной вероятности совместного появления трех событий.

В случае статистической независимости событий  $a, b, c$

$$p(b/a) = p(b); \quad (2.2.3)$$

$$p(c/a, b) = p(c).$$

Граф, представленный на рис. 32, упрощается до графа (рис. 33).

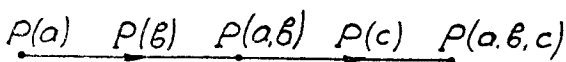


Рис. 33. Граф условной вероятности совместного появления независимых событий.

### Вероятность события $a + b + c$

В соответствии с формулой (2.2 2) вероятность того, что произойдет, по крайней мере, одно из событий  $a$  или  $b$ , равна

$$p(a + b) = p(a) + p(\bar{a}, b). \quad (2.2.4)$$

Формула (2.2.4) представляется графом (рис. 34).

Вероятность событий  $a + b + c$  представлена графом, показанным на рис. 35.

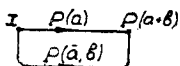


Рис. 34. Граф вероятности суммы двух событий.

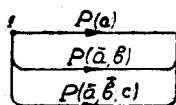


Рис. 35. Граф вероятности суммы трех событий.

Если события  $a, b, c$  взаимно независимы, то граф (рис. 35) упрощается до графа (рис. 36).

Использование условных вероятностей для вычисления вероятностей  $p(\bar{a})$ ,  $p(\bar{a}, b)$  и  $p(\bar{a}, \bar{b}, c)$  изменяет граф (рис. 35) в граф (рис. 37).

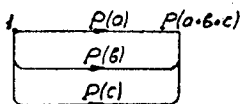


Рис. 36. Граф вероятности суммы трех независимых событий.

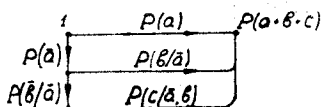


Рис. 37. Граф условных вероятностей суммы трех событий.

Используя указанные комбинации вероятностей, можно практически решить любую задачу по оценке вероятности выполнения задачи системой. Однако иногда более удобным способом оценки вероятности выполнения задачи системой может оказать-

ся способ перехода от логической формулы, описывающей граф, к вероятностной формуле.

Характерной особенностью ТМ систем является наличие квантования по времени и по уровню. Кроме того, в ТМ элементах как входные сигналы, так и выходные имеют всего лишь два значения 0 и 1 и называются двоичными переменными. В связи с этим для анализа и синтеза ТМ систем может быть применена алгебра логики и вероятностная логика.

Как для непрерывных систем, математические соотношения, связывающие входные и выходные переменные ТМ схемы, называются оператором. Оператор определяет функциональные свойства схемы и может быть задан при  $n$  входных и  $m$  выходных логических переменных в виде некоторой логической функции

$$F_j(z_1, \dots, z_n),$$

где  $j = 1, 2, \dots, m$ .

$z$  — логическая переменная.

В одноктактных ТМ системах в один и тот же такт работы набор значений  $m$  выходных переменных полностью определяется заданием набора  $n$  входных переменных.

В многотактных ТМ системах набор значений выходных переменных  $m$  в данный такт не определяется набором значений входных переменных  $n$ , а зависит также от сигналов, поступающих по цепи обратной связи.

Оператор бесповторной системы с  $n$  входами может иметь  $2^n$  различных независимых состояний, каждое из которых может быть описано конъюнкцией всех  $n$  переменных в виде  $z_1^{\sigma_1}, \dots, z_n^{\sigma_n}$ , где  $\sigma_i = 0$  или 1, при этом  $z^0 = \bar{z}$ ,  $z^1 = z$ .

Дизъюнкция состояний ТМ системы, при которых она выполнит задачу хотя бы одним из возможных способов

$$F(z) = \bigvee_1 z_1^{\sigma_1}, \dots, z_n^{\sigma_n}. \quad (2.2.5)$$

Дизъюнкция состояний ТМ системы, при которых она не выполнит задачу,

$$\bar{F}(z) = \bigvee_0 z_1^{\sigma_1}, \dots, z_n^{\sigma_n}. \quad (2.2.6)$$

Следовательно,

$$F(z) + \bar{F}(z) = 1.$$

При известных вероятностях логических переменных статистический анализ ТМ систем позволяет выявить общие и усредненные свойства цепей.

Так как взятие элементарных выборов является независимым событием, то вероятность выполнения задачи схемой в соответствии с формулой (2.2.5) равны

$$P(t, \tau) = p_1^{\sigma_1}(t, \tau) \dots p_n^{\sigma_n}(t, \tau), \quad (2.2.7)$$

где

$$p_i^{\sigma_i}(t, \tau) = \begin{cases} p_i(t, \tau) & \text{при } \sigma_i = 1; \\ \bar{p}_i(t, \tau) = 1 - p_i(t, \tau) & \text{при } \sigma_i = 0. \end{cases} \quad (2.2.8)$$

Различные возможные способы выполнения задачи системой независимы и несовместны, поэтому вероятность выполнения задачи схемой хотя бы одним способом

$$p(t, \tau) = \sum_{(1)} p_1^{e_1}(t, \tau) \dots p_n^{e_n}(t, \tau). \quad (2.2.9)$$

Вероятность невыполнения задачи схемой

$$\bar{P}(t, \tau) = \sum_{(0)} p_1^{e_1}(t, \tau) \dots p_n^{e_n}(t, \tau). \quad (2.2.10)$$

Очевидно, что

$$P(t, \tau) + \bar{P}(t, \tau) = 1.$$

Однако для сложных логических функций  $F(z)$  при большом числе логических переменных построение совершенной дизъюнктивно-конъюнктивной нормальной формы представляет известные трудности. В этих случаях значительное упрощение можно получить применением вероятностной логики, позволяющей непосредственно по любой логической функции  $F(z)$ , представленной в виде конъюнкции, определить вероятность  $P$  и  $\bar{P}$  [9].

**Пример.** Пусть имеется логическая функция

$$F(z) = z_1 \vee z_2 z_3.$$

Применяя закон инверсии, представляем логическую функцию в виде

$$F(z) = \overline{\overline{z_1} \cdot \overline{z_2 z_3}}.$$

Для определения вероятности  $P$  заменяем в формуле логические переменные на их вероятности соответственно

$$z_1 \rightarrow p_1;$$

$$\bar{z}_1 \rightarrow 1 - p_1.$$

Получим окончательно

$$\begin{aligned} P(t, \tau) &= \overline{\overline{p_1(t, \tau)} p_2(t, \tau) p_3(t, \tau)} = \\ &= 1 - [1 - p_1(t, \tau)] [1 - p_2(t, \tau) p_3(t, \tau)]; \\ \bar{P}(t, \tau) &= 1 - P(t, \tau). \end{aligned}$$

Следовательно, вероятностная логика позволяет одним и тем же выражением описывать как алгоритм, реализуемый ТМ системой, так и вероятностные характеристики реализации этого алгоритма.

## § 2.3. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ОБ ОЦЕНКЕ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ ТЕЛЕМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Повышение надежности работы ТМ системы неразрывно связано с повышением ее помехозащищенности. ТМ система может поражаться как естественными помехами (уход параметров в аппаратуре из-за старения, всевозможные виды отказов при эксплуатации и изменении условий эксплуатации, отказы, обусловленные действием грозových разрядов, магнитных полей и так далее), так и искусственными помехами, которые могут появляться непреднамеренно (при вспашке полей, копке траншей и т. д.) и преднамеренно при действии диверсантов. Все эти помехи могут привести либо к непредусмотренным алгоритмом включения аппаратуры, либо к срыву предусмотренных включений отдельных систем или объектов.

Помехозащищенность структур ТМ систем определяется в основном следующими факторами:

- протяженностью линий связи: чем длиннее линия связи, тем большая вероятность поражения ее помехами;
- механической защищенностью линий связи и аппаратурных сооружений и охраной;
- постановкой всевозможных блокировочных устройств, исключающих поражение ТМ системы при возникновении коротких замыканий и обрывов, при всевозможных непредусмотренных алгоритмом работы подключениях в линию;
- организацией надежной работы операторов, высокой степенью автоматизации;
- выбором структуры с устройствами, позволяющими периодически или случайно изменять коды, если даже они выбраны из условия высокой помехозащищенности.

Некоторые аспекты построения помехозащищенных структур ТМ систем будут изложены в дальнейшем.

Вопросы механической защиты и охраны ТМ систем в настоящем пособии не рассматриваются.

### ГЛАВА III

## ОСНОВЫ ТЕОРИИ СТОИМОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ ТЕЛЕМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

### ВВЕДЕНИЕ

Естественным стремлением разработчиков ТМ систем является стремление сделать систему надежной в условиях воздействия всевозможных возмущений при минимальных затратах на разработку и производство системы, а также на ее обслуживание. Минимальных затрат возможно достичь только тогда, когда на каждом этапе проектирования производится стоимостная оценка принятых технических решений. Стоимостная оценка элементов и ТМ системы в целом не противоречит основным интересам экономии. Кроме того, она позволяет достаточно просто получать оптимальные системы относительно надежности и стоимости.

Выбор той или иной структуры ТМ системы сильно влияет на стоимость этой системы.

Стоимость ТМ системы определяется:

- стоимостью проектирования и производства системы;
- стоимостью обслуживания системы.

Стоимость проектирования и производства системы в первом приближении удобно считать равной стоимости аппаратуры, определяемой заводами-изготовителями.

Составляющими этой стоимости являются:

- стоимость линии связи;
- стоимость аппаратуры ДП;
- стоимость аппаратуры ИП.

Стоимость обслуживания по признаку принадлежности аппаратуры можно разделить аналогичным образом, т. е.

- на стоимость обслуживания линии связи;
- на стоимость обслуживания аппаратуры ДП;
- на стоимость обслуживания аппаратуры ИП.

### § 3.1. ОЦЕНКА СТОИМОСТИ ЛИНИЙ СВЯЗИ ПРИ РАДИАЛЬНОЙ И КВАЗИРАДИАЛЬНОЙ СТРУКТУРЕ ТЕЛЕМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В ТМ системах часто самым дорогостоящим элементом являются линии связи. Стоимость линий связи\* зачастую соизмерима со стоимостью аппаратуры ТМ системы, поэтому иногда выгодно усложнять аппаратуру за счет уменьшения стоимости линии связи.

В качестве линий связи в ТМ системах могут использоваться:

- надземная и подземная радиосвязь;
- проводные линии;
- кабели связи;
- всевозможные другие виды (световая, звуковая, сейсмическая и т. д.).

С точки зрения техники связи кабельная линия является наиболее помехоустойчивой и экономичной по затратам энергии на передачу единицы информации, поэтому в дальнейшем основное внимание будет уделено структурам ТМ систем с кабельными линиями связи.

Для обеспечения надежной работы ТМ системы могут быть применены три вида кабелей:

- кабели управления, предназначенные для передачи команд управления;
- технологические кабели, предназначенные для передачи сигналов контроля состояния всевозможных систем на ИП;
- кабели электрических силовых сетей, предназначенные для энергоснабжения элементов ТМ системы.

Минимальная или оптимальная стоимость линий связи определяется в основном минимальной или оптимальной длиной линий связи соответственно. Кроме того, надежность линий связи пропорциональна ее длине. От надежности линий связи в сильной степени зависит надежность ТМ системы в целом, так как удельный вес повреждений линий связи составляет иногда 30 ÷ 70 % от общего числа повреждений.

