

И.И. ПАСЕЧНИКОВ

**МЕТОДОЛОГИЯ
АНАЛИЗА И СИНТЕЗА
ПРЕДЕЛЬНО НАГРУЖЕННЫХ
ИНФОРМАЦИОННЫХ СЕТЕЙ**

**МОСКВА
«ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ-1»
2004**

И.И. ПАСЕЧНИКОВ

**МЕТОДОЛОГИЯ
АНАЛИЗА И СИНТЕЗА
ПРЕДЕЛЬНО НАГРУЖЕННЫХ
ИНФОРМАЦИОННЫХ СЕТЕЙ**

МОСКВА
«ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ-1»
2004

УДК 621.396
ББК ←88-01
П19

Рецензенты:

Доктор физико-математических наук, профессор,
Заслуженный деятель науки РФ, академик РАЕН
В.Ф. Крапивин,

Доктор физико-математических наук, профессор,
член-корреспондент АИН им. А.М. Прохорова
Е.Ф. Кустов

Пасечников И.И.

П19 Методология анализа и синтеза предельно нагруженных информационных сетей. М.: «Издательство Машиностроение-1», 2004. 216 с.

Рассматривается тензорная методология анализа и синтеза информационных сетей, находящихся в условиях воздействия высокого входного трафика. Проведена геометризация информационных процессов с целью осуществления тензорного анализа – исследования системы в окрестности точ-

ки, близкой к предельному состоянию. Применен тензорный анализ к информационным сетям. На основе аналогии с физическими системами введены обобщенный показатель эффективности информационного обмена в цифровых сетях – кибернетическая мощность и КПД в смысле передачи информации. Показана возможность использования детерминированных самоподобных структур в мобильных цифровых радиосетях, которые могут быть использованы для определения систем координат в пространствах путей при их тензорном анализе.

Книга предназначена для разработчиков цифровых сетей связи, специалистов, занимающихся проблемами обработки и передачи информации в современных системах связи, аспирантов и студентов вузов соответствующих специальностей.

УДК 621.396

ББК ←88-01

ISBN 5-92475-119-6

© Пасечников И.И., 2004

© «Издательство Машиностроение-1», 2004

Научное издание

ПАСЕЧНИКОВ Иван Иванович

МЕТОДОЛОГИЯ
АНАЛИЗА И СИНТЕЗА
ПРЕДЕЛЬНО НАГРУЖЕННЫХ
ИНФОРМАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

Монография

Редактор Т.М. Глинка

Инженер по компьютерному макетированию Т.А. Сынова

Подписано к печати 25.03.2004

Формат 60 × 84/16. Гарнитура Times. Бумага офсетная. Печать офсетная

Объем: 12,55 усл. печ. л.; 12,00 уч.-изд. л.

Тираж 400 экз. С. 275^М

«Издательство Машиностроение-1»,
107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Подготовлено к печати и отпечатано в издательско-полиграфическом центре
Тамбовского государственного технического университета
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ИС –	информационная сеть;
ССС –	спутниковая сеть связи;
ЦРС –	цифровая радиосеть;
ПРС –	пакетная радиосеть;
ЛВС –	локальная вычислительная сеть;
ЭМВОС –	эталонная модель взаимодействия открытых систем;
МККТТ –	международный консультативный комитет по телеграфии и телефонии;
ОА-пара –	пара отправитель-адресат;
МТ –	маршрутная таблица;
ЛС –	линия связи;
КС –	канал связи;
ГЗК –	групповой запросный канал;
ФК –	функциональный канал;
КЭ –	кибернетический элемент;
УН –	устройство накопления;
УК –	узел коммутации;
ОС –	одноканальная система;
ОПП –	обслуживание в порядке поступления;
ООП –	обслуживание в обратном порядке;
МД –	множественный доступ;
СМД –	случайный множественный доступ;
МДКН –	множественный доступ с контролем несущей;
МДВР –	множественный доступ с временным разделением;
МДРВР –	множественный доступ с распределенным временем разделения;
СМО –	система массового обслуживания;
ТНМ –	теория нечетких множеств;
УКВ –	ультракороткие волны;
ДКМ –	декаметровый (диапазон);
ALOHA –	метод простого случайного множественного доступа.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Работа посвящена решению следующих проблем анализа и синтеза информационных сетей связи (ИС):

1. Используемые аналитические методы расчета ИС, основанные на теории систем массового обслуживания (СМО) и построенные на сетях Дж. Джексона и аппроксимации независимости Л. Клейн-рока, изначально лишены информации о структуре сети, так как для получения одноканальной модели СМО произведено преднамеренное ее разрушение. В связи с этим, сети со сложными структурами исследуются только имитационными моделями. Представляя современную ИС некоторым объектом с сетевыми процессами внутри него, а также учитывая указанную выше проблему, следует использовать методологию расчета, которая не зависит от сложности сети и используемых в ней алгоритмов.

2. В настоящее время математические модели ИС, описывающие информационный обмен, не предполагают в формуле поведения их структурную организацию, которая, в свою очередь, существенно определяет сетевые информационные характеристики. Методы анализа и синтеза ИС должны основываться на единстве топологии сети и процессов, протекающих в ней. Совместно с параметрами потоков

формула поведения ИС должна включать параметр структуры сети, учитывающий ее возможные преобразования.

3. Оценка эффективности информационного обмена в ИС в настоящее время основывается на определении ее вероятностно-временных характеристик и производительности сети. Данные параметры не позволяют показать близость сети к ее предельным возможностям в смысле передачи информации. В связи с этим существует необходимость определения в указанном смысле обобщенного параметра, модели идеальной сети и, следовательно, КПД в смысле передачи информации.

4. В моделях мобильных цифровых радиосетей (ЦРС) – например, пакетных радиосетей (ПРС) УКВ-диапазона – применяются случайные топологии, в то время как их функционирование не предполагает случайности структурных элементов на интервале рассмотрения. Поэтому, с целью повышения эффективности ПРС, должен иметь место детерминированный подход к формированию их топологии с учетом мобильности и высокой связности.

5. Указанные вопросы являются крайне проблематичными в условиях высокого входного трафика, когда ИС находится в сопредельном состоянии. В этом случае каналы связи (КС) заняты непрерывной передачей информации, а устройства накопления (УН) узлов коммутации (УК) заполнены сообщениями, ожидающими в очередях дальнейших передач. Проблема заключается в совмещении пространств КС и путей с целью исследования окрестности точки состояния ИС. В результате должна учитываться не только динамика путевых потоков, но и энтропия, привносимая особенностями топологии сети, используемыми в ней протоколами и интерфейсами.

В книге ряд сетевых задач исследован машинным моделированием, с достаточно детальным отображением особенностей построения сетей, с процессами обмена информацией. Вместе с тем отсутствует решение сопутствующих (важных, на мой взгляд) задач, в частности апробация на имитационной модели исследования окрестности точки сопредельного состояния ИС. Несмотря на это, на основе математического аппарата тензорного анализа, я попытался отобразить все принципиально важные информационные процессы в сети и связи между ними.

Данная работа стала возможной благодаря тем людям, которые помогали, поддерживали, направляли и всячески способствовали моим исследованиям и занятию интересными и важными вопросами теории информационных систем.

Особую признательность выражаю д-ру техн. наук, проф. П.Г. Гореву за постоянную поддержку в творческой работе, кафедре радиосвязи Харьковского ВВАУРЭ. Благодаря ему и коллективу кафедры мне посчастливилось учиться в адъюнктуре в ВВИА им. Н.Е. Жуковского. Научная школа кафедры № 43 ВВИА, сформированная д-ром техн.

наук, проф. В.И. Тихоновым и коллективом замечательных ученых – д-ром техн. наук, проф. Ю.Н. Бакаевым, д-ром техн. наук, проф.

В.А. Смирновым, д-ром техн. наук, проф. В.С. Ефименко, канд. техн. наук, с.н.с. В.Н. Харисовым, канд. техн. наук, с.н.с. Л.А. Ершовым и др., определила мое научное направление, и я безмерно счастлив, что имел возможность обучаться и работать рядом с такими людьми. Особую благодарность выражаю своему руководителю в адъюнктуре начальнику кафедры, д-ру техн. наук, проф. В.А. Смирнову. Большую помощь в творческой работе мне оказывал канд. техн. наук Я.Г. Дунчич, которого я считаю своим другом и наставником.

Выражаю большую благодарность моему консультанту д-ру физ.-мат. наук, проф. Т.Я. Гораздовскому. Тадэуш Янушевич обратил мое внимание на детерминированный подход в сетях, возможность использования теории нечетких множеств (ТНМ) в ИС, поддержал в необходимости введения обобщенного параметра для ИС – кибернетической мощности, в правильности выбранного математического аппарата, его значимости.

Большое спасибо за общение и поддержку в научной работе д-ру техн. наук, проф. Ю.Ю. Громову, д-ру техн. наук, проф. А.А. Безбогову, д-ру техн. наук, с.н.с. В.И. Павлову.

Благодарю моих адъюнктов канд. техн. наук А.П. Горева, канд. техн. наук В.В. Желонкина, канд. техн. наук А.М. Межуева и Е.В. Головченко за трудолюбие в решении прикладных задач и помощь в оформительской работе.

Огромное спасибо хочу сказать моей любимой жене Виктории, которая терпела все вызванные моей работой трудности, постоянно меня поддерживала, а иногда просто помогала.

Автор

ВВЕДЕНИЕ

ЗАБЫТАЯ МЫСЛЬ – ПОТЕРЯННЫЙ КЛАД.

Т. ГОРАЗДОВСКИЙ

Под ИС будем понимать современные цифровые коммуникационные сети, в которых реализован принцип передачи информации с промежуточным хранением. К ним относятся как локальные вычислительные сети (ЛВС), так и ПРС, спутниковые сети связи (ССС).

Теоретические основы ИС представлены рядом известных публикаций и монографий. К их числу необходимо отнести работы [1 – 16] и др., а также работы по теории графов [17 – 22], теории систем массового обслуживания (СМО) [23, 24], ТНМ [25 – 36], в последнее время по теории фракталов [37 – 39]. Цифровые радиосети, их организация в сложную топологическую и функциональную структуру сетей радиосвязи с пакетной коммутацией и проблемы множественного доступа (МД) рассмотрены в монографии [40]. В работе [41] исследованы алгоритмы управления автоматизированной системой радиосвязи, в том числе ее ресурсом, на основе методов теории игр. Основные разработки и перспективы развития ПРС различного назначения системно представлены в тематическом выпуске журнала ТИИЭР (Т. 75, 1987).

Данная работа вызвана необходимостью определения степени близости ИС к идеальности в смысле передачи информации, а также повышения эффективности предельно нагруженной ИС на основе определения пути решения единой сетевой задачи, рассматривающей топологию сети и процессы в ней как неотъемлемые компоненты расчета. Информационную сеть необходимо представлять при этом сложным объектом с внутренними процессами сетевого уровня.

В настоящее время в основу теоретического решения сетевых задач положена модель Дж. Джексона¹, в которой используется аппроксимация независимости Л. Клейнрока, позволяющая применить в теории сетей связи аппарат теории СМО. Использование при этом диффузионных моделей [2] не позволяет приблизить точность расчетов к практическим результатам, а иногда получить даже приближенные оценки. В связи с этим в настоящее время информационный обмен в ИС исследуется путем имитационного моделирования на ЭВМ. Учет протяженных статистических зависимостей временной задержки сообщений при прохождении их через ИС, с целью прогнозирования пропускных способностей каналов, производится на основе применения теории фракталов [39].

Причиной невозможности применения современных аналитических методов расчета к моделям ИС, особенно со сложными топологиями, является то, что они, основываясь на стохастической природе входного трафика, формируют вероятностные математические модели² теории СМО, которые не предполагают использование информации о структуре сети. Реализация приближенных аналитических расчетов основана на модели сети Дж. Джексона, в которой сложный клубок связей между КС был «разрублен» и каждый КС рассматривался как отдельно взятый, погруженный в сеть, имеющий пуассоновский поток событий на входе³ и случайный закон обслуживания. При этом входной поток поступления сообщений и время их обслуживания считаются независимыми. Аппроксимация независимости Л. Клейнрока позволила время обслуживания связать с некоторой средней величиной путем использования также экспоненциального закона. Это привело к применению в моделях ИС математического аппарата СМО и тем самым к определению некоторых границ временных задержек.

Необходимо заметить: структура сети связи преднамеренно разрушена (и информация о ней не используется), в то время как от нее существенно зависят все сетевые характеристики. Усугубляется ситуация высоким входным трафиком. Неэффективное его распределение в ИС может привести к перегрузке сети (из-за перегрузки некоторых КС) и в дальнейшем к ее возможному сбою.

В связи с этим, проблемой особой важности для ИС является их предельно нагруженное (или близкое к нему – сопредельное) состояние, т.е. когда из-за большого входного трафика все КС находятся в режиме передачи, а УН узлов коммутации заполнены сообщениями. В этом случае изменения состояний УН и КС могут быть аппроксимированы кусочно-линейными участками. Так как, во-первых, процессы передачи информации в каждом КС и УН ИС являются идентичными, во-вторых, формула Литтла [2 – 4, 6] справедлива как при описании сети в стационарном состоянии, так и ее элементов – одноканальных систем (ОС), то имеется возможность применить для анализа ИС тензорную методологию по аналогии с электрическими сетями Г. Крона [43 – 46], а с целью учета динамики путевых потоков и их взаимного информационного влияния – использовать тензорный анализ [47 – 54]. Изменение состояния ИС при тензорной методологии рассматривается как преобразования в системе координат. В качестве инварианта, используемого в процессе преобразований величин формулы поведения, применен обобщенный параметр – кибернетическая мощность сети [55]. Ее приращение служит инвариантом при решении задачи тензорного анализа. В определении значений параметров сети важную роль играет тензор преобразования. Изменение его компонент соответствует изменению системы координат, которая непосредственно зависит от топологии. Введенное в работе понятие кибернетической мощности позволяет определить степень близости ИС к идеальности, а именно определить ее КПД в смысле передачи информации.

Для осуществления тензорного анализа в работе проведена геометризация информационных процессов, в том числе на сетевом уровне. Введены понятия информационных пространств КС и путей, определены символы Кристоффеля для ИС, показан параллельный перенос вектора приращения состояния сети в криволинейном путевом пространстве, определено понятие ковариантной производной количества информации. Тензорный анализ позволяет прогнозировать состояние сети на интервале рассмотрения не только на основе динамики информационных потоков, но и с учетом топологии сети, а также используемых в ней протоколов и интерфейсов.

Важно отметить: введенная метрика пространств состояний КС и путей, описываемая с помощью метрических тензоров, позволяет связать процессы в КС и путях через обобщенный параметр – кибернетическую мощность. Ее реактивная (бесполезная) составляющая характеризуется потерями на $\cos \varphi$ (аналогично физическим системам). Косинусы углов в метрике состояний КС дают возможность при

¹ Модель описана в работах [2, 6].

² В работе [42] задача синтеза решается в классической постановке Л. Клейнрока. Отличительной особенностью является использование ТНМ для описания нечетко заданных параметров нагрузки.

³ Важной теоремой о входных и выходных потоках в каналах является теорема Бурке, изложенная в [1].

формировании топологий ИС использовать аппарат ТНМ, где функции принадлежности, принимающие значения в интервале $[0, 1]$, связаны со значениям этих косинусов. Таким образом, появилась возможность связать аналитически пространства-структуры с пространством состояний ИС и оценить сеть понятием кпд.

В качестве эпиграфа к работе служат слова замечательного человека профессора Т.Я. Гораздовского, которыми мне хотелось отметить следующее. Давно известная тензорная методология Г. Крона (50-е гг. прошлого столетия) именно в настоящее время, когда имеют место большие и все возрастающие информационные нагрузки на ИС, является ключом к решению сетевых задач⁴. Структуры ИС и путевые потоки определяют систему координат, а следовательно, характеризуют информационное пространство. Сами процессы в данной системе координат с использованием формулы поведения определяют состояние сети. В точке сопредельного состояния ИС необходимо исследование ее окрестности с учетом динамики путевых потоков и их пересеченности в путевом пространстве. Решение этой задачи производится уже на основе тензорного анализа.

В первом разделе коротко показаны основные подходы решения сетевых задач, их информационная эффективность, необходимость при описании процессов информационного обмена учета топологии сетей. Указаны ограничения в модельном отображении ИС. Исходя из принятых ограничений, осуществлена идеализация процессов, которая позволяет конкретизировать направления исследования ИС в смысле эффективности передачи сообщений. Приведен обобщенный параметр, учитывающий все информационные свойства ИС. Осуществлена постановка задачи исследования.

Во втором разделе проведена аналогия информационных процессов с физическими явлениями, выведена размерность обобщенного параметра – кибернетической мощности для ИС, определен коэффициент полезного действия в смысле передачи информации. Проведено имитационное моделирование УКВ ПРС с различными алгоритмами маршрутизации. На сравнительном анализе оценки эффективности с использованием обычных показателей эффективности и вновь введенного обобщенного параметра показана объективность введения и преимущества такого параметра.

В третьем разделе решается задача применения детерминированного подхода при формировании топологий мобильных ЦРС, в которых УК могут выходить из строя, КС – менять значение качества передачи информации. Необходимость решения этой задачи обусловлена использованием фиксированной, на интервале рассмотрения, топологии для определения системы координат информационного пространства состояний сети. Одновременно с этим учитывается преимущество организации эффективного информационного обмена в регулярных структурах перед случайными. Для решения указанной выше задачи предлагается использовать структурную избыточность сетей со случайными топологиями и формирование топологий на основе ТНМ, в которых учитывается различная степень принадлежности УК (или КС) к действующей ЦРС. Приведен метод формирования сложных топологий с нечеткими границами (с выраженной фрактальной структурой), определяющими различные уровни принадлежности к сети, который основан на расширении ТНМ в смысле Гогена [28].

В четвертом разделе показана тензорная методология анализа ИС, подход к ее синтезу. Рассмотрен обобщенный параметр сети – кибернетическая мощность как инвариант, относительно которого осуществлено преобразование основных характеристик сети. Приведены формулы преобразования основных характеристик сети с использованием тензора преобразования. Показано формирование тензора преобразования. Предложена ортогональная модель ИС, позволяющая учитывать как входной, так и внутри-сетевой трафики, а также возможность влияния помеховой обстановки.

Пятый раздел посвящен прикладным задачам определения информационной эффективности нагруженных ЦРС с использованием тензорной методологии и параметра «кибернетическая мощность». Произведены расчеты кпд в смысле передачи информации. Использована ортогональная модель, предложенная в четвертом разделе. Особенностью модели является предполагаемая стационарность основных исходных величин. В целях определения степени близости предложенного анализа к результатам имитационного моделирования разработаны модели на языке СМО GPSS/PC. В результате сравнения показана достаточно высокая степень сходства характеристик, что подтверждает правомерность применения аналитического метода расчета сетей на основе тензорной методологии.