На практике необходимо учитывать стоимость кабеля, прокладываемого в различных породах грунта, стоимость открытия траншей и т. д.

Иногда может оказаться выгоднее увеличить длину кабеля, чем прокладывать его через труднопроходимый участок. Поэтому целесообразно ставить задачу на определение минимальных суммарных затрат на постройку линий связи и определение оптимальной длины линий связи.

Суммарная длина линий связи зависит также от расположения ДП и ЦДП.

Задача определения минимальной длины линии связи ТМ системы квазирадиальной структуры при заданном расположении ИП

\* Например, по данным США [10] стоимость 1 км кабеля связи для системы управления ракетой „Минитмен“ составляет 12 — 15 тыс. долларов.

на местности подобна задаче о связи множества точек кратчайшей сетью прямых таким образом, чтобы получить наименьшую суммарную длину сети [11]. Применение метода „кратчайших связывающих сетей“ позволит определить направления прокладки линий связи между объектами при минимальной длине линий связи.

В основу методики полагаются два принципа.

Первый принцип. Всякая изолированная точка соединяется с ближайшей соседней.

Второй принцип. Всякий изолированный фрагмент, включающий подмножество точек, связанных прямыми, каждая из которых соединяет точки этого подмножества, соединяется с ближайшим соседом кратчайшей прямой.

Для определения минимальной длины линий связи обычно используется метод, основанный на том, что первый принцип используется только один раз для получения первого фрагмента. Затем, применяя второй принцип, можно расширить первый фрагмент до завершения построения сети.

Так как каждое применение первого или второго принципов уменьшает суммарное число изолированных точек и фрагментов на единицу, то очевидно, что  $N$  — точечная сеть связывается в результате использования  $N - 1$  применений этих принципов.

В работе [12] доказаны необходимые и достаточные условия указанных принципов построения.

Если множество точек нанесено так, что расстояния между ними выдержаны в масштабе, то построение кратчайшей связывающей сети может быть выполнено графически по методике:

*Первый шаг.* Строится первый фрагмент с применением первого принципа.

*Второй шаг.* Первый фрагмент расширяется по второму принципу. В дальнейшем с применением второго принципа строится кратчайшая связывающая сеть.

В общем случае для радиальной и квазирадальной структуры длина кратчайшей линий связи между  $(i, j)$  объектами может быть определена по формуле

$$l_{i,j} = l_c + l_b + l_{ск} + \dots + l_n.$$

где  $l_c$  — длина кабеля, проходящего через сухой грунт;

$l_b$  — длина кабеля, проходящего через болотистый грунт;

$l_{ск}$  — длина кабеля, проходящего через скальные породы;

$l_n$  — длина кабеля, проходящего через любой другой грунт  
и т. д.

Стоимость линий связи между  $(i, j)$  объектами

$$W(i, j) = l_c(c_c + c_{тс} + \dots) + l_b(c_b + c_{тб} + \dots) + \\ + l_{ск}(c_{ск} + c_{тск} + \dots) + l_n(c_n + c_{тн} + \dots),$$



где  $c_6$  — стоимость 1 км кабеля для прокладки в болотистом грунте;

$c_c$  — стоимость 1 км кабеля для прокладки в сухом грунте;

$c_{ст}$  — стоимость отрытия 1 км траншеи в сухом грунте;

$c_{тб}$  — стоимость отрытия 1 км траншеи в болотистом грунте;

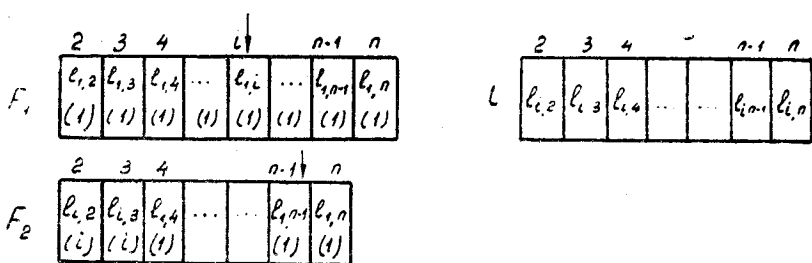
$c_{тск}$  — стоимость отрытия 1 км траншеи в скальных породах;

$c_{ск}$  — стоимость 1 км кабеля для прокладки в скальной породе;

$c_{п}$  и  $c_{тп}$  — соответствующие стоимости кабеля и работ в любом другом грунте.

Построение сложной кратчайшей связывающей сети можно выполнить численным методом с применением вычислительной машины.

Алгоритм этого метода может быть реализован по шагам [12] (рис. 38).



Итоговая таблица	
Звено	Длина
1 — $i$	$\ell_{1,i}$
1 — ( $n-1$ )	$\ell_{1,(n-1)}$

Рис. 38. Алгоритм построения кратчайшей связывающей сети.

**Первый шаг.** Составляется матрица стоимости линий связи между отдельными точками.

**Второй шаг.** Записывается первая строка матрицы расстояний в таблицу  $F_1$ , для того чтобы начать расширение первого фрагмента, включающего точку 1.

**Третий шаг.** Выбирается наименьшая длина пути в таблице  $F_1$ ; пусть она равна  $\ell_{1,i}$ .

**Четвертый шаг.** Звено 1 —  $i$  удаляется из таблицы  $F_1$  и заносится в итоговую таблицу.

**Пятый шаг.** Оставшиеся на первом этапе элементы таблицы  $F_1$  сравниваются с соответствующими элементами  $i$ -го столбца матрицы расстояний, записанной справа от таблицы  $F_1$ . Если

какие-нибудь элементы из этой строки матрицы расстояний до прибавленной точки меньше соответствующего элемента в таблице  $F_1$ , пусть  $l_{1,2} < l_{1,3}$ ;  $l_{1,3} < l_{1,4}$ , то последний из них заменяется первым. При этом соответственно меняется индекс в скобках. В результате получается новая таблица  $F_2$ .

Этот процесс повторяется для получения списка последовательных ближайших соседей расширяющегося фрагмента, который заносится в итоговую таблицу.

Таблица  $F$  и строки из матрицы расстояний, расположенные справа от таблицы  $F$ , становятся короче по мере уменьшения числа несвязанных точек.

*Шестой шаг.* Вычерчивается кратчайшая связывающая сеть для данного расположения объектов. Звенья, представленные в итоговой таблице, указывают порядок соединения объектов.

Для дополнительного сокращения длины кабелей необходимо оптимально расположить ДП и ЗДП, если такой предусмотрен.

Установлено (3.1.4.), что дополнительный выигрыш можно получить, если ДП и ЗДП расположить примерно в середине расположения ИП, причем ЗДП необходимо расположить на противоположной стороне относительно ДП.

### § 3. 2. ОЦЕНКА СТОИМОСТИ ЛИНИЙ СВЯЗИ ПРИ КОЛЬЦЕВОЙ СТРУКТУРЕ ТМ СИСТЕМЫ

Задача определения минимальной стоимости в этом случае также может быть сведена к задаче определения минимальной длины линий связи.

Математически при заданном расположении ИП на местности подобная задача решается методом определения минимального пути „путешествующего коммивояжера“.

Задача о коммивояжере может быть сформулирована следующим образом: пусть имеется  $n$  городов, занумерованных в следующем порядке  $1, 2, \dots, n$ . Требуется найти маршрут, выходящий из первого города, проходящий один и только один раз через каждый город, возвращающийся снова в первый город и имеющий минимальную протяженность, т.е.  $\sum_{i,j=1}^n l_{ij}$  по  $i$  и  $j$  расстояниям между городами должна быть минимальной.

Число возможных вариантов кольцевых схем для  $n$  ИП, включая ДП, равно  $(n - 1)!$

Задача о коммивояжере может быть решена как приближенно [14], [15], так и точно [15].

В основу приближенного решения положен: алгоритм „ветвь — предел“, сущность которого состоит в разделении направлений всех поездов („узлов дерева“) для  $n$  ИП на меньшие поднаправления („ветви дерева“) и в вычислении для каждой ветки минимального предела длины пути. Пределы приводят к

расчленению на новые ветви и, в конечном счете, устанавливается оптимальная поездка. Этот алгоритм может быть реализован вручную и не требует много времени и специальной подготовки оператора.

Оптимальной считается такая поездка, длина пути которой будет наименьшая.

### Алгоритм Крушевского

Алгоритм Крушевского позволяет решить задачу приближенно и точно.

Общее расстояние по маршруту из 1-го города во 2-й, из 2-го в 3-й и т. д. из  $(n-1)$ -го в  $n$ -й и из  $n$ -го в 1-й определяется по формуле

$$L = l_{1,2} + l_{2,3} + \dots + l_{n-1,n} + l_{n,1}. \quad (3.2.1)$$

Формула (3.2.1) получается из скалярного произведения матриц  $L$  и  $P$ :

$$L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n l_{i,j} P_{ij}, \quad (3.2.2)$$

где  $L = ||l_{ij}||$  — матрица расстояний между  $n$  городами;

$P = ||P_{ij}||$  — матрица  $n$ -го порядка с элементами

$$P_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{при } j = i + 1; \\ 0 & \text{при } j \neq i + 1; (i, j) = 1, 2, \dots, n. \end{cases}$$

причем индекс „ $n+1$ “ здесь и в дальнейшем считается равным 1.

Матрица  $P$  — имеет вид

$$P = \begin{vmatrix} 0100 \dots 00 \\ 0010 \dots 00 \\ 0000 \dots 10 \\ 1000 \dots 00 \end{vmatrix}$$

Если зафиксировать 1-й город, а остальные поменять местами согласно подстановке

$$T = \begin{Bmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ 1 & t_2 & \dots & t_n \end{Bmatrix}, \quad (3.2.3)$$

то получим общее расстояние

$$L(T) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n l_{i,t_j} P_{ij} \quad (3.2.4)$$

по некоторому маршруту. Порядок нижних индексов в обратной подстановке

$$T^{-1} = \begin{Bmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ 1 & r_2 & \dots & r_n \end{Bmatrix}$$

указывает этот маршрут:

$$1 \rightarrow r_2 \rightarrow r_3 \rightarrow \dots \rightarrow r_n \rightarrow 1. \quad (3.2.5)$$

Выполняя всевозможные подстановки  $T$ , получим всевозможные маршруты (3.2.5) и всевозможные значения общей длины пути (3.2.1).

В конечном итоге необходимо найти минимум выражения (3.2.1) при всевозможных подстановках  $T$ , т. е. необходимо определить  $\min L(T)$ .

Количество вычислений для определения оптимального варианта подсчитать не удастся, однако можно полагать, что в среднем его можно оценить выражением

$$4(n-1)C_{n-1}^2 = 2(n-1)(n-2).$$

Из этого выражения следует, что алгоритм Крушевского при большом числе  $n$  может быть реализован только с помощью вычислительной машины. Поэтому на практике для построения кратчайшего замкнутого пути чаще применяется алгоритм „ветвь — предел“.

### Алгоритм „ветвь и предел“

В работе [12] предложен алгоритм определения минимальной длины линии связи кольцевой структуры по шагам.

*Первый шаг.* Редуцирование первоначальной матрицы расстояний и определение предела для узла  $X_0$ .