⁴ В работе [45] рассмотрена тензорная методология сложных систем. Методом моделирования автором показана инвариантность полной мощности сети (Г. Кроном инвариантность мощности постулирована). Примером использования тензорной методологии послужило решение экономической задачи. Тензорная методология построения баз данных показана в работе [56], а ее использование для определения вероятностно-временных характеристик интегральных сетей – в [57]. Там же показана возможность ее использования в теории надежности интегральных сетей.

Исследование ИС в окрестности точки сопредельного состояния требует проведения тензорного анализа, где все информационные потоки и состояния КС должны быть связаны между собой дифференциальной зависимостью. Для этого в шестом разделе проведена геометризация информационных процессов в ИС, в том числе и для условий помеховой ситуации. Информационное пространство состояний КС представлено евклидовым пространством с определенным метрическим тензором, размерность которого определяется числом ОС (в том числе КС и УН по отдельности). Для представления информационного путевого пространства в сети из заданного числа ОС (КС и УН) в определенное ими евклидово пространство «вложено» криволинейное пространство, система координат которого задается линейно независимыми путевыми потоками [определенными при анализе тензорной методологией (разд. 4, 5)]. Показано, что приращение кибернетической мощности в окрестности точки состояния в точности соответствует квадратичной форме Римана! Раскрыта суть метрических тензоров в соответствующих пространствах. Касательная плоскость в точке сопредельного состояния путевого пространства определяет локальную, на интервале рассмотрения – оптимальную, маршрутизацию. Ее движение в окрестности точки описывает коррекцию маршрутизации на интервале.

Седьмой раздел посвящен тензорному анализу, который позволяет исследовать сеть в окрестности точки ее состояния. Определены понятия одновременного взаимного влияния путевых потоков, раскрыта

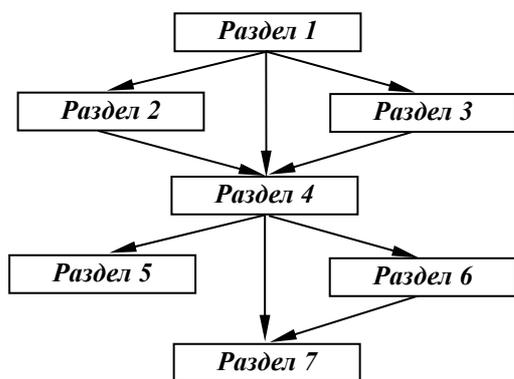


РИС. В.1

суть символов Кристоффеля для ИС, параллельного переноса вектора линейного приращения состояния сети. Определено понятие ковариантной производной и дифференциала в терминах информатики.

Взаимосвязь разделов работы представлена блок-схемой на рис. В.1.

1. ПРОБЛЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В НАГРУЖЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СЕТЯХ

Надежная доставка цифровых сигналов между передающим и приемным устройствами в ИС обеспечивается канальным уровнем, который, в свою очередь, основывается на качественном решении задач физического уровня. В силу, во-первых, особой сложности этих задач в радиосетях, во-вторых, когда они имеют принципиальное значение в исследуемой проблеме, в качестве ИС будут рассматриваться ЦРС, в случае, когда передаваемые сигналы предполагаются заданной, фиксированной длины (информационные пакеты) – ПРС.

Примером организации широкого спектра применяемых мер для повышения надежности передачи сигналов являются ЦРС. В этих системах используются сигналы с низким уровнем внеполосного излучения, применяются помехоустойчивое кодирование, программная перестройка рабочей частоты [58], адаптивное управление уровнем мощности приемопередатчиков [59], пространственно-временная обработка сигналов [60], адаптивное управление остронаправленными диаграммами направленности антенн [61]. Применение высоких технологий производства оборудования систем связи позволяет обеспечить крайне низкую вероятность искажений на бит сообщения. Например, в ЦРС DDN (Defence Digital Network) [10]: вероятность искажения бита для ГВМ с использованием интерфейсов LH/DH и HDH соответственно равна 10^{-18} и 10^{-19} .

Основываясь на анализе задач канального уровня [60, 62 – 66], автор в работе использует следующее предположение: любой КС сети обеспечивает заданную скорость передачи информации с необходимой достоверностью. Поэтому далее рассмотрим вопросы совместного функционирования всех КС в единой системе – ИС и существующие в ней проблемы информационного обмена в условиях высокого трафика.

1.1. ПРОБЛЕМА МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА В ИНФОРМАЦИОННЫХ СЕТЯХ

Объектом передачи в ИС являются сообщения или их части, т.е. пакеты. В связи с этим самостоятельно передающиеся по сети информационно неделимые блоки – пакеты или сообщения целиком – в дальнейшем будем называть информационными цугами⁵ или инфцугами. Использование данного понятия обусловлено, с одной стороны, отсутствием принципиальной разницы транслируемых информационных единиц – пакет, сообщение, которые представляют собой неделимую в процессе передач последовательность битов или байтов, с другой – самостоятельностью информационного блока в процессе передачи по сети, т.е. обозначением объекта передачи.

Рассмотрим вопросы подуровня управления доступом к среде. На этом подуровне протокольным образом решается задача множественного доступа, т.е. совместного использования абонентами общего ресурса канала. В общем случае можно выделить два полярных подхода к использованию общего ресурса: случайный множественный доступ (СМД) и множественный доступ с закреплением ресурса, например, с временным, частотным, кодовым разделением или их комбинациями.

Эффективность использования каналов при СМД. В условиях, когда передача инфцугов из-за СМД затруднена (большое количество конфликтных ситуаций), сеть переходит через неустойчивое состояние в нежелательное устойчивое состояние: входной трафик перестает обслуживаться вследствие неразрешенности конфликтов и происходит переполнение УН в УК. Поэтому важными являются условия желательной устойчивости сети, т.е. когда во всех УН с вероятностью, близкой к единице, длины очередей инфцугов не стремятся к бесконечности с течением времени. Такие достаточные условия определены для модели сети с пакетной коммутацией [67] (где рассмотрен вариант сети с иерархической структурой), в которой использованы протоколы синхронной и асинхронной АЛОНА. Например, для радиосети с захватом⁶, имеющей структуру в виде лингвистической решетки, при оптимальной вероятности передачи $p = 0,382$ [67] условие устойчивости соответствует малому коэффициенту использования линии передачи маршрутом, а именно: $\rho < 0,1802$.

СМД типа АЛОНА [2, 4, 6] и его разновидности являются достаточно эффективными в условиях слабой информационной нагрузки. При передаче инфцугов они принципиально предполагают наличие конфликтов из-за попыток одновременного использования канала разными абонентами, разрешение которых осуществляется повторными передачами. Для стабилизированной синхронной АЛОНА задержка инфцугов неограниченно растет при приближении скорости их поступления в систему к значению $1/e$. Повышение эффективности информационной системы возможно на основе использования алгоритмов разбиения, в том числе древовидной структуры, и различных порядков передачи. Максимальное значе-

⁵ Запряжка лошадей гуськом (толковый словарь русского языка С.И. Ожегова и Н.Ю. Шведова). В рассматриваемом случае смысл аналогичен для последовательности битов или байтов.

⁶ Под захватом понимается способность цифрового приемника безошибочно декодировать, как минимум, один инфцуг из совокупности одновременно присутствующих на его входе.

ние скорости устойчивой передачи при этом лежит в пределах от 0,4878 до 0,587⁷. На практике в высокоскоростной сети Ethernet с СМД, согласно сведениям [68], среда используется всего на 10...20 %. Высокая скорость передачи данных по КС при большом входном трафике не является принципиальным условием высокой эффективности информационного обмена в сети. Так, например, ЛВС типа Ethernet имеют наибольшую скорость передачи данных (10 Мбит/с) по сравнению с сетями Token Ring (4 Мбит/с) и Arcnet (2 Мбит/с), однако последние при больших нагрузках оказываются эффективнее [69].

Замечание 1. В условиях высокого входного трафика разновидности СМД являются неэффективными с точки зрения информационного обмена.

Применение контроля несущей в ПРС. Использование множественного доступа с контролем несущей (МДКН) может незначительно повысить коэффициент использования общего канала, причем его эффективность зависит от отношения мертвого времени контроля несущей к средней длительности инфцуга (параметр α). Так, например, в узкополосных ПРС с МДКН [70] с однопролетной топологией при случайном потоке заявок на предоставление ресурсов от всех пользователей скорость передачи подтвержденных данных достигает всего 60 %. Это означает, что передача 40 % инфцугов не гарантируется. В работе [71] показано, что в многопролетных сетях, использующих МДКН, из-за наличия эффектов затенения терминалов производительность, по сравнению с синхронной АЛОНА, может быть улучшена всего на 16 %. Оказывается, даже при незначительном проявлении такого эффекта характеристики МДКН резко ухудшаются.

Замечание 2. Контроль несущей при множественном доступе повышает эффективность коллективного использования общего ресурса системы, однако, она существенно зависит от топологии сети.

Результаты исследования СМД имеются во всех основных источниках по сетям передачи данных (сетям связи), во многих монографиях и публикациях другого рода (в указанных ранее, а также в [72, 73]), в том числе в материалах журнала «Автоматика и телемеханика» в разделе «Системы массового обслуживания». Особенностью СМД в широкополосных системах является то, что наряду с принимаемым сигналом множество других присутствующих в этот момент мешающих сигналов представляет помеховый фон. В результате такого наложения сигналов потери, как минимум одного из них, с большой вероятностью не происходит, т.е. осуществляется захват сигнала. При этом важным параметром является граница вероятности ошибки декодирования. Полученные в работе [74] результаты показывают, что, например, при несинхронном мешающем сигнале (наихудший случай) для числа мешающих пользователей $N = 50$, $N = 10$ и отношения сигнал/шум 5 дБ граница вероятности ошибки уменьшается от менее чем $P_e = 10^{-6}$ до 10^{-3} .