Выполним редуцирование первоначальной матрицы расстояний  $C = |C_{ij}|$  таким образом, чтобы в каждой  $i$  строке и каждом  $j$  столбце был бы по крайней мере один нуль. В результате получается редуцированная матрица расстояний  $C_0$ .

Выбираем узел  $X_0$  для всех вариантов и определяем для него минимальный предел длины  $l(X_0)$ , равный сумме постоянных редуцирования:

$$l(X_0) = \sum_{i=1}^n h_i + \sum_{j=1}^n h_j, \quad (3.2.6)$$

где  $h_i$  — постоянная редуцирования  $i$ -й строки первичной матрицы расстояний  $C$ ;

$h_j$  — постоянная редуцирования  $j$ -го столбца первоначальной матрицы расстояний  $C$ .

*Второй шаг.* Построение ветви дерева из узла  $X_0$  к узлам  $y(i,j)$  и  $u(i,j)$ .

Выполним разъединение всех вариантов из узла  $X_0$  на два поднаправления с узлом  $y(i,j)$ , дающим максимальный эффект в сокращении длины кабеля, и узлом  $u(i,j)$ , дающим минимальный эффект в сокращении длины кабеля.

Таким вариантом для узла  $y(i, j)$  являются варианты, связи, проходящие через  $(i, j)$  пару объектов, расстояние между которыми равно нулю, т. е.  $c(i, j) = 0$  редуцированной матрицы.

Варианты линии связи, не проходящие через  $(i, j)$  пару объектов, расстояние между которыми  $q_i$  и  $q_j$  равно величине наименьших элементов  $i$ -й строки и  $j$ -го столбца редуцированной матрицы расстояний, исключая величину  $c(i, j) = 0$ .

Положим

$$Q(i, j) = q_i + q_j. \quad (3.2.7)$$

Следовательно, чтобы выбрать оптимальным образом из пар объектов нужную  $(i, j)$  пару для построения дерева к узлам  $y(i, j)$  и  $y(i, j)$ , необходимо, чтобы для данной пары  $c(i, j) = 0$ , а  $Q(i, j)$  была бы наибольшей из всех величин редуцированной матрицы расстояний.

Для построения дерева необходимо определить минимальный предел длины линии связи для всех вариантов, переходящих через узлы  $y(i, j)$  и  $y(i, j)$ .

Предел для узла  $y(i, j)$  равен

$$l[y(i, j)] = l(x_0) + Q(i, j). \quad (3.2.8)$$

Предел для узла  $y(i, j)$  равен

$$l[y(i, j)] = l[x_0] + h, \quad (3.2.9)$$

где  $h$  — сумма постоянных вторичного редуцирования матрицы.

*Третий шаг.* Построение ветвей дерева из узла  $y(i, j)$  к узлам  $y(k, l)$  и  $y(k, l)$ .

Узел  $y(i, j)$  представляем узлом  $X_1$ ; построение дерева к узлам  $y(k, l)$  и  $y(k, l)$  выполнением по алгоритму второго шага. При этом из минимального предела  $l(X_1) = l[y(i, j)]$  и вторично редуцированной матрицы определяются:

— предел для узла  $y(k, l)$

$$l[y(k, l)] = l(X_1) + Q_{ki};$$

— предел для узла  $y(k, l)$

$$l[y(k, l)] = l(x_1) + h_{kl}.$$

*Четвертый шаг.* Произведем оценку пределов узлов. После построения узлов  $y(k, l)$ ,  $y(k, l)$  необходимо выполнить сравнение пределов полученных узлов друг с другом:

— если  $l[y(k, l)] \leq l[y(i, j)]$

и

$$l[y(k, l)] \leq l[y(k, l)],$$

то продолжаем построение ветвей дерева из узла  $y(k,l)$ , который назовем  $x_2$ ;

— если  $l[y(k,l)] > l[y(i,j)]$ , то ветви дерева строятся из узла  $y(i,j)$ ;

— если  $l[y(k,l)] > \overline{l[y(k,l)]}$ , то ветви дерева строятся из узла  $y(k,l)$ .

Аналогичным образом, выбирая узлы с наименьшими пределами, что приводит к уменьшению количества ветвей дерева, продолжаем построение дерева.

*Пятый шаг.* Построение кольцевой схемы соединения объектов.

Построение кольцевой схемы соединения объектов производится согласно полученному решению. Для этого выбирается та ветвь дерева, которая доведена до конца. Конечный узел этой ветви должен иметь наименьший предел по сравнению с аналогичными узлами других ветвей.

После выбора ветви необходимо соединить объекты в таком порядке, в каком расположены узлы ветви. Линия, соединяющая объекты в заданном порядке, будет оптимальным вариантом кольцевой схемы соединения объектов.

*Шестой шаг.* Простейший способ определения длины линии связи с кольцевой структурой.

Если известен порядок соединения объектов, то минимальную длину линий связи можно получить по первичной матрице расстояний  $c$ . Порядок соединения дает последовательность расположения узлов той ветви дерева, которая доведена до конца. Минимальная длина в этом случае

$$L_0 = \sum_{i,j}^n l_{ij},$$

где  $l_{ij}$  — длина отрезка линии связи между  $(ij)$  парами объектов, взятая из первичной матрицы расстояний.

Рассмотренные основные методы получения наикратчайших сетей позволяют в последующем по изложенной ранее методике оценить оптимальную или минимальную стоимость линий связи различных структур.

### § 3. 3. ОЦЕНКА СТОИМОСТИ АППАРАТУРЫ ТЕЛЕМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ДИСПЕТЧЕРСКОМ И ИСПОЛНИТЕЛЬНОМ ПУНКТАХ

Выбор структуры ТМ системы, реализующей заданный алгоритм работы, определит в конечном счете состав аппаратуры на ДП, ЗДП и ИП.

Стоимость аппаратуры ДП можно оценить по формуле [16]:

$$W_{\text{ДП}} = \sum_{i=1}^n c_{\text{ДП}i}, \quad (3.3.1)$$

где  $c_{дп}$  — обобщенная стоимость \*  $i$ -й системы ДП;  
 $n$  — общее количество систем на ДП.

По аналогичным формулам стоимость аппаратуры на ЗДП и ИП:

$$W_{здп} = \sum_{j=1}^m c_{здпj}; \quad (3.3.2)$$

$$W_{ип} = \sum_{v=1}^k c_{ипv}, \quad (3.3.3)$$

где  $c_{здпj}$ ,  $c_{ипv}$  — обобщенные стоимости аппаратуры ИП и ЗДП соответственно;

$m, k$  — общее число систем на ЗДП и ИП соответственно.

При выборе оптимальной структуры ТМ системы по надежности и стоимости часто оказывается достаточно учитывать относительные стоимости. Это в значительной степени облегчает положение разработчиков по сравнению с необходимостью знать стоимость систем в рублях.

### § 3. 4. ОЦЕНКА ОБОБЩЕННОЙ СТОИМОСТИ АППАРАТУРЫ ТЕЛЕМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Для оптимизации структуры ТМ системы необходимо знать обобщенную стоимость, которую в первом приближении можно оценить по формуле [16]

$$W_{ТМ} = W_{лс} + W_{дп} + W_{здп} + W_{ип}. \quad (3.4.1)$$

Средняя стоимость ТМ системы определяется суммарными затратами на разработку и эксплуатацию системы:

$$W_{ТМ} = W_p + W_э, \quad (3.4.2)$$

где  $W_p$  — стоимость разработки и изготовления ТМ системы;

$W_э$  — стоимость эксплуатации ТМ системы.

Стоимость разработки

$$W_p = b_p W_{ор} \left[ \frac{1 - P_0(t, \tau)}{1 - P(t, \tau)} \right]^{\mu_p}, \quad (3.4.3)$$

где  $b_p$  — некоторый постоянный коэффициент, определяемый в процессе производства (в простейшем случае коэффициент  $b_p$  может полагаться равным 0 или 1);

\* Обобщенная в смысле учета стоимости самой аппаратуры, стоимости аппаратуры для эксплуатации и стоимости процесса эксплуатации.

$W_{op}$  — стоимость простейшей ТМ системы при первоначальной вероятности безотказной работы  $P_0(t, \tau)$ ;

$\mu_p$  — постоянная величина, определяемая в процессе разработки;

$P(t, \tau)$  — вероятность безотказной работы ТМ системы, поступающей на эксплуатацию.

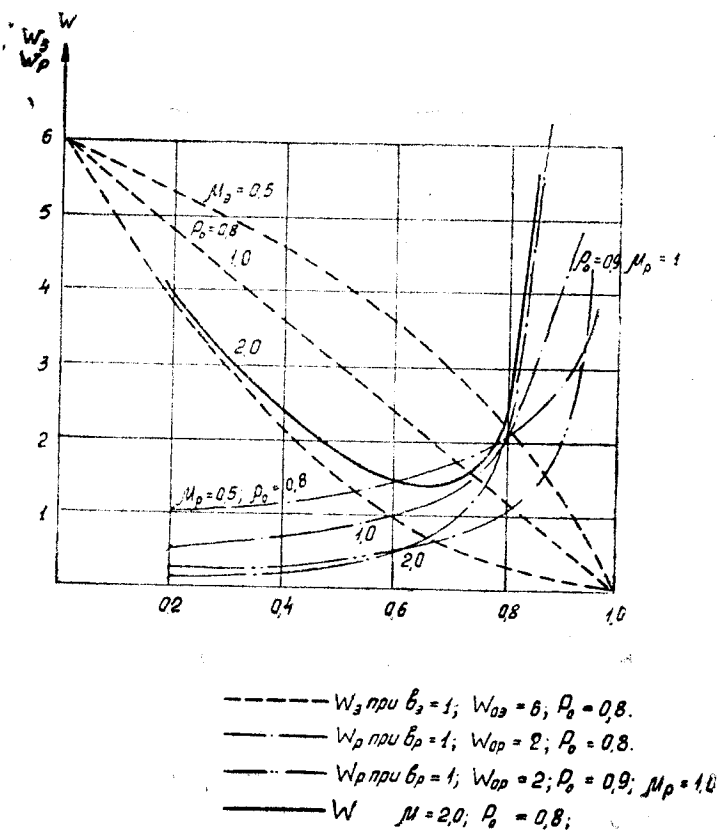


Рис. 39. График стоимостей ТМ системы.

На рис. 39 показан график средней стоимости в зависимости от вероятности безотказной работы. Из графика видно, что при стремлении вероятности безотказной работы к единице стоимость системы увеличивается до бесконечности.

Стоимость эксплуатации ТМ системы

$$W_0 = b_0 W_{00} [1 - P(t, \tau)]^{\mu_0}, \quad (3.4.4)$$

где  $b_0$  — постоянный коэффициент, определяемый в процессе производства и эксплуатации (в простейшем случае коэффициент  $b_0$  может принимать значение 0 или 1);



$P_a$  — постоянная величина, определяемая в процессе разработки и эксплуатации;

$W_{03}$  — стоимость эксплуатации простейшей ТМ системы.

На рис. 39 показан график изменения средней стоимости эксплуатации в зависимости от вероятности безотказной работы. Из графика видно, что стоимость эксплуатации падает с увеличением вероятности безотказной работы. На этом же рисунке представлены графики изменения суммарной стоимости ТМ системы в зависимости от вероятности безотказной работы.

Характер изменения обобщенной стоимости ТМ системы в зависимости от вероятности безотказной работы указывает на возможность оптимизации этой системы.

---

## ГЛАВА IV

# ЭЛЕМЕНТЫ ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУР ТЕЛЕМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

### ВВЕДЕНИЕ

В техническом задании на разработку ТМ системы указано число ИП и основные требования к системе. К основным из них относится:

- высокая надежность системы при минимальной стоимости;
- высокая живучесть системы в условиях ядерной войны;
- высокая помехоустойчивость;
- высокая готовность к применению.

Перечисленные требования определяют критерий оптимизации структур ТМ систем управления и контроля, в качестве которого целесообразно выбрать обобщенный функционально-статистический критерий [16], позволяющий выполнить оптимизацию с учетом надежности, живучести, помехозащищенности и готовности к применению.

Для оптимизации структур ТМ систем необходимо принять некоторые положения и ввести следующие понятия.

Процесс ТМ управления и контроля — процесс выполнения операций по определенному алгоритму управления и контроля с целью перевода ИП в состояние, при котором ИП выполнит поставленную перед ним задачу с определенным качеством. Под качеством в данном случае понимается определенные вероятность выполнения объектом задачи, время и стоимость.

Процесс управления и контроля осуществляется ТМ системой управления и контроля, которая, работая по определенному алгоритму, переводит состояние объекта с одной неопределенностью в некоторое более определенное состояние, получая при этом определенное количество информации. С этой точки зрения ТМ система управления и контроля является информационной системой управления и контроля.

#### § 4.1. КОЛИЧЕСТВО ИНФОРМАЦИИ, ПОЛУЧАЕМОЕ ТЕЛЕМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

Состояние объекта совместно с ТМ системой до начала процесса управления и контроля можно охарактеризовать энтропией

$$H_0(t, \tau) = \sum_{i=1}^m H_{i0}(t, \tau), \quad (4.1.1)$$

где

$$H_{i0}(t, \tau) = - \{ P_{oi}(t, \tau) \log_2 P_{oi}(t, \tau) + [1 - P_{oi}(t, \tau)] \log_2 [1 - P_{oi}(t, \tau)] \} \quad (4.1.2)$$

— энтропия  $i$ -й системы, входящей в объект или ТМ аппаратуру до начала контроля и управления;

$P_{oi}(t, \tau)$  — вероятность безотказной работы  $i$ -й системы (вероятность выполнения задачи  $i$ -й системой).

В конце процесса контроля и управления состояние объекта совместно с ТМ системой характеризуется энтропией

$$H(t, \tau) = \sum_{i=1}^m H_i(t, \tau), \quad (4.1.3)$$

где

$$H_i(t, \tau) = - \{ P_i(t, \tau) \log P_i(t, \tau) + [1 - P_i(t, \tau)] \log_2 [1 - P_i(t, \tau)] \} \quad (4.1.4)$$

— энтропия  $i$ -й системы управления, входящей в объект и ТМ систему в конце процесса контроля и управления;

$$P_i(t, \tau) = \frac{P_0(t, \tau) [1 - P_{\text{ло}}(t, \tau)]}{P_0(t, \tau) [1 - P_{\text{ло}}(t, \tau)] + [1 - P_0(t, \tau)] P_{\text{но}}(t, \tau)} \quad (4.1.5)$$

— вероятность безотказной работы  $i$ -й системой (вероятность выполнения задачи  $i$ -й системой) в конце процесса контроля и управления;

$P_{\text{ло}}(t, \tau)$  — вероятность возникновения ложного отказа;

$P_{\text{но}}(t, \tau)$  — вероятность возникновения необнаруженного отказа.

Вероятности  $P_{\text{ло}}$  и  $P_{\text{но}}$  обусловлены конечной точностью системы управления. Из формулы (4.1.5) видно, что апостериорную вероятность  $P_i$  можно повышать либо путем увеличения достоверности контроля и управления (снижая вероятность  $P_{\text{ло}}$  и  $P_{\text{но}}$ ), либо путем создания системы с высокой вероятностью безотказной работы  $P_0$ . Конечная точность ТМ системы не позволяет довести состояние объекта до достоверного.

В этом пособии основное внимание будет уделено второму фактору, т. е. созданию ТМ системы с высокой априорной вероятностью  $P_0$ .

Информация, получаемая ТМ системой, определяется по формуле

$$I(t, \tau) = H_0(t, \tau) - H(t, \tau). \quad (4.1.6)$$

Для исключения неоднозначности при определении энтропий  $H_0$  и  $H$  считается, что системы с вероятностями  $P_{0i} < 0,5$  и  $P_i < 0,5$  на практике не применяются.

## § 4.2. ОБОБЩЕННЫЙ ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ОПТИМИЗАЦИИ

Было установлено, что процесс контроля и управления есть процесс перевода объекта из вероятностного состояния, характеризуемого априорной вероятностью  $P_0$  и энтропией  $H_0$ , в вероятностное состояние, характеризуемое апостериорной вероятностью  $P$  и энтропией  $H$ .

Другими словами, процесс управления и контроля — процесс получения недостающей информации.

Эффективность процесса, а следовательно и эффективность ТМ системы совместно с объектами при подобном подходе, удобно оценивать обобщенными функционально-статистическими критериями:

$$\mathcal{E}_{l,c}(t, \tau) = \frac{\sum_{i=1}^m (H_{0i} - H_i) C_{\min i}}{m \sum_{i=1}^m C_i}, \quad (4.2.1)$$

где  $C_{\min i}$  — минимальная средняя стоимость простейшей ТМ системы;

$c_i$  — окончательная средняя стоимость ТМ системы.

Иногда при оценке эффективности ТМ системы можно использовать более простой критерий:

$$\mathcal{E}_l(t, \tau) = \frac{\sum_{i=1}^m (H_{0i} - H_i)}{\sum_{i=1}^m H_{0i}}. \quad (4.2.2)$$

Оптимизация структуры ТМ системы по этому критерию представляет решение максиминной задачи. Решение подобной задачи можно выполнить методом, предположенным в работе [16].

## § 4.3. АЛГОРИТМ СИНТЕЗА ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ТЕЛЕМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Синтез оптимальной структуры ТМ системы классическим способом представляет пока непреодолимые математические трудности, хотя некоторые достижения в этом направлении сделаны [13]. Поэтому, в качестве основного метода синтеза целе-

сообразно рекомендовать метод сравнительной оценки по принятому критерию и улучшению возможных ТМ систем, реализующих алгоритм процесса контроля и управления.

Для сравнительной оценки можно выбрать следующие основные структуры ТМ систем:

- радиальную;
- квазирадиальную;
- кольцевую;
- радиально-кольцевую.

Алгоритм синтеза оптимальной ТМ системы удобно расписать по шагам.

*Первый шаг.* Изучение алгоритма работы ТМ системы при различных режимах, в зависимости от числа ИП, их назначения и основных требований к ним.

*Второй шаг.* Построение графической модели структуры ТМ системы, реализующей заданный алгоритм.

*Третий шаг.* Построение математической логической модели структуры ТМ системы. Описание ТМ системы логическими операторами.

*Четвертый шаг.* Построение статистической математической модели ТМ системы. Построение вероятностной и стоимостной модели.

*Пятый шаг.* Оптимизация ТМ системы:

а) обоснование степени автоматизации ТМ системы при необходимости определения места „включения“ оператора; оценка влияния его субъективных качеств на основные характеристики ТМ системы;

б) выбор структуры ТМ системы для реализации в проекте; оценка объема и места расположения аппаратуры ТМ системы; оценка целесообразности ДП, ЗДП, ЦДП; оценка структуры связи ИП с ДП, ЗДП и ЦДП, а также ДП с ЦДП.

*Шестой шаг.* Разработка требований к механической защите аппаратуры ТМ системы и к системе охраны.

Все перечисленные шаги реализации алгоритма проектирования выполняются с количественными оценками характеристик элементов ТМ системы с последующей оптимизацией по обобщенному критерию.

## ГЛАВА V ЭЛЕМЕНТЫ СИНТЕЗА ТЕЛЕМЕХАНИЧЕСКИХ СТРУКТУР

### ВВЕДЕНИЕ

Из множества структур ТМ систем для иллюстрации метода синтеза выберем радиальную и кольцевую. Эти системы являются простейшими и близкими к оптимальным по критерию живучести и стоимости. Задача сводится к тому, чтобы на основе количественного анализа установить преимущества одной системы перед другой и решить ряд вопросов, связанных с выбором элементов структур.

В главе приведены основные положения по проектированию структур ТМ систем. В реальном проектировании, естественно, приходится решать множество частных и общих задач, возникающих и решаемых непосредственно в процессе проектирования. С этой точки зрения здесь дается лишь общая „канва“ мыслей и излагаются некоторые особенности и частности проектирования оптимальных структур ТМ систем.

#### § 5.1. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ СТРУКТУР РАДИАЛЬНОЙ И КОЛЬЦЕВОЙ ТЕЛЕМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Для количественной сравнительной оценки эффективности составим структурные схемы радиальной и кольцевой системы.

Наиболее характерной особенностью работы ТМ систем является управление ИП сигналами, поступающими с ДП, а также контроль сигналами, поступающими с ДП на ИП и с ИП на ДП.

Диаграммы прохождения сигналов с учетом их детерминированных, логических и вероятностных свойств удобно описать с использованием теории ориентированных графов.

На рис. 40 и 41 представлены ориентированные графы двух ТМ систем, построенных соответственно по кольцевой и радиальной структурам.

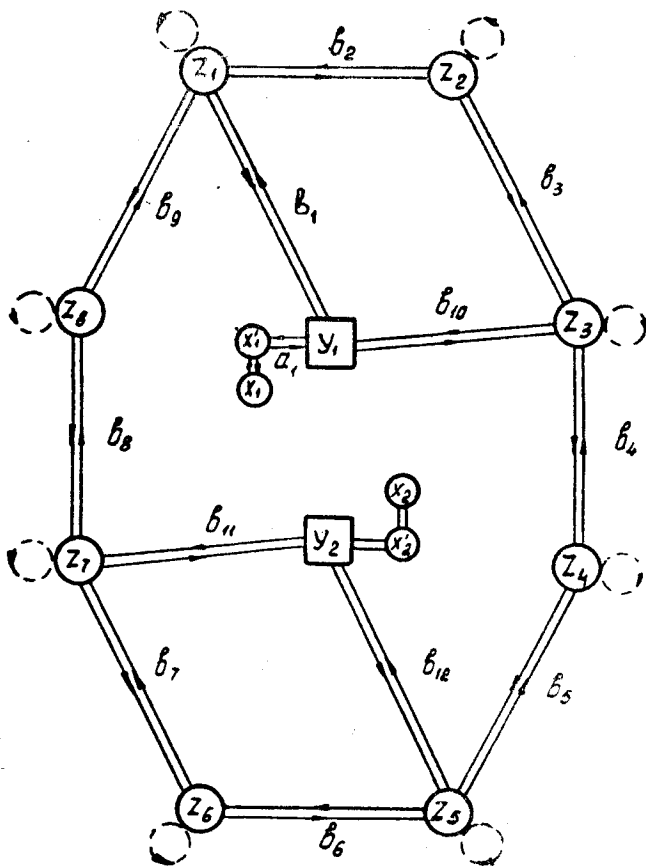


Рис. 40. Кольцевая структура ТМ системы.