Замечание 3. На качество приема информации в ПРС существенное влияние оказывает плотность абонентов.

УЧЕТ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ФАКТОРА В МОБИЛЬНОЙ ПРС. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА ДОЛЖНО ПРЕДПОЛАГАТЬ УЧЕТ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ФАКТОРА, ОСОБЕННО ПРИ СЛАБОЙ СВЯЗНОСТИ СЕТИ. В РАБОТЕ [71] РАССМОТРЕНА ПРОБЛЕМА МНОГОКРАТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАНАЛА В ПРОСТРАНСТВЕ. ЕСЛИ В ЗОНЕ ОДНОГО УЗЛА СРЕДНЕЕ ЧИСЛО СОСЕДЕЙ ПРИНЯТЬ РАВНЫМ D , ТО ОПТИМАЛЬНОЕ ЧИСЛО УСПЕШНЫХ ПЕРЕДАЧ В ПРС СО СЛУЧАЙНОЙ СТРУКТУРОЙ (ВЕРХНЯЯ ГРАНИЦА) $F(D) = 1/D$. ЭТО ОЗНАЧАЕТ, ЧТО СРЕДНИЙ ТРАФИК, КОТОРЫЙ ДОЛЖЕН ПЕРЕДАВАТЬСЯ В ЗОНЕ РАДИОУСТАНОВКИ С КРУГОВОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ, ПРИБЛИЗИТЕЛЬНО ДОЛЖЕН СОСТАВЛЯТЬ ОДИН ИНФЦУГ НА ОДИН ВРЕМЕННОЙ СЕГМЕНТ. ТАМ ЖЕ ОТМЕЧЕНО, ЧТО ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМЫ АЛОНА СОСТАВЛЯЕТ 39,6 % ОТ РАССМОТРЕННОГО ПОРОГА, А ЭФФЕКТИВНОСТЬ МДКН – ТОЛЬКО 48,5 %.

Оптимальное решение задачи по определению наименьшего требуемого ресурса системы для абонентов ПРС в общем случае относится к классу NP-полных задач [6]. В связи с этим в работах [75 – 78] рассмотрены различные эвристические алгоритмы распределения ресурса системы – временных окон – с учетом пространственного фактора (т.е. с определением скрытых терминалов) и динамики топологии. За счет многократного использования общих окон пространственно разделенными абонентами число окон, необходимое для обес-

⁷ В модели алгоритмов предполагается отсутствие канала обратной связи с информацией о числе инфцугов, конфликтующих в рассматриваемом окне.

печения бесконфликтной передачи в сети, может быть существенно меньше общего числа абонентов, что, в свою очередь, позволяет повысить пропускную способность сети.

В работах [77 – 79] было проведено исследование эффективности использования пространственного фактора, где общий ресурс канала распределяется с учетом проблемы скрытого терминала. Рассматриваемая модель мобильной ПРС включает следующие особенности.

1. Топология сети описывается направленным графом $G = (N, L)$, где $N = \{1 \dots n\}$ – множество абонентов сети; $L = \{1 \dots l\}$ – множество линий связи (ЛС) между ними. Для каждого абонента $i \in N$ определено множество соседей C_i : абонент $j \neq i \in C_i$, если существует линия связи $(i, j) \in L$, и множество 2-соседей C_i^* : абонент $j \neq i \in C_i^*$, если существует хотя бы один абонент $k \neq i$ такой, что $(i, k) \in L$ и $(k, j) \in L$.

2. Передача информации между абонентами сети синхронизирована. Временная ось разбита на окна, длительность которых равна времени передачи инфцуга по каналу. Временные окна объединены в группы по m ($m \leq n$) окон. В пределах каждой группы окна пронумерованы от 1 до m , образуя цикл. Каждому абоненту $i \in N$ присваивается номер окна $m_i \in M = \{1 \dots m\}$, так что данный абонент передает свои инфцуги только в окнах с этим номером.

3. Если в некотором окне в точку приема поступает один инфцуг (нет конфликта), то он принимается безошибочно, в случае двух и более инфцугов успешно принимается один из них, а остальные теряются (идеальный захват). Передача абонентом инфцуга в окне не влияет на характеристики приема в этом окне для данного абонента.

4. Для сети определен количественный показатель K_n , характеризующий потери инфцугов при заданном алгоритме распределения окон между абонентами:

$$K_n = 1 - K_k,$$

где K_k характеризует «качество» распределения окон. Используем предположение: в каждом выделенном окне абоненты передают инфцуги (большая нагрузка), тогда K_k равен среднему по сети отношению фактического их числа, принятого некоторым абонентом за один цикл к числу инфцугов, которое при заданной связности сети могло бы быть принято за этот же цикл данным абонентом при полностью бесконфликтном распределении окон. Определение K_k имеет вид

$$K_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{x=1}^m f(i, x)}{\text{card } C_i}, \quad (1.1)$$

где $\text{card } C_i$ – мощность, или число элементов в множестве C_i , а функция

$$f(i, x) = \begin{cases} 1, & \text{если } \exists j \in C_i : x = m_j; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Другими словами, $f(i, x) = 1$, если x -е окно используется хотя бы одним соседом абонента i .

5. В модели мобильной ПРС рассмотрены два алгоритма распределения временных окон – централизованный (прил. 1) и децентрализованный (прил. 2).

Для исследования потерь количества информации в модели ПРС была использована универсальная система моделирования GPSS/PC. Результаты моделирования для сети из 20 абонентов со случайной топологией представлены на рис. 1.1.

Кривые 1, 2, 3 характеризуют коэффициент потерь в сети, соответственно: а) при централизованном алгоритме распределения окон; б) для децентрализованного алгоритма, при условии вхождения в сеть всех абонентов одновременно; в) для децентрализованного алгоритма при условии входа в сеть группами по пять абонентов. Сплошные кривые соответствуют ситуации, когда для каждого абонента существует пять соседей, пунктирные – 10 соседей.

Возможное использование алгоритмов зависит от области значений коэффициента потерь K_n , которая соответствует нормальному режиму работы сети, т.е. от области допустимых потерь. Область допустимых значений K_n существенно определяется применяемым алгоритмом маршрутизации. Например, в случае широковещательной маршрутизации допустимый K_n будет существенно выше, чем в сети с фиксированной маршрутизацией.

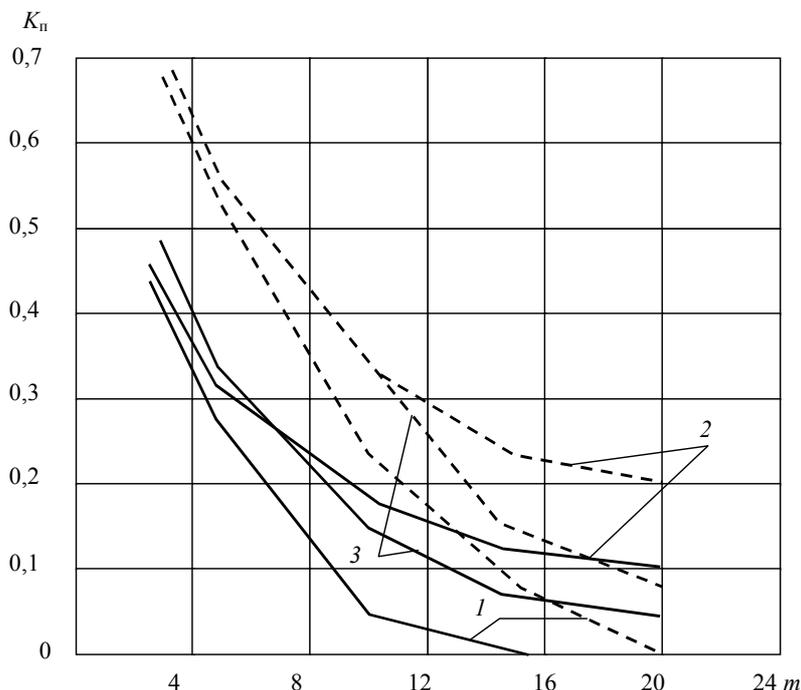


Рис. 1.1

Из рис. 1.1 видно, что различия характеристик централизованного и децентрализованного алгоритмов становятся менее существенными при уменьшении времени, которое требуется для реализации децентрализованного алгоритма, поскольку в этом случае снижается вероятность одновременного вхождения в сеть двух и более пользователей. Данный эффект иллюстрируется кривыми 3 (см. рис. 1.1).

Замечание 4. Эффективность централизованного алгоритма распределения ограниченного ресурса системы выше децентрализованного. На процедуру последнего существенно влияет динамика абонентов в сети.

Поэтому абонентам, регулярно пользующимся услугами ПРС, следует разумно, заранее, в централизованном порядке распределять системный ресурс.

Определение необходимого числа временных окон в сети с фиксированным числом абонентов и случайной топологией. Анализ рассмотренных алгоритмов распределения временных окон показывает, что в сети с высокой связностью возможны значительные потери инфцугов, если число окон меньше числа использующих их абонентов. Целью построенной ниже модели [78, 79] является определение необходимого числа временных окон в сети, с тем, чтобы исключить возможность возникновения конфликтных ситуаций. Модель ПРС также описывается направленным графом с множеством абонентов в сети $N \in \{1, \dots, n\}$, $n = 20, 30$ (для двух случаев). Вероятность $P_{св}$ существования ребра между двумя любыми абонентами задается таким образом, чтобы среднее число входящих ЛС в каждый узел составляло $l_{ср} = 3, 4, \dots, 10$, данные значения перекрывают весь диапазон требуемых временных окон с заданным числом абонентов.

Алгоритм присвоения временных окон каждому абоненту представлен в прил. 3. При моделировании была также использована система моделирования GPSS/PC. Результаты моделирования представлены на рис. 1.2.

Кривая 1 соответствует сети из 20 абонентов, а кривая 2 — из 30 абонентов. Из рисунка видно, что если вероятность связи в сети между любыми двумя абонента-

ми достаточно высока, то необходимость в использовании алгоритмов распределения временного ресурса канала с МД в условиях пространственного разделения абонентов отсутствует, так как необходимое число m временных окон при бесконфликтном распределении примерно равно числу абонентов в сети. Это подтверждается примером, что для сети из 30 абонентов с достаточно плохой связностью (вероятность связи $p \approx 0,3$) минимально потребное для избежания конфликтных ситуаций число окон примерно равно 25.

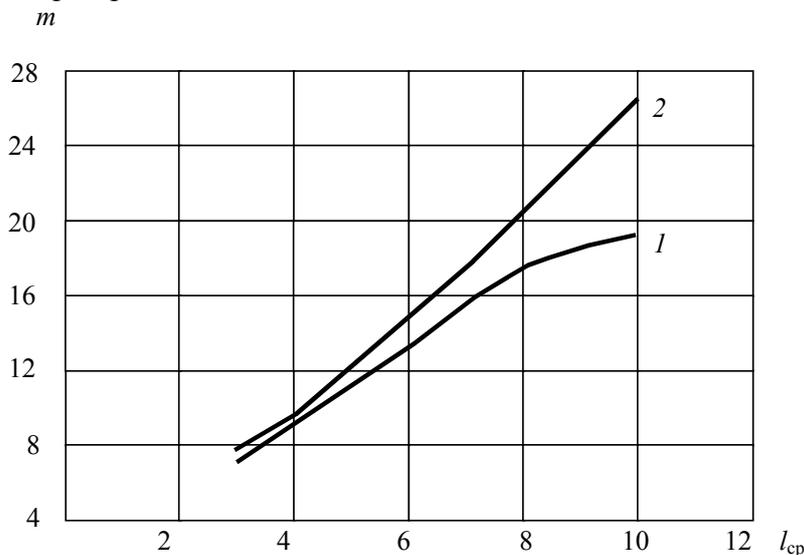


Рис. 1.2

З а м е ч а н и е 5. В сети с высокой связностью динамическое распределение ресурса системы с учетом пространственного фактора в пределах одного ретрансляционного участка неэффективно.

Одним из способов повышения скорости передачи в системах с МД является резервирование канала специальными запросными инфцугами, которые имеют существенно меньшую длину, чем пользовательские. Примером может служить двухпролетная ПРС системы JTIDS-II [80] с использованием группового запросного канала (ГЗК). С помощью ГЗК организуется ПРС численностью не более 31 подвижного абонента. Число абонентов обусловлено особенностью системного построения, а именно использованием канала двухсторонней активной синхронизации. В ГЗК также используется СМД, однако, конфликтных ситуаций меньше из-за использования служебных инфцугов короткой длины и разности времени их прихода в точку приема.

Другим вариантом множественного доступа является комбинация СМД с регулярной структурой общего канала, деление которого осуществляется по информационным признакам, т.е. в сети формируется функциональный канал (ФК) для обмена служебной информацией, «окрашенный» параметрами, обеспечивающими маршрутизацию [78, 81 – 83]. Реализация алгоритма также основана на явлении захвата и позволяет каждые две минуты обновлять все маршрутные таблицы (МТ) абонентов сети. Результаты моделирования [78, 81 – 83] показали высокую реакцию радиосети на изменения ее топологии. Однако рассмотренная модель не рассчитана на учет асимметрии каналов, которая появляется в результате присутствия постановщиков преднамеренных помех. Этот факт существенно ухудшает качество решения задачи маршрутизации [78].

В работе [40] проведены исследования различных протоколов МД для широкополосных (УКВ) и узкополосных (ДКМ) ПРС. С целью определения эффективности алгоритмов МД авторами осуществлен их многокритериальный анализ, в основу которого положены бинарные отношения предпочтения на основе методов ЭЛЕКТРА, Подиновского и порядковой оптимизации. Авторами сделан вывод, что наилучшего варианта МД в ПРС для любых условий функционирования не существует.

Таким образом, для связной ИС с большим числом абонентов, решение проблемы МД в КС должно учитывать достоинства различных алгоритмов МД, исходя из трафика и топологии сети. Это означает, что множественный доступ является составной частью единой задачи передачи информации, которая существенно определяется топологией и взаимодействием информационных процессов в сети.

1.2. ВЛИЯНИЕ ТОПОЛОГИИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИФРОВЫХ РАДИОСЕТЕЙ

Топология в подвижных радиосетях, работающих в условиях помех, как правило, принимается случайной или произвольной. Известно (теорема 7.1 [1]), что для повышения эффективности информационного обмена в сетях необходимо концентрировать потоки в направлении адресатов через одиночные каналы. Это объясняется минимизацией временной задержки инфцугов. С другой стороны, концентрация потоков приводит к звездообразной структуре сети, в которой средняя длина маршрута равна двум (уязвимость сети в данном контексте не рассматривается). Для минимизации временной задержки передаваемых инфцугов необходимо уменьшать число транзитных участков (в рассматриваемом случае с двух до одного), т.е. использовать линии непосредственной связи, что в итоге приведет к «распылению» информационных потоков. Л. Клейнрок экспериментально определил [1], что соотношение средней длины маршрутов и степени концентрации потоков сильно зависит от отношения средней скорости поступления инфцугов к общей емкости сети. В частности, при фиксированной маршрутизации и слабой нагрузке рекомендуется звездообразная структура, при большой нагрузке – полносвязная.

Как правило, алгоритмы построения топологии ИС являются эвристическими [1, 2, 4, 6]. Основное требование к ним – обеспечение надежности или k -связности. В то же время, оказывая существенное влияние на протоколы, основанные на информационном взаимодействии всех УК сети, топология в динамике ухудшает характеристики сети. Пример результата передач инфцугов в тактических радиосетях с МДКН [70] при $\alpha = 0,05$ показывает, что передача информации в процентах от пропускной способности для многопролетной радиосети падает от 60 % для статической топологии до 25...30 % для динамической.

Оптимизация структуры приводит к линейной зависимости [71] локальной пропускной способности от числа узлов в сети. Если учитывать число транзитных участков между узлами, задействованных для передачи инфцугов, то пропускная способность сети будет прямо пропорциональна квадратному корню из числа узлов. Проведенный там же анализ показывает, что для максимизации пропускной способности следует использовать небольшие значения среднего числа соседних узлов. В сетях с регулярной структурой следует вводить максимальные ограничения [71]: каждый узел должен иметь только три соседних узла. Пространственная модель оптимальной детерминированной структуры представлена в [84], где с угловым диаметром 60° на сфере размещаются касающиеся диски. Так, для восьми дисков это размещение будет соответствовать нахождению дисков в вершинах куба, а для 12 – в вершинах икосаэдра.

С целью исключения неопределенности при нахождении УК на нужном направлении, в сетях со случайной структурой необходимо выбирать большее количество соседних УК. Согласно [71], рекомендуемое число соседей находится в диапазоне от шести до восьми.

В работе [85] разработан алгоритм управления динамичной топологией для каждого узла ПРС, который основан на применении Делоне триангуляции к структуре с пуассоновским распределением узлов

(с заданным параметром на единицу площади). В результате формируется практически регулярная и однородная структура за счет максимизации минимальных углов всех треугольников в плоской триангуляции, т.е. делается попытка сделать все треугольники более или менее равносторонними. В результате проведенных автором исследований полученная таким образом сеть обладает большей производительностью и надежностью по сравнению с обычными случайными структурами.

З а м е ч а н и е 6. Динамика топологии ухудшает эффективность передачи информации в сети. Ситуация усугубляется случайностью топологии. Для надежной доставки инфцугов связность сети со случайной структурой должна быть существенно большей (в два и более раза [71]), чем для детерминированной.

1.3. МАРШРУТИЗАЦИЯ В ПАКЕТНЫХ РАДИОСЕТЯХ

Существующие на практике алгоритмы маршрутизации [2 – 4, 6, 40, 85 – 88], приведенные в сводной табл. 1.1, в большой степени соответствуют алгоритмам, описанным в работе [40]. В основном ал-

горитмы сведены к задачам выбора кратчайшего пути минимальной стоимости⁸. Как правило, стоимость определяется средней задержкой (или в том числе) инфцуга в КС.

Средняя задержка в КС зависит, с одной стороны, от интенсивности входного потока, и следовательно, от результата маршрутизации, а с другой – определяет саму маршрутизацию. Из-за этого эффекта обратной связи задача маршрутизации значительно сложнее задачи определения кратчайших путей. Поэтому в основу ее решения полагают взаимозависимость трафика и топологии, которая физически трактуется, например, теоремой о максимальном потоке и минимальном сечении [2].

Решение сетевых задач в настоящее время предполагает использование имитационного моделирования [1, 2, 4, 6, 89 – 93]. Принципиальные сложности существуют при условии, когда сеть нагружена и имеют место большие потери информации. В этом случае необходимо строго регулировать и управлять трафиком с учетом топологии.