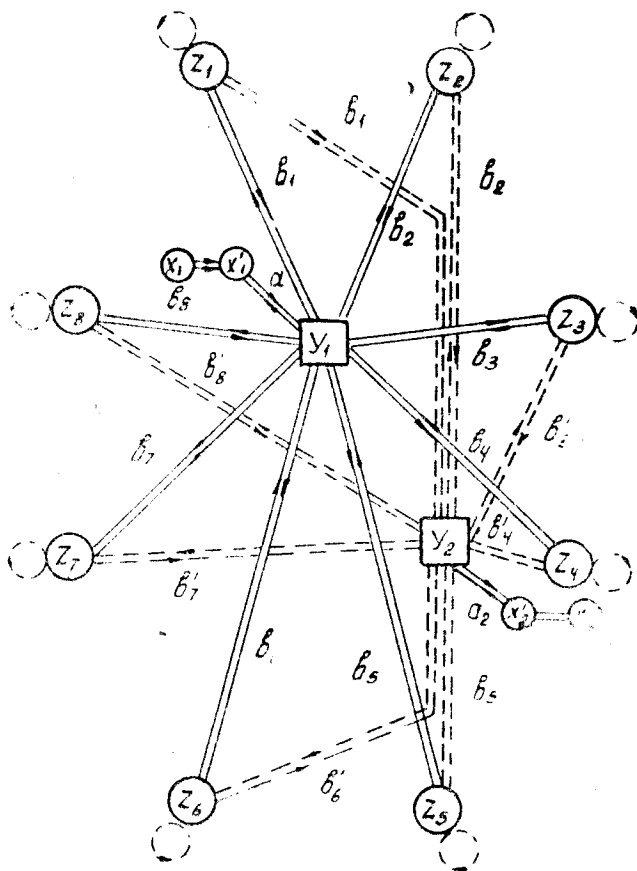


Рис. 41. Радиальная структура ТМ системы.



Для удобства анализа на этих рисунках приняты следующие обозначения:

- $x_1, x_1'$  — операторы на основном ДП;
- $y_1$  — аппаратура основного ДП;
- $z_1 \div z_8$  — аппаратура ИП;
- $b_1 \div b_{12}$  — каналы связи;
- $x_2, x_2'$  — операторы запасного ДП;
- $y_2$  — аппаратура ЗДП.

Кроме того, введены обозначения вероятностей:

- $p_{xi}$  — вероятность правильного выполнения  $i$ -ой операции одним из  $l$  операторов;
- $p_{yi}$  — вероятность безотказной работы  $i$ -й из  $n$  систем ДП;
- $p_{\vartheta\vartheta}$  — вероятность безотказной работы  $\vartheta$ -го участка линии связи;
- $p_{zj}$  — вероятность безотказной работы  $j$ -ой системы из  $m$  систем ИП.

Наиболее важным и интересным режимом работы ТМ системы является режим управления. Поэтому сравнение эффективности кольцевой и радиальной структуры выполнено именно в этом режиме. Сравнительную оценку указанных структур выполним по вероятности безотказной работы и по стоимости.

#### § 5.2. ВЕРОЯТНОСТЬ ПРИНЯТИЯ СИГНАЛА НА ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ПУНКТ В КОЛЬЦЕВОЙ СТРУКТУРЕ

Определим вероятность принятия сигнала на  $z_1, z_2, z_3, z_4$ , которые, как это следует из рис. 40, равны вероятностям принятия сигналов соответственно на  $z_5, z_6, z_7, z_8$ .

Будем полагать, что сигнал с ДП поступает параллельно одновременно по всем возможным путям на все ИП и дешифрируется тем ИП, для которого он предназначен. Такую структуру принято называть параллельной кольцевой, по сравнению с последовательной кольцевой структурой, где сигналы в дальние ИП идут по всем возможным путям с расшифровкой на каждом проходном ИП и шифровкой и передачей дальше в случае, если он не предназначен для данного ИП, через который он проходит.

При исправном состоянии всех участков линии связи любой ИП принимает сигнал, поступающий по двум направлениям от любого ДП. От одного из ДП на каждый ИП сигнал может одновременно приходиться по 4 или 6 возможным цепям.

На рис. 42 показаны возможные пути поступления сигналов на ИП.

Если сигнал на ИП поступает одновременно с направлений  $B_1$  и  $B_2$ , то вероятность правильной передачи сигналов на ИП можно определить, воспользовавшись эквивалентной графической моделью (рис. 43).

Логическую модель можно представить в виде

$$F(z) = B_1 + B_2 = \overline{B_1} \overline{B_2}. \quad (5.2.1)$$

Переходя от логической модели к вероятностной по правилам,

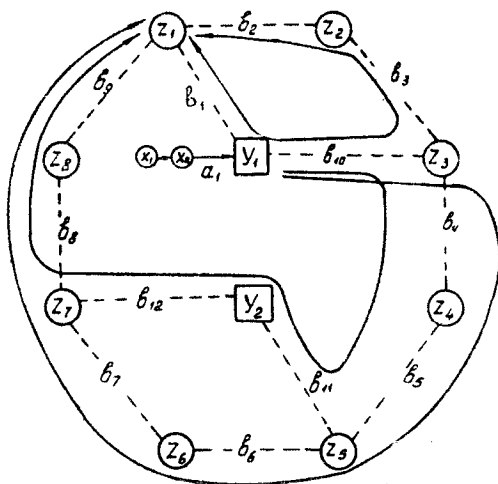


Рис. 42. Схема поступления сигналов на ИП \$z\_1\$.

изложенным в гл. II, получим

$$P(z) = 1 - (1 - p_{B_1})(1 - p_{B_2}), \quad (5.2.2)$$

где \$p\_{B\_1}, p\_{B\_2}\$ — вероятности правильной передачи информации соответственно по ветвям \$B\_1\$ и \$B\_2\$.

При \$p\_{B\_1} = p\_{B\_2} = \dots = p\_{B\_n} = p\_B\$

$$P(z) = 1 - (1 - p_B)^n. \quad (5.2.3)$$

На рис. 44 представлены графики изменения \$P(z)\$ и \$\mathcal{E}(z)\$ в зависимости от изменения \$p\_B\$ при \$n = 1, 2, 3\$. Из этих графиков видно, что с введением дублирования линии связи вероятность правильной передачи информации по сравнению с одиночной линией растет, а эффективность контроля и управления снижается.

С учетом ориентированного графа (рис. 40) и графа прохождения сигналов на ИП \$z\_1\$ (рис. 42) можно написать логическую формулу срабатывания отдельных \$z\$ при всевозможных комбинациях включения элементов ТМ системы управления.

Методика получения логического оператора для всех ИП аналогична. Поэтому построим логический оператор только для ИП \$z\_1\$ при управлении им с ДП \$y\_1\$:

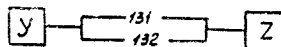


Рис. 43. Схема поступления сигналов на ИП.

$$F(z_1) = x_1 x_1' a_1 y_1 \{ b_1 + b_{10} [ b_2 b_3 + b_4 b_5 b_8 b_9 (b_6 b_7 + b_{11} b_{12}) ] \} z_1 \quad (5.2.4)$$

При этом пренебрегалось запаздывание сигналов, проходящих по различным ветвям линии связи.

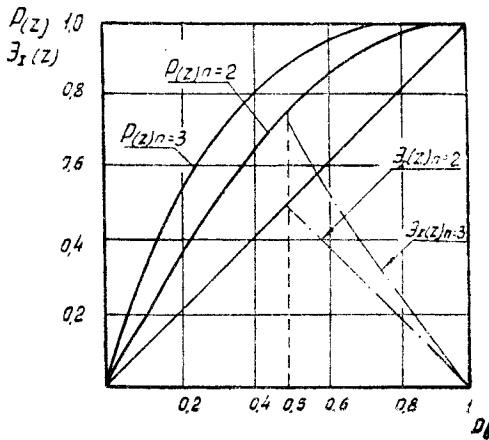


Рис. 44. Зависимость  $p(z)$  и  $E(z)$  от  $p_b$ .

На основании второго закона инверсии формулу (5.2.4) можно преобразовать к виду, от которого легко перейти к вероятностному оператору:

$$F(z_1) = x_1 x_1' a_1 y_1 z_1 \overline{b_1 b_2 b_3 b_{10} b_4 b_5 b_6 b_7 b_8 b_9 b_{10} b_4 b_5 b_8 b_9 b_{10} b_{11} b_{12}}, \quad (5.2.5)$$

Переходя к вероятностному оператору, получим

$$P(z_1) = p_{x_1} p_{x_1'} p_{a_1} p_{y_1} p_{z_1} [ 1 - (1 - p_{b_1}) (1 - p_{b_2} p_{b_3} p_{b_{10}}) \times \\ \times (1 - p_{b_4} p_{b_5} p_{b_6} p_{b_7} p_{b_8} p_{b_9} p_{b_{10}}) \times (1 - p_{b_4} p_{b_5} p_{b_8} p_{b_9} p_{b_{10}} p_{b_{11}} p_{b_{12}}) ]. \quad (5.2.6)$$

При

$$p_{x_1} = p_{x_1'} = p_x;$$

$$p_{a_1} = p_{a_2} = p_a;$$

$$p_{b_1} = p_{b_2} = \dots = p_{b_n} = p_b$$

получим

$$P(z_1) = p_x^2 p_a p_y p_z [ 1 - (1 - p_b) (1 - p_b^3) (1 - p_b^7)^2 ]. \quad (5.2.7)$$

Формула (5.2.7) позволяет оценить вероятность поступления сигнала на ИП  $z_1$  с одного ДП.

Вероятность поступления сигнала хотя бы с одного ДП из двух, будет выше и может быть оценена по математической модели, полученной из рис. 43.

Из полученной формулы видно, что надежность срабатывания ИП определяется в основном:

- надежностью выполнения операций оператором;
- надежностью работы аппаратуры ДП;
- надежностью устройств „сопряжения“ оператора с аппаратурой ДП;
- надежностью участков линии связи;
- надежностью аппаратуры ИП.

Более детально эти показатели рассмотрим в следующих параграфах.

### § 5.3. НАДЕЖНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ ОПЕРАЦИЙ ОПЕРАТОРОМ

Введение операторов в ТМ систему обусловлено тем, что на современном уровне развития автоматов некоторые операции управления оператор выполнит лучше, чем любые автоматические устройства; кроме того, введение оператора приводит к упрощению ТМ систем контроля и управления.

Наличие операторов в системе придает биологический характер системе, что приводит к получению некоторых достоинств, а также к возникновению субъективных ошибок, которые трудно учесть количественно.

Однако в настоящее время уже имеются некоторые предпосылки для оценки влияния оператора на эффективность работы ТМ системы контроля и управления. С этой целью:

- устанавливаются требования к ТМ системе;
- определяется степень участия оператора, необходимая для удовлетворения требований к системе;
- определяется минимальное число простейших операций, которые должны выполнять оператор;
- оценивается количественно надежность выполнения простейших операций оператором.

Из ориентированного графа ТМ системы видно, что система управления предусматривает два оператора для обеспечения заданной вероятности срабатывания ИП. При этом в общем случае вероятность правильного формирования команды  $n$ -операторами (рис. 45)

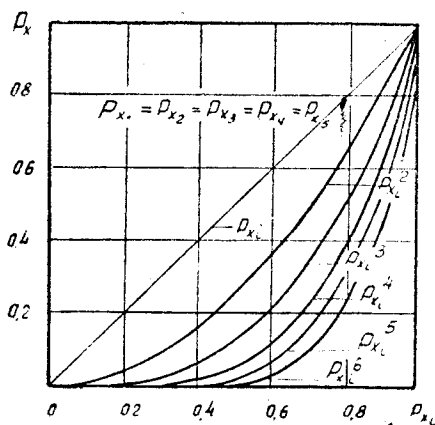


Рис. 45. Надежность выполнения операций оператором.

$$P_x = \prod_{j=1}^k \prod_{i=1}^n P_{xi}, \quad (5.3.1)$$

где  $k$  — число операций, выполняемых оператором;

$n$  — число операторов;

$p_{xi}$  — вероятность правильного выполнения операции.

Из рис. 45 видно, что введение нескольких операторов приводит к снижению вероятности правильного формирования команд.

Вероятность несовпадения действий операторов при неправильном выполнении команд одним из операторов определяется по формуле

$$\bar{P}_x = 1 - P_x = 1 - \prod_{i=1}^n p_{xi}. \quad (5.3.2)$$

С увеличением числа операторов эта вероятность также увеличивается.

Предположим, что в рассматриваемой системе один оператор выполняет три последовательных операции управления с вероятностью, равной  $p_{xi} = 0,98$  [16]. Поэтому общая вероятность правильной работы одного оператора  $P_x = 0,93$ . Для двух операторов  $P_x = 0,87$ . Эта надежность может оказаться недостаточной. Таким образом, при проектировании ТМ системы необходимо:

— упрощать и уменьшать число операций, выполняемых операторами с целью повышения надежности их выполнения;

— заменять оператора автоматом, оставляя за оператором функции наблюдения и необходимость вмешательства только в некоторых аварийных ситуациях.

При техническом проектировании необходимо уделять больше внимания определению возложенных на операторов функций с целью упрощения логики работы операторов.

#### § 5.4. НАДЕЖНОСТЬ АППАРАТУРЫ ДИСПЕТЧЕРСКОГО И ЗАПАСНОГО ДИСПЕТЧЕРСКОГО ПУНКТОВ

При оценке надежности аппаратуры ДП и ЗДП необходимо учесть состав систем, непосредственно обеспечивающих срабатывание ИП.

Если отсутствует посистемное развертывание, надежность работы аппаратуры одного ДП оценивается по формуле

$$p_{y1} = \prod_{i=1}^m p_{yi}, \quad (5.4.1)$$

где  $p_{yi}$  — надежность работы  $i$ -й системы ДП.

График изменения функции (5.3.1), подобной функции (5.4.1), приведен на рис. 45. Из этого графика видно, что при равнонадежных системах ДП, например при  $p_{yi} = 0,95$ ;  $m = 4$ , надежность аппаратуры ДП составит всего лишь  $p_{y1} = 0,81$ , а при  $p_{yi} = 0,99$   $p_{y1} = 0,96$ .

Введение ЗДП приводит к созданию резервирования ДП с общей надежностью:

$$P_y = 1 - (1 - p_{y1})(1 - p_{y2}). \quad (5.4.2)$$

При  $p_{y1} = p_{y2} = p_y$  формулу можно представить в виде

$$P_y = 1 - (1 - p_y)^2. \quad (5.4.3)$$

Для рассмотренного примера получим соответственно  $P_y = 0,96$  для первого случая и  $P_y = 0,998$  — для второго.

Таким образом, введение ЗДП приводит к существенному повышению надежности формирования команд, однако в этом случае необходимо предусмотреть специально синхронную работу двух ДП.

При посистемном резервировании аппаратуры ДП надежность определяется по формуле

$$P_{y1} = 1 - \prod_{i=1}^m p_{yi}. \quad (5.4.4)$$

При проектировании аппаратуры ДП и ЗДП необходимо стремиться к тому, чтобы создать высоконадежные системы, не поддающиеся резервированию, и к резервированию ненадежных подпадающих резервированию систем с целью поднятия их надежности до такого уровня, при котором общая надежность аппаратуры КП будет не ниже заданного уровня.

### § 5.5. НАДЕЖНОСТЬ УЧАСТКА ЛИНИИ СВЯЗИ

Надежность линий передачи сигналов в простейшем случае определяется формулой

$$P_b = p_k p_p p_{сз},$$

где  $p_k$  — надежность кабелей;

$p_p$  — надежность ретрансляционных устройств;

$p_{сз}$  — надежность схем защиты от КЗ и обрывов.

Однако в связи с тем, что в этих схемах может быть легко обеспечена большая избыточность, то легко получить надежность одного участка связи  $p_b > 0,99$  [4].

### § 5.6. НАДЕЖНОСТЬ АППАРАТУРЫ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ПУНКТА

Методика оценки надежности аппаратуры ИП не отличается от методики, изложенной в § 5.4. При оценке необходимо учитывать надежность систем, входящих в аппаратуру ИП, а также надежность аппаратуры собственно объекта.

Может оказаться, что с учетом систем объекта, общее число систем ИП получается свыше 10. Следовательно, даже при равнонадежных системах с надежностью каждой  $p_{zi} = 0,99$  общая надежность аппаратуры ИП

$$P_z = \prod_{i=1}^l p_{zi} = 0,9.$$

При  $p_{zi} = 0,95$   $P_z = 0,59$ .

Обеспечение  $p_{z1}$  свыше 0,95 представляет существенные технические трудности, особенно при создании собственно систем объекта. Поэтому системы ИП необходимо резервировать, доводя общую надежность аппаратуры ИП до определенного значения.

### § 5.7. НАДЕЖНОСТЬ СРАБАТЫВАНИЯ $k$ ИЗ $m$ СИСТЕМ ПРИ РЕЗЕРВИРОВАНИИ

При определении надежности срабатывания хотя бы  $k$  из  $m$  систем ИП или ДП будем предполагать, что включается  $m$  систем и задача будет выполнена, если будут нормально работать хотя бы  $k$  из них. Эта надежность при одинаковых надежностьях срабатывания ИП рассчитывается по формуле

$$P(z)_{k/m} = \sum_{r=k}^m c_m^r p_z^r (1 - p_z)^{m-r}, \quad (5.7.1)$$

где  $c_m^r$  — число сочетаний из  $m$  элементов по  $r$ ;

$p_z$  — вероятность работы одной системы.

На рис. 46 представлены графики вероятностей срабатывания  $k$  из  $m$  систем. Из рисунка видно, что при практической надеж-

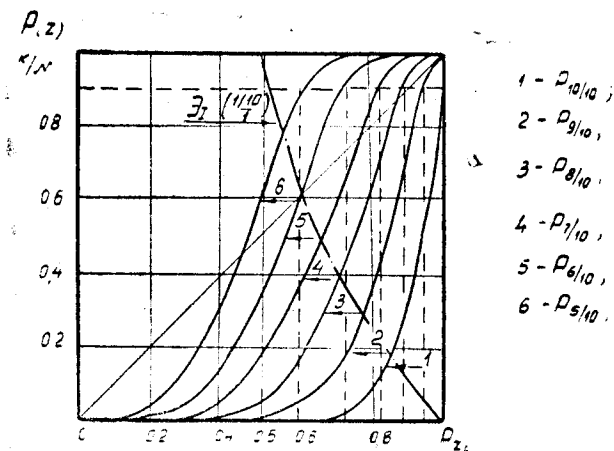


Рис. 46. Вероятность срабатывания  $k$  из  $N$  систем.

ности  $p_{z1} = 0,6$  вероятность работы пяти систем из 10 достигает 0,9. Меньшее число систем из 10 при  $p_{z1} = 0,6$  работает с большей надежностью.

На этом же рисунке представлен график эффективности работы одной системы из 10 по сравнению с одиночной системой, из которого видно, что при  $p_{z1} = 0,5$   $\mathcal{E}_1 = 1$ . По мере увеличения она падает за счет увеличения вероятности срабатывания одиночной системы.

### § 5.8. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ТЕЛЕМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ, ПОСТРОЕННОЙ ПО РАДИАЛЬНОЙ СТРУКТУРЕ

Предположим, что число систем на ДП равно числу ИП. При исправном состоянии всех участков каналов связи любой ИП срабатывает от сигналов, поступающих только по одному пути от любого ДП (рис. 41):

$$P_1(z) = p_x^2 p_y p_v p_z. \quad (5.8.1)$$

Вероятность срабатывания любого ИП от сигнала, поступающего хотя бы от одного из двух ДП, равна

$$P(z) = 1 - [1 - P_1(z)]^2. \quad (5.8.2)$$

График, иллюстрирующий изменения общей надежности в зависимости от изменения надежности  $P_1(z)$ , представлен на рис. 44.

При учете надежности аппаратуры ДП можно предположить, что в ее состав входит по одному комплекту на каждый ИП.

### § 5.9. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СТОИМОСТИ ДВУХ ТЕЛЕМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

На этапе эскизного проектирования можно приближенно оценить стоимость ТМ систем контроля и управления.

Стоимость систем управления на ДП можно определить по формуле

$$C_y = \sum_{i=1}^m c_i, \quad (5.9.1)$$

где  $c_i$  — стоимость  $i$ -й системы.

Так как нас интересует сравнительная оценка, то нет необходимости доводить расчеты до рублей.

Все системы управления ДП одинаковы, кроме системы ТМ. Предположим, что в радиальной системе число комплектов, размещенных на ДП, равно числу ИП.

В кольцевой системе на ДП имеется всего один комплект ТМ системы.

Таким образом, стоимость аппаратуры ДП радиальной системы выше на

$$\Delta C_y = 7 c_{\text{ТМК}},$$

где  $c_{\text{ТМК}}$  — стоимость одного комплекта телемеханического оборудования.

Если используется ЗДП, тогда

$$\Delta C_y = 14 c_{\text{ТМК}}.$$



## § 5.10. СТОИМОСТЬ ЛИНИЙ СВЯЗИ

Если для простоты принять за  $c_{лс}$  среднюю стоимость одного участка линий связи (рис. 40 и 41) для обеих систем управления, то стоимость линии связи радиальной системы управления будет выше стоимости связи кольцевой системы на

$$\Delta c_{тм.л} = 6c_{лс}.$$

На стадии эскизного проектирования можно предположить, что как в радиальной, так и в кольцевой систем управления стоимость аппаратуры ТМ на ИП одинакова. Окончательную, более точную оценку стоимости можно выполнить на стадии технического проектирования.

### § 5.11. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДВУХ ТЕЛЕМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ

Сравнительную оценку двух систем контроля и управления проведем по критериям:

- живучести\*;
- надежности;
- стоимости;
- возможности взаимодействия с другими ТМ системами.

При проектировании необходимо так выбрать параметры систем контроля и управления, чтобы живучесть

$$P_{тм}(p, N, A) = P_{оз} \quad (5.11.1)$$

и стоимость ТМ системы

$$c_{тм}(p, N) = C_{мин} \quad (5.11.2)$$

где  $p$  — вероятность „выживания“ канала связи;

$N$  — число участков связи;

$A$  — число возможных способов соединения линий;

$P_{оз}$  — заданная живучесть;

$C_{мин}$  — минимальная стоимость ТМ системы.

В кольцевой структуре требование (5.11.1) выполняется путем повышения прочности линий, резервированием линии связи и разнесением их в пространстве.