На практике важнейшее значение в решении задачи маршрутизации имеют методы распространения по сети необходимой служебной информации [6, 94 – 95]. При доведении информации о топологии должны учитываться следующие сетевые особенности.

1. Информация о топологических изменениях передается по КС, которые могут выходить из строя. При этом необходимо учитывать, что сеть должна функционировать даже в условиях ее распада на подсети.

2. Так как скорость распространения топологической информации по сети конечна, а интенсивность изменения топологии может быть высокой, то имеет место проблема различения старой и новой информации об изменениях.

3. В результате восстановления каких-либо КС части сети соединяются, и сеть становится связной. При этом необходимо согласовать топологическую информацию соединенных подсетей.

Эти же трудности имеются и при распространении информации о нагрузках линий. Однако обновление информации о топологии является алгоритмом низкого уровня, на котором основывается правильная работа других алгоритмов. Поэтому если неправильная информация о нагрузках КС приводит к неоптимальному решению задачи маршрутизации, которая в свою очередь приводит к увеличению задержек передач

⁸ В данном случае не рассматриваются случайная маршрутизация, распространение информации волновым методом, или методом «горячей картошки».

пользовательской информации, то неправильная информация о топологии может привести к выбору несуществующих маршрутов. В связи с этим лавинный метод распространения среди всех УК обновляющейся информации о топологии является на данный момент приоритетным в ПРС. Основная возникающая при этом проблема – большое количество передаваемых инфцугов.

Уменьшение количества служебных инфцугов возможно, если использовать специальный канал обмена информации с разбиением по информационным признакам [78, 81 – 83, 96, 98]. В предложенной [78] имитационной модели ПРС применен вариант передачи информации о топологии сети с одновременным определением кратчайших путей на основе распределенного алгоритма Беллмана–Форда [6]. В качестве основного показателя оценки распространения маршрутной информации при топологических изменениях и используемого алгоритма маршрутизации была принята условная вероятность отсутствия маршрута $P(\bar{r}/D)$ при наличии данных о его существовании в маршрутной таблице абонента-источника. Как дополнительный показатель использован коэффициент качества K выбранного маршрута, который определялся следующим образом [78]:

$$K = \frac{\text{Кратчайший путь источник – адресат}}{\text{Длина выбранного маршрута источник – адресат}} \quad (1.2)$$

Зависимости условной вероятности $P(\bar{r}/D)$ и коэффициента качества K от значений интенсивности смены состояний ЛС приведены на рис. 1.3, а, б, соответственно. Моделирование проводилось для сети с общим числом абонентов $n = 100$, среди которых $m = 30$ являются пользователями. Вероятность существования ЛС (i, j) , где $i \neq j$ и $i, j = \overline{1, n}$, задана значениями $P' = 0,3$ (кривая 1), $P'' = 0,9$ (кривая 2). Смена состояния каждой ЛС определяется как дискретный марковский процесс с двумя состояниями: E_1 – ЛС существует; E_0 – ЛС отсутствует. Вероятности начального состояния заданы как $P_1(0) = P$, $P_0(0) = 1 - P$. Время пребывания ЛС в состоянии E_v , $v = 1, 2$, распределено экспоненциально с параметром λ_v , который характеризует среднюю интенсивность переходов из состояния E_v (количество переходов за минуту).

Из-за используемых произвольных сетевых конфигураций идея применения адаптивных способов маршрутизации направлена в том числе на компенсацию изменений сетевой топологии. В случае, когда топология сети установлена и стоит задача оптимального распределения трафика, используются потоковые методы маршрутизации [6]. Они

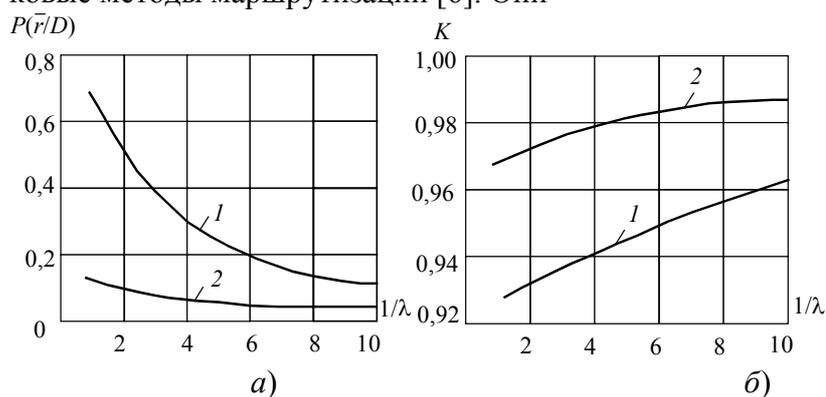


Рис. 1.3

основаны на численных методах оптимизации [99, 100], важнейшая проблема которых – сходимость. Эти алгоритмы, кроме их сложности, предполагают централизованность в решении с фиксацией топологической ситуации и требуют полного знания общей потоковой ситуации в сети. Поэтому их использование в подвижных сетях с меняющейся топологией при условиях воздействия преднамеренных помех весьма проблематично.

На практике для вычисления маршрутов в узлах используются различные распределенные алгоритмы, а доставка данных, необходимых для корректировки маршрута, происходит по широкополосному каналу.

В работе [42] задача маршрутизации решается на основе ТНМ с использованием нечетко заданных исходных данных. Однако такое решение не предполагает наличие (использование) формулы поведения сети с компонентами ее топологии.

Итак, маршрутизация и топология – взаимозависимые компоненты сетевой задачи. Исходя из сложности решения этой задачи в условиях динамичной топологии, последнюю необходимо поддерживать в устойчивом состоянии на фиксированном интервале времени даже для мобильных ПРС с целью эффективного их функционирования.

1.4. МОДЕЛЬНОЕ ОТОБРАЖЕНИЕ ПРОЦЕССОВ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СЕТЯХ

В силу сложности решаемых сетевых задач необходима не только точность расчета, но и строгость постановки задачи, причем строгость не столько в математике (очевидно это также важно), сколько в постановке задачи по выявлению существенных процессов и факторов, исключая несущественные. Это означает, что на различных уровнях исследований необходимо корректно использовать соответствующие применяемые допущения. Вопросы модельного отображения систем рассмотрены в [100 – 103]. На рис. 1.4 приведена иерархия уровней допущений, которые должны вводиться при изучении явлений любой информационной сети.

1.4.1. ПЕРВЫЙ УРОВЕНЬ ДОПУЩЕНИЙ: ОТБОР НАИБОЛЕЕ СУЩЕСТВЕННЫХ ФУНКЦИЙ

Эталонная модель взаимодействия открытых систем (ЭМВОС) – первый этап уровня допущений. Согласно рекомендациям Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии (МК КТТ), для ИС рекомендована многоуровневая архитектура связи: положена концепция семиуровневой ЭМВОС. Под открытыми системами понимается совокупность ЭВМ с программным обеспечением и периферийным оборудованием, терминалами и т.п. как единое целое построение (организация), способное обрабатывать и передавать информацию.

Под термином «взаимодействие открытых систем» понимаются не аспекты их внутреннего функционирования, а процесс информационного обмена между открытыми системами, процедуры их совместного функционирования, целью которых является выполнение общей распределенной работы. Разбиение на уровни осуществлено таким образом, чтобы функционально сгруппировать в рамках одного уровня близкие процессы, участвующие во взаимодействии открытых систем.

Спецификация функций ЭМВОС может быть представлена двумя группами: к первой относятся функции, описываемые протоколами прикладного, представительного, сеансового и транспортного⁹ уровней (уровни оконечного пользователя, где осуществляется подготовка информации к непосредственной передаче в сети), ко второй – функции сетевого, канального и физического уровней, которые обеспечивают непосредственную физическую транспортировку информации от источника до адресата.

ЭМВОС как стандарт дает хорошее представление всех основных процессов, существующих при взаимодействии объектов сети. Повышение эффективности функционирования ИС может вестись как на основе совершенствования аппаратуры и программных продуктов оконечных пользователей, так и путем совершенствования сети связи,

⁹ Транспортный уровень отвечает за организацию сквозной передачи, в том числе за обеспечение межсетевых передач с использованием шлюзов. В последнем случае он входит во вторую группу. Поэтому функции этого уровня можно отнести к интерфейсным между двумя основными группами.