В радиальной схеме резервирование отсутствует, кроме того, с целью изменения длины кабеля некоторые линии связи могут быть совмещены.

Надежность одного комплекта аппаратуры ДП и всей аппаратуры ИП можно в первом приближении считать одинаковой как для кольцевой, так и для радиальной системы. Однако в радиальной системе на ДП располагаются восемь комплектов, вслед-

\* Эти параметры СУ ТМ рассматриваются качественно. Количественная оценка этих параметров приводится для каждого конкретного случая.

ствие чего общая надежность аппаратуры ДП ниже, чем в кольцевой системе.

Стоимость радиальной системы управления, как это было показано, выше стоимости кольцевой системы.

Структура кольцевой системы не имеет ограничений по организации взаимодействия соседних ТМ систем. Эта организация не потребует сложных доработок, которые могут привести к снижению надежности, а, наоборот, окажется возможность повысить надежность работы за счет увеличения числа ДП, с которых можно осуществлять управление ДП района и сокращения до одного ДП в одной ТМ системе.

Структура радиальной системы неудобна для организации взаимодействия. При организации взаимодействия потребуются сложные доработки, которые приведут к значительному повышению стоимости, к снижению надежности района нескольких ТМ систем.

Таким образом, на основании выполненного анализа можно сделать вывод о том, что в первом приближении кольцевая ТМ система по всем параметрам, выбранным для сравнения, лучше, чем радиальная система контроля и управления.

## ГЛАВА VI

# ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ТЕЛЕМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ РАЙОНОМ

### ВВЕДЕНИЕ

Под районом понимается некоторое множество ИП, разбитое на подгруппы, каждая из которых контролируется и управляется ТМ системой. При этом все ТМ системы подгруппы связаны в единую сеть ТМ системы контроля и управления районом.

При анализе различных структурных схем систем управления районом, так же как и при выполненном анализе структуры ТМ системы подгруппы ИП, воспользуемся теорией ориентированных графов. За критерии оценки эффективности выберем надежность, стоимость и другие показатели.

Введем следующие обозначения:

$D$  — центральный диспетчерский пункт (ЦДП);

$M$  — ТМ систему подгруппы;

$N_0$  — соединение  $\forall$  ТМ систем в единую сеть;

$V_p$  — участок линии;

$\bar{L}$  — общая протяженность ТМ линий связи;

$l_i$  — средняя протяженность  $i$ -го участка ТМ линии (расстояния между соседними ТМ системами);

$R_{ЦДП}$  — надежность работы ЦДП;

$R_M$  — надежность работы ТМ системы подгруппы;

$R_N$  — надежность работы группы ТМ систем;

$r_p$  — надежность одного участка ТМ линий связи.

Произведем сравнительную оценку различных вариантов кольцевых структурных схем систем управления районом.

Радиальные структуры не рассматриваются, так как они по сравнению с кольцевыми имеют худшие характеристики (см. гл. V).

Таким образом, остается выполнить анализ кольцевых структур, в которых все ТМ вытянуты в замкнутую цепь, а также структуры, в которой замкнутая цепь состоит из группы  $M$ . При

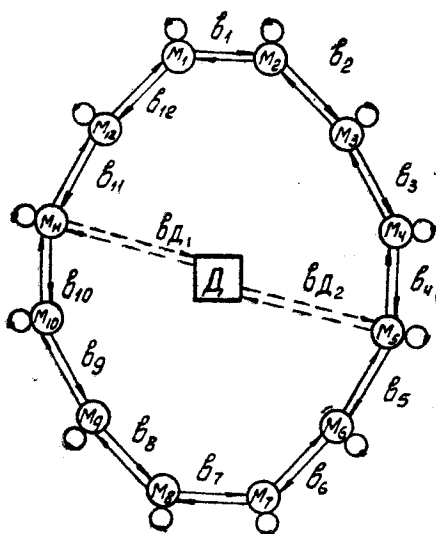


Рис. 47. Кольцевая структура I.

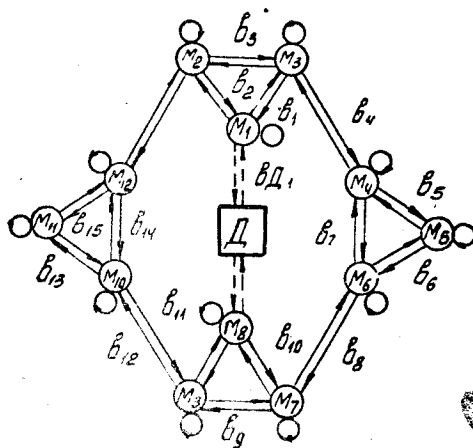


Рис. 48. Кольцевая структура II.

этом в любом варианте на весь район предполагается иметь один ЦДП, который может осуществлять контроль и управление любой М.

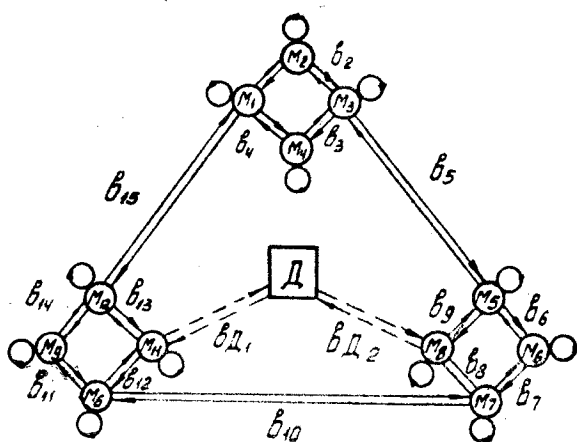


Рис. 49. Кольцевая структура III.

На рис. 47, 48, 49, 50 представлены графы анализируемых структур районов.

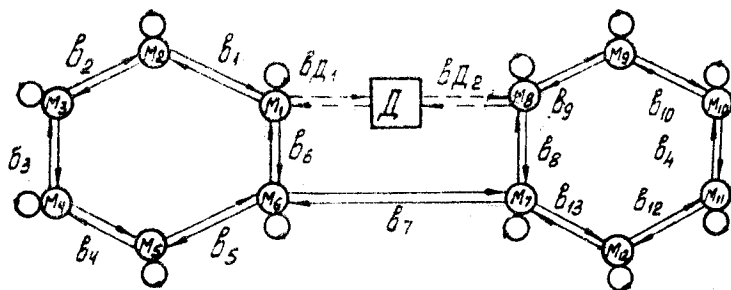


Рис. 50. Кольцевая структура IV.

#### § 6.1. НЕКОТОРЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ О РАЗМЕЩЕНИИ ЦЕНТРАЛЬНОГО ДИСПЕТЧЕРСКОГО ПУНКТА

Предположим, что пункт  $D$  вводится в соответствии с требованиями на разработку системы управления районом.

При введении пункта  $D$  возможны два варианта:

- совмещенный  $D$  с одним из  $Y$ ;
- несомещенный  $D$  с одним из  $Y$ .

При совмещении  $D$  с одним из  $Y$  очевиден выигрыш в стоимости ТМ системы управления района за счет уменьшения стоимости ТМ линий управления, примерно на

$$\Delta C_D = C_{BK1} + C_{BK2} \quad (6.1.1)$$

и уменьшение стоимости строительства.

Кроме того, при этом возможно некоторые функции, выполняемые аппаратурой  $D$ , передать на исполнение аппаратуре  $Y$ , сокращая при этом состав аппаратуры  $D$  и получая дополнительный выигрыш по снижению стоимости района.

В случае выбора несовмещенного  $D$  с одним из  $Y$  необходимо выбрать число ТМ линий, соединяющих  $D$  с кольцом.

Вероятность сохранения хотя бы одной ТМ линии связи из  $m$

$$P_{BK} = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - p_{BK_i}) \quad (6.1.2)$$

где  $p_{BK_i}$  — вероятность исправной работы  $i$ -го участка линии,

При  $p_{BK1} = p_{BK2} = \dots = p_{BKm}$

$$P_{BK} = 1 - (1 - p_{BK_i})^m \quad (6.1.3)$$

Графики изменения вероятности  $P_{BK}$  в зависимости от вероятности  $p_{BK_i}$  подобны графикам, представленным на рис. 44.

Из этих графиков видно, что даже при вероятностях  $p_{BK_i} = 0,8$  не имеет особого смысла увеличивать  $m$  больше 2, так как при  $m = 2$   $p_{BK} = 0,96$ , а при  $p_{BK_i} = 0,9$   $p_{BK} = 0,99$ .

При выборе несовмещенного варианта необходимо  $D$  соединять так, чтобы несколько выравнять условия управления отдельными  $M$ .

## § 6. 2. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ РАЙОНОМ

Надежность управления одним  $M$  при кольцевой структуре зависит от числа  $Y$ , с которых возможно управлять включением, а также от числа ТМ линий, соединяющих  $M$  с соседними  $M$ .

Оценим надежность управления одним  $M$  хотя бы с одного ближайшего  $Y$  с надежностью  $P_{y1}$  при несовмещенном и совмещенном  $D$ , считая при этом, что отдельный  $M$  может иметь только один свой  $Y$ :

$$P_M = 1 - (1 - P_{y1})^n$$

Графики функций, подобных этой функции, приведены на рис. 44. Из этих графиков и таблицы 3 видно, что все структурные схемы районов по надежности управления отдельных  $M$  можно в первом приближении считать одинаковыми.

О надежности работы различного числа  $M$  из общего числа  $M$  можно судить по графикам (рис. 46), полученным в предыдущей главе.

### § 6. 3. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СТОИМОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ТМ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ РАЙОНОМ

При сравнительной оценке стоимости различных систем управления для простоты предположим, что расстояние между ближайшими  $M$  различных групп равны между собой и равны расстояниям между отдельными  $M$  в группах. Тогда общую протяженность ТМ линии  $l_{k1} = l_{k2} = l_k$  можно определить по формуле

$$L = \sum_{i=1}^n l_i + 2l_k. \quad (6.3.1)$$

Кроме того, предположим, что стоимости отдельных  $l_i$  равна  $C_1$  и стоимость  $M$  равна  $C_{M1}$

$$C_1 = C_2 = \dots C_n = C; C_{M1} = C_{M2} = C_{Mn} = C_M.$$

Тогда разность в стоимости различных ТМ систем управления районом  $\Delta C_p$  будет определяться в основном разностью стоимостей ТМ линий связи. Эта разность относительно стоимости первого варианта структуры составляет

$$\Delta C_j = \sum_{i=1}^n C_{ji} - \sum_{i=1}^n C_{i1}. \quad (6.3.2)$$

где  $j$  — номер варианта системы;

$C_{ji}$  — стоимость  $i$ -го участка ТМ линии связи  $j$ -го варианта системы.

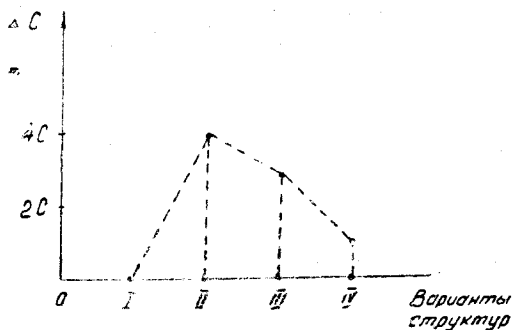


Рис. 51. Стоимость различных структур.

Как видно из таблицы 3 и рис. 51, разность стоимости при  $C_1 = C_2 = \dots = C_n = C$  имеет наибольшую величину для II ва-

Таблица 3

Характеристика		Число ближайших к ТМ ближних объектов	Р-хотя бы о одного ближнего объекта ( $P_{\text{н}} = 0,9$ )	Общая протяженность ТМ линии	$\Delta C_{\text{г}}$
Варианты структуры					
I	Несовмещенный D	3 для 2 <sup>х</sup> м 4	0,999 0,999	12L + 2L D	0
	Совмещенный D	3	0,999	12L	0
II	Несовмещенный D	3 для 10 <sup>м</sup> 4	0,999 0,9999	15L - 2L D	4L
	Совмещенный D	3 для 8 <sup>м</sup> 4	0,999 0,9999	15L	4L
III	Несовмещенный D	3 для 9 <sup>м</sup> 4	0,999 0,9999	15L - 2L D	3L
	Совмещенный D	3 для 6 <sup>м</sup> 4	0,999 0,9999	15L	3L
IV	Несовмещенный D	3 для 4 <sup>х</sup> м 4	0,999 0,9999	13L - 2L D	0
	Совмещенный D	3 для 2 <sup>х</sup> м 4	0,999 0,9999	13L	0

рианга структурной схемы. Стоимости вариантов I и IV мало отличаются друг от друга.

#### § 6. 4. ВЛИЯНИЕ СХЕМЫ ЗАЩИТЫ ОТ ЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ НА ОБЩУЮ НАДЕЖНОСТЬ

Защита от ложных сигналов особенно важна для ТМ систем, используемых в военном деле.

Для защиты от ложных сигналов управления, которые могут поступать на Z, необходимо предусмотреть специальные устройства, которые бы исключали срабатывание Z района, если оно не предусмотрено алгоритмом нормального функционирования. Это устройство необходимо при любой кольцевой системе управления, когда на любой Z района могут поступить ложные сигналы управления с любого участка ТМ линии района, а также с любого Y.

При проектировании системы защиты от прохождения ложных сигналов управления следует исходить из следующих положений:

1. Противнику все известно о системе управления районом, включая коды различных команд.



2. Противник может осуществить попытку подать ложный сигнал управления, действуя на  $Y$ , с любого участка линии связи, кроме охраняемого  $Z$ .

Таким образом, для исключения возможности прохождения ложного сигнала управления устройство защиты необходимо ставить непосредственно на охраняемом  $Z$ .

Постановка устройства защиты на  $Y$  не устраняет возможности прохождения ложного сигнала на  $Z$  с любого участка ТМ линии, исключая только возможность поступления ложного сигнала непосредственно с ДП.

В дальнейшем будем предполагать, что устройство защиты представляет собой некоторое блокировочное устройство (БУ).

В автоматической ТМ системе управления объектами не зависимо от того, где будет установлено БУ, в основном различают два варианта сопряжения вышестоящей системы с ТМ системой:

- сопряжение через оператора;
- автоматическое непосредственное сопряжение.

Если автоматическое сопряжение можно сделать сколь угодно надежным, применяя надежные элементы при изготовлении автомата, а также ввод резервирования, то при сопряжении через оператора получение высокой надежности составит определенные трудности.

Для количественной оценки влияния надежности выполнения операций оператором сигналов управления  $Z$  предположим, что для каждого  $Z$  установлен свой, например  $k$ -значный код. При получении по линии связи санкции на включение кода оператор снимает блокировку с данного  $Z$  путем нажатия в определенной последовательности кнопок с определенными цифрами.

Вероятность разблокировки  $Z$

$$P_{\text{БУ}}(Z) = \prod_{l=1}^k p_l \quad (6.4.1)$$

где  $p_l$  — вероятность выбора и нажатия кнопки с определенной цифрой.

При  $p_1 = p_2 = \dots = p_k$

$$P_{\text{ЗБУ}} = p_1^k.$$

Например, при  $k=6$  и близкому к реальному значению  $p_1 = 0,98$   $P_{\text{ЗБУ}} = 0,88$ .

Общая надежность прохождения сигналов управления на  $Z$  не может быть получена выше 0,88, что, как правило, не соответствует требованиям к общей надежности  $M$ .

Для повышения надежности сопряжения необходимо либо повышать  $p_l$ , что практически вряд ли осуществимо, либо умень-

шать  $k$ , что приведет к повышению вероятности ложного прохождения сигнала управления.

Таким образом, для получения высокой надежности необходимо осуществлять автоматическое сопряжение систем.

Роль оператора, если он предусмотрен, может быть сведена к наблюдению за работой устройства и, только в случае обнаружения отказа, оператор должен, действуя по соответствующей инструкции, произвести разблокировку определенного  $Z$ .

---

## ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Х. Гуд, Р. Э. Макол, Системотехника, Сов. радио, М., 1962.
2. В. С. Малов, Телемеханика, Госэнергоиздат, М., 1960.
3. Синтез электронных вычислительных и управляющих машин. Перевод с англ. Под ред. В. И. Шестакова, ИЛ, 1954.
4. В. А. Ильин, Системы телемеханики для рассредоточенных объектов, Госэнергоиздат, М. Л., 1960.
5. М. А. Гаврилов, Структурная теория релейных устройств, Лекции, М., 1959.
6. В. А. Котельников, Теория потенциальной помехоустойчивости, Госэнергоиздат, М., 1956.
7. Дж. Л. Берроуз, У. Хэпп, Применение методов теории ориентированных графов в проблемах надежности. Перевод с англ., № 1031, в. ч. 03425, 1963.
8. Ю. А. Гогин, Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, ЛКВИА им. А. Ф. Можайского, 1963.
9. А. А. Ларин, Надежность логических схем, ХВКИУ, 1966.
10. Ракетная техника № 16, 20, 45, 1962; № 14, 28, 1963,
11. R. C. Prime, Shortest connection networks and some generalizations, Bell. Syst. Techn. J, 35, № 6, 1957,
12. В. Д. Жигалов, Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, ВИА им Ф. Э. Дзержинского, 1966.
13. А. К. Кельманс, А. Г. Мельников, О построении структур передачи информации оптимальных по надежности, Автоматика и Телемеханика, № 2, 1964.
14. D. C. Lohm, Hittle, Katta G. Murty, Dura W. Sweeney, Carotline Karel, An algorithm for the traveling Salesman problem. The Zournal of the Operations Research Society of America November — December, 1963.
15. А. В. Крушевский, Задачи о бродячем торговце; Материалы научных семинаров по теоретическим и прикладным вопросам кибернетики. Киев, 1962.
16. И. В. Кузьмин Оценка эффективности автоматических систем контроля и управления, ХВКИУ, 1966.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие . . . . .	5
<b>Глава 1. Структура и общие принципы построения ТМ систем контроля и управления . . . . .</b>	<b>7</b>
Введение . . . . .	7
§ 1. 1. Состав телемеханических систем . . . . .	7
§ 1. 2. Особенности телемеханических систем . . . . .	8
§ 1. 3. Элементы системы телемеханики . . . . .	11
§ 1. 4. Структура и общие принципы построения систем телемеханики . . . . .	16
§ 1. 5. Отличительные особенности систем дистанционного управления и контроля от телемеханических систем . . . . .	21
<b>Глава 2. Основы теории ориентированных и логико-вероятностных моделей телемеханических систем . . . . .</b>	<b>24</b>
Введение . . . . .	24
§ 2. 1. Детерминистские основы ориентированных и логических графов . . . . .	24
§ 2. 2. Основы теории логико-вероятностных графов . . . . .	31
§ 2. 3. Основные положения об оценке помехозащищенности телемеханических систем . . . . .	36
<b>Глава 3. Основы теории стоимостных моделей телемеханических систем . . . . .</b>	<b>37</b>
Введение . . . . .	37
§ 3. 1. Оценка стоимости линий связи при радиальной и квази-радиальной структуре телемеханической системы . . . . .	38
§ 3. 2. Оценка стоимости линий связи при кольцевой структуре телемеханической системы . . . . .	41
§ 3. 3. Оценка стоимости аппаратуры телемеханической системы управления на диспетчерском и исполнительном пунктах . . . . .	45
§ 3. 4. Оценка обобщенной стоимости аппаратуры телемеханической системы . . . . .	46
<b>Глава 4. Элементы функционально-статистической оптимизации структур телемеханических систем . . . . .</b>	<b>49</b>
Введение . . . . .	49
§ 4. 1. Количество информации, получаемое телемеханической системой . . . . .	50
§ 4. 2. Обобщенный функционально-статистический критерий оценки эффективности и оптимизации . . . . .	51

	Стр.
§ 4. 3. Алгоритм синтеза оптимальной структуры телемеханической системы . . . . .	51
<b>Глава 5. Элементы синтеза телемеханических структур . . . . .</b>	<b>53</b>
<b>Введение . . . . .</b>	<b>53</b>
§ 5. 1. Построение моделей структур радиальной и кольцевой телемеханических систем . . . . .	53
§ 5. 2. Вероятность принятия сигнала на исполнительный пункт в кольцевой структуре . . . . .	56
§ 5. 3. Надежность выполнения операций оператором . . . . .	59
§ 5. 4. Надежность аппаратуры диспетчерского пункта и запасного диспетчерского пунктов . . . . .	60
§ 5. 5. Надежность участка линии связи . . . . .	61
§ 5. 6. Надежность аппаратуры исполнительного пункта . . . . .	61
§ 5. 7. Надежность срабатывания $k$ из $m$ систем при резервировании . . . . .	62
§ 5. 8. Некоторые особенности оценки надежности телемеханической системы, построенной по радиальной структуре . . . . .	63
§ 5. 9. Сравнительная оценка стоимости двух телемеханических систем . . . . .	63
§ 5. 10. Стоимость линий связи . . . . .	64
§ 5. 11. Сравнительная оценка двух телемеханических систем контроля и управления . . . . .	64
<b>Глава 6. Выбор оптимальной структуры телемеханических систем контроля и управления районом . . . . .</b>	<b>66</b>
<b>Введение . . . . .</b>	<b>66</b>
§ 6. 1. Некоторые положения о размещении центрального диспетчерского пункта . . . . .	68
§ 6. 2. Сравнительная оценка надежности различных систем управления районом . . . . .	69
§ 6. 3. Сравнительная оценка стоимости телемеханических систем управления районом . . . . .	70
§ 6. 4. Влияние схемы защиты от ложных сигналов управления на общую надежность . . . . .	71
<b>Литература . . . . .</b>	<b>74</b>

Техн. редактор *З. М. Синицына*

Ст. корректор *А. И. Шахова*

Г-246029

Подписано к печати 25-II-67 г.  
Формат бум. 60 × 84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>

Объем 4<sup>3</sup>/<sub>4</sub> п. л.

1203

Типография ХВКИУ

## О П Е Ч А Т К И

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть
7	11 сверху	комплектom	комплексom
8	3 снизу	ее	их
18	9 "	электрических связей	электрических сетей
19	3 "	командным	диспетчерским
25	4 "	одной и, дугя вляется	одной является
29	5 "	$z = \frac{1}{8}(c - 2w + 4x)$	$z = \frac{1}{8}(c - 2w - 4x)$
51	7 "	предположенным	предложенным
60	11 "	развертывание	резервирование