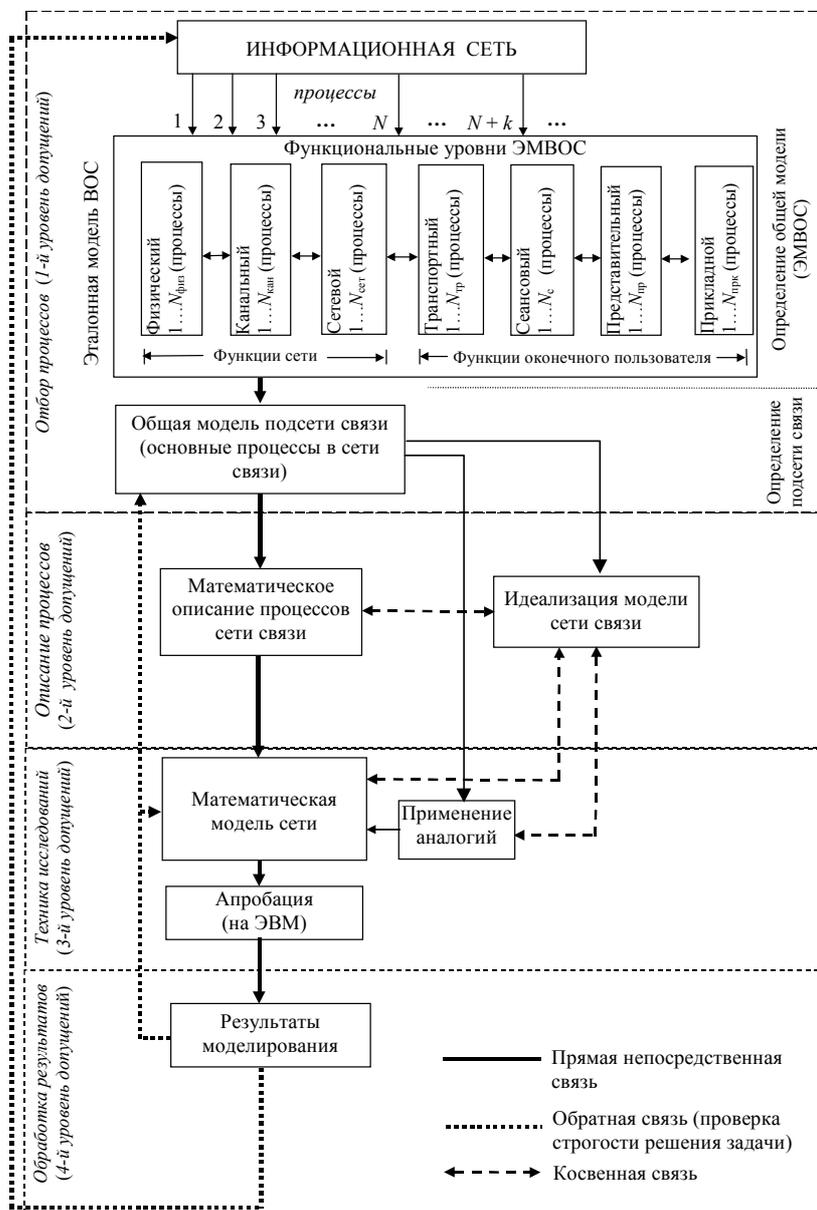


РИС. 1.4

которая ответственна за физическую доставку информации пользователям. Последняя задача является объектом исследования в данной работе, поэтому остановимся на функциях трех нижних уровней ЭМВОС.

Структурно любую ИС рекомендуется рассматривать в виде двух подсетей – подсети пользователей и подсети связи (далее сети связи) [6]. Именно сеть связи осуществляет физическую доставку сообщений для каждой пары отправитель – адресат (ОА-пары). В связи с этим суть сетевой задачи можно сформулировать следующим образом. Любая сеть имеет топологию, которая характеризуется числом УК (с подключенными к ним пользователями) и ЛС между ними. Это есть фиксированная («неживая») структура. По сети с заданной топологией передается поток инфцугов, меняющийся во времени, источниками и получателями которого являются абоненты (пользователи). Он характеризует динамическую во времени и в пространстве («живую») структуру. Очевидно, наилучшим результатом является их эффективное (в смысле передачи информации) совмещение в любой момент времени.

Ограничение основных функций (и процессов) в ИС – второй этап 1-го уровня допущений (см. рис. 1.4). Анализ процессов передачи информации в ИС связан со следующими ограничениями.

1. Информационная сеть имеет топологию, которая считается заданной и не меняющейся на некотором интервале времени. КС имеют фиксированную пропускную способность.

2. На вход каждого УК поступает случайный входной поток пользовательских инфцугов, который характеризуется интенсивностью и длительностью последних.

3. Из-за случайного характера входного потока, с одной стороны, и строго детерминированных технических возможностей ИС – с другой, каждый УК имеет УН, которое, по сути, является буферным устройством между входными и выходными КС узла.

4. Время ожидания в очереди УН инфцугов зависит: во-первых, от пропускной способности выходных КС¹⁰, во-вторых, от протокола обслуживания, например, обслуживание в порядке поступления (ОПП); кроме этого, параллельно вводятся приоритеты инфцугов, влияющие на процедуру обслуживания.

5. В ИС с ограниченным ресурсом КС имеет место проблема коллективного его использования. Задача МД ограничивает информационный обмен в сети.

6. Распределение путевых потоков определяет качество обслуживания сетью входного потока, в смысле времени его доведения. При фиксированном, т.е. заданном времени доведения информации (в виде ограничения), сеть увеличивает производительность.

7. Любая сеть имеет функцию самоограничения, т.е. управляет входным трафиком с целью недопущения перегрузки сети (когда при высокой входной интенсивности временная задержка каждого инфцуга стремится к бесконечности).

Основная задача ИС – надежная и с наименьшим временем доведения (T) доставка инфцуга или конечной их последовательности адресату. Последнее, т.е. T , является основной характеристикой качества функционирования сети.

Указанные сетевые процессы взаимосвязаны, т.е. они влияют не только непосредственно на передачу информации в ИС, но и косвенно через другие функции. Поэтому при решении сетевой задачи необходим анализ, который определяет как степень влияния указанных функций на характеристики сети, так и связи между ними.

1 . 4 . 2 . В т о р о й у р о в е н ь д о п у щ е н и й : м а т е м а т и ч е с к о е о п и с а н и е п р о ц е с с о в

Указанные существенные процессы функционирования ИС на первом уровне частично поясняют их особенности и функции. При их описании возникают допущения второго уровня.

Описание процессов. 1. Топология сети Γ_c задается графом $G(N, L)$. Каждое ребро имеет длину, которая эквивалентна «стоимости» его использования, например, ее геометрической длине, пропускной способности, общей загрузке узла инфцугами, передаваемыми по этой линии и т.п. В случае, когда учитываются направления ребер, например для радиосистем, задается ориентированный граф. Наряду с обычным графом при построении топологии мобильных (или сложных) ПРС будет использовано понятие нечеткого графа \tilde{G} , который характеризуется функциями принадлежности элементов множества этому графу $\mu(t)$ [28].

2. На вход каждого УК поступает пуассоновский поток инфцугов $\gamma(t)$ с суммарной интенсивностью $\gamma(t) = \sum_{i=1}^n \gamma_i(t)$, где γ_i – средняя интенсивность поступления в i -м входном КС. В общем случае длительность инфцугов различна¹¹. В современных ИС инфцуги, как правило, имеют одинаковую длину. В этом случае каждое поступающее от пользователя сообщение представляется в виде, например, m инфцугов, не обязательно приходящих в оконечный пункт друг за другом (при передаче в дейтаграммном режиме). Исходя из типа используемых КС, высоких скоростей передачи и наличия переходных процессов, которые имеют место при любом преобразовании цифровых сигналов в процессе их передачи и приема, каждый инфцуг имеет защитный интервал, позволяющий при заданном уровне решенной задачи синхронизации и переходных процессов передавать и принимать его отдельно от других.

В ПРС инфцуг представляет собой радиосигнал фиксированной длины. При его формировании из-за дополнительной информации на каждом уровне ЭМВОС инфцуг удлиняется. При приеме происходит обратное преобразование, в частности: он детектируется, преобразуясь в последовательность видеоимпульсов, а после помехоустойчивого декодирования и принятия решения о правильном приеме получа-

¹⁰ Кроме этого, необходимо учитывать время обработки при приеме, все переходные процессы, обуславливающие временную задержку, и время распространения сигналов по линии связи.

¹¹ В качестве примеров источников формирования цифровых сигналов служат работы [104, 105].

ется исходный инфцуг, который был сформирован на передающей стороне (соответствующий понятию «пакет»). Дальнейшая передача инфцуга адресату предполагает его изъятие из УН, подготовку к передаче, т.е. помехоустойчивое кодирование с введением синхроимпульсов и дальнейшую модуляцию высокочастотного колебания.

Таким образом, при приеме инфцуга соответствующий ему сигнал по длительности уменьшается, а при передаче – увеличивается. Степень изменения временного интервала в результате преобразования инфцуга в радиосигнал и обратно характеризует неэффективность аппаратного решения и качество КС. Уменьшение этого интервала требует использования совершенных методов помехоустойчивого кодирования, с одной стороны, с другой – методов обработки с минимальными переходными процессами. Так как скорость передачи информации определяется пропускной способностью каналов C (бит/с), то длительность инфцуга будет определяться временным интервалом передающегося радиосигнала в КС. Этот факт количественно отождествляется параметром $\bar{\mu}C$, где $1/\bar{\mu}$ – длительность инфцуга в битах. Характер следования инфцугов в КС зависит от интенсивности входного потока сообщений в сеть и будет уточнен при проведении идеализации информационных процессов в ИС.

3. При анализе ИС предполагается, что УН имеют достаточную (большую) емкость, которая в конечном счете определяется допустимым временем жизни инфцугов в сети и скоростью передачи выходных КС.

На основании п. 2 и 3 каждое ребро в графе представляется известной для теории информационных сетей ОС – последовательно соединенных УН и КС. В этом случае процессы в ОС исследуются на основе теории СМО [23, 24].

Средняя временная задержка инфцугов. Для минимизации средней временной задержки сообщений \bar{T} как характеристики качества обслуживания необходимо математически описать ее зависимость от расчетных параметров (топологии Γ_c , входного потока $\Lambda_n(t)$, приоритетов сообщений P_c , пропускных способностей C , маршрутизации $f_m(\Lambda_n(t), \Gamma_c, C)$ и общей стоимости D). Описание возможно при рассмотрении множества состояний этих переменных. При этом, во-первых, множество используемых величин должно определять временную задержку; во-вторых, оно должно быть полным, т.е. таким, чтобы значения состояний переменных в момент времени t и характеристики всех инфцугов, поступающих от внешних источников в интервале (t, t') , были достаточными для определения состояния переменных в момент t' . Это условие характеризует марковское свойство модели.

Для описания состояния сети в любой момент времени необходимо иметь, как минимум, подробную информацию о количестве инфцугов в каждой очереди, длине каждого инфцуга (или времени его обслуживания в УК) и времени, необходимом для окончания передачи, осуществляемой в данное время по каждому каналу. Подобно постановке задачи точного математического решения коммуникационных сетей [1] обозначим: C_i – пропускная способность i -го канала; n_i – число инфцугов, ожидающих в очереди к i -му каналу; γ_{in} – средняя скорость поступления инфцугов от внешних источников к i -му каналу; v_{ni} – длина в битах n -го инфцуга, ожидающего в очереди к i -му каналу, r_i – время, оставшееся, чтобы закончить передачу, проводимую по i -му каналу. При использовании множеств: $V_{ni} = \{v_{ni}\}$; $R = \{r_i\}$; $R + dt = \{r_i + dt\}$, $i = 1, \dots, m$ состояние сети в любой момент времени (оно зависит и от топологической структуры сети) может быть полностью описано множеством переменных: $S = (n_1, n_2, \dots, n_m, V_{n_1}, V_{n_2}, \dots, V_{n_m}, R)$. Так как все эти величины – функции времени, то множество состояний является неограниченным. Тем не менее все они необходимы для того, чтобы состояние было полным. Для точного математического описания ИС необходимо получить выражение для плотности вероятности $p(S)$, характеризующей вероятность того, что в момент времени t сеть находится в состоянии S .

В настоящее время эта задача практически не разрешена¹². Трудность состоит в том, что длительности инфцугов (время обслуживания) и интервалы между поступлениями сообщений и инфцугов внутри сети не являются независимыми. С целью упрощения для математического описания используются модели открытых сетей Дж. Джексона с аппроксимацией независимости Л. Клейнрока [2]. Полученные таким образом на основе теории СМО модели могут использоваться только при простых структурах сетей. Примером может служить анализ ССС [106].

¹² Применение теории фракталов позволяет на основе использования протяженных статистических зависимостей, проявляемых в автокорреляционных функциях процессов, учитывать особенности трафика [39]. Однако структура сети в этом случае также не является составным компонентом сетевой задачи.

В сетях Дж. Джексона каждая ОС рассматривается независимо от сети, с пуассоновским потоком на входе, интенсивность которого задается сетью, и временем обслуживания, представляющим случайную величину. В работе [2] Л. Клейнрок ввел аппроксимацию независимости, согласно которой время обслуживания сообщения связывалось с конкретной его длиной – параметром b . Его суть: всякий раз, когда сообщение принимается в узле внутри сети, его новая длина \bar{b} выбирается независимо от ранее принятой при обслуживании с плотностью распределения:

$$p(b) = \bar{\mu} e^{-\bar{\mu}b}, \quad b \geq 0. \quad (1.4)$$

На основе этого предположения, i -й канал представляется в виде СМО М/М/1 с пуассоновским потоком интенсивности λ_i на входе и показательным временем обслуживания со средним $1/\bar{\mu}C_i$ с, где $1/\bar{\mu}$ – средняя длина инфцуга. Решение для \bar{T}_i имеет вид [2]:

$$\bar{T}_i = \frac{1}{\bar{\mu}C_i - \lambda_i}. \quad (1.5)$$

С помощью выражения для \bar{T} в виде разложения на одиночные каналы $\bar{T} = \sum_{i=1}^m \frac{\lambda_i}{\gamma} \bar{T}_i$ получена математическая модель [2], описывающая \bar{T} :

$$\bar{T} = \sum_{i=1}^m \frac{\lambda_i}{\gamma} \left[\frac{1}{\bar{\mu}C_i - \lambda_i} \right]. \quad (1.6)$$

В случае слабой информационной нагрузки выражение (1.6) приводится к виду [2]

$$\bar{T}_0 = \bar{n} \sum_{i=1}^m \frac{\lambda_i / \lambda}{\bar{\mu}C_i}, \quad (1.7)$$

где $\bar{n} = \lambda / \gamma$ – средняя длина пути (маршрута); λ_i / λ – параметр, являющийся функцией процедуры выбора маршрута.

Выражение (1.7) показывает необходимость минимизации \bar{T}_0 на основе решения задач множественного доступа и маршрутизации, функциями которых и являются параметры \bar{n} и λ_i / λ . Из (1.7) следует наличие порогового эффекта¹³ зависимости \bar{T} от входной интенсивности. Нагрузка насыщения сети γ^* соответствует наименьшему значению γ , при котором насыщается некоторый критический канал, пусть i_0 -й канал. В этом случае выполняется равенство $\lambda_{i_0} = \bar{\mu}C_{i_0}$. При заданной фиксированной процедуре выбора маршрутов можно найти множество $\{\lambda_i\}$ при любом значении γ , после чего необходимо просмотреть все отношения $\lambda_i / \bar{\mu}C_i$ и определить i_0 по наибольшему из этих отношений.

В любой сети связи процедура выбора маршрутов обычно зависит от текущего трафика (т.е. является адаптивной). В результате, если какой-либо отдельный канал достигает точки насыщения, трафик направляется к месту назначения по другим путям сети. Если трафик направляется по оптимальному маршруту, то γ^* можно найти после определения трафика в каналах $\{\lambda_i\}$. Метод вычисления γ^* неэквивалентен отысканию максимального потока, который сеть может переносить между данной парой узлов, так как при этих вычислениях изменяется матрица трафика¹⁴.

Сложность решаемых задач и их описания требует идеализации процессов и определения условий построения эффективных сетей. Определим основные требования к их удовлетворению, проведем обоснование критериев оценки, однозначно определяющих степень близости сетей к идеальности.

¹³ Пороговая модель приведена в работе [2].

¹⁴ Вместе с тем отыскание максимального потока весьма важно, и его можно выполнить с помощью хорошо известной теоремы о максимальном потоке и минимальном сечении. Согласно этой теореме, максимальный поток, который сеть может переносить между некоторым источником (узлом) s и адресатом (узлом) t , равен величине минимального сечения $s - t$.

Идеализация информационной сети. Под идеализацией сети будем понимать определение основных, принципиально важных сетевых параметров, функций и условий, позволяющих достичь наибольшего коэффициента использования сети в информационном смысле.

Наиболее обобщенное предназначение сети связи – пересылка информации от отправителя к адресату. Подобная задача, а именно передача инфцугов от источника до получателя при наличии непосредственной линии связи, решается каналом информационной связи. Основной его характеристикой принято считать пропускную способность C , причем идеальным считается КС, у которого скорость передачи информации сколь угодно близка к пропускной способности, т.е. $R \rightarrow C$ согласно теоремам академика В.А. Котельникова (1933) и К.Э. Шеннона для канала без помех [107]. Идеализуя эти условия, будем считать $R = C$. Данное условие идеальности является характеристикой системы в точке. Поэтому вторым условием идеальности (но не менее важным) является непрерывность обеспечения первого условия на заданном отрезке времени $[a, b]$, которая является интегральной оценкой

$$H(d) = \int_a^b R(t, d) dt \quad (1.8)$$

и характеризуется наибольшим количеством переданной информации на заданном временном отрезке.

Рассмотрим особенности входного трафика сети. Независимо от качества сети и ее размеров на ее вход поступает стохастический поток информации, который характеризуется:

- а) количеством инфцугов в единицу времени и их продолжительностью;
- б) интервалами между поступлениями (скважностью) инфцугов.

Входной поток является неуправляемой функцией, но в то же время задающей условия эксплуатации ИС. Исходя из этого, а также из-за существующих ограничений в виде физических возможностей сети идеальная сеть должна включать множество УН, необходимых для временного хранения инфцугов. Идеализуя информационный обмен в ИС, будем считать, что все инфцуги, покидающие очередь, передаются соответствующим КС и неизбежно поступают в следующий УК, к которому подключен этот канал. Таким образом, ИС с идеальным информационным обменом модельно представляется в виде совокупности соединенных определенным образом ОС, в которых непрерывно передается информация со скоростью, равной пропускной способности КС.

Рассмотрим основные сетевые характеристики: пропускную способность (количество обслуживаний) и среднее время передачи инфцуга по сети \bar{T} (качество обслуживания). Так как сквозной канал между

ОА-парой представляет собой сумму идентичных ОС с равновозможной наибольшей скоростью передачи и равными переходными процессами, то \bar{T} есть сумма T_i (i характеризует номер ОС). \bar{T}_i для каждой

i -й ОС состоит из подготовительно-заключительного времени, обусловленного всеми переходными процессами в системе, и основного технологического времени, которое физически представляется в виде задалживания времени системой на процесс передачи информации. Первая составляющая \bar{T}_i представляет собой временную задержку и в идеальной сети определяется наименьшим значением временной задержки, обусловленным современным уровнем технического развития. Вторая составляющая \bar{T}_i является основной временной составляющей и включает в себя следующие компоненты.

1. Время обработки инфцуга при постановке в очередь (Δt_1), которое представляет собой временной интервал между моментом правильного его приема УК и моментом, когда инфцуг поставлен в очередь в УН для последующей передачи.

2. Время нахождения инфцуга в УН (Δt_2), которое является основной составляющей времени передачи по сети и характеризуется интервалом между моментом постановки инфцуга в очередь на передачу и моментом, когда он начинает передаваться.

3. Длительность передачи (Δt_3) определяется длиной инфцуга и скоростью передачи по КС, представляет собой временной интервал между моментами передачи первого и последнего битов инфцуга, включая время возбуждения и релаксации.

4. Время распространения сигнала в среде (Δt_4), равное промежутку времени от момента, когда последний бит «отправлен» передающим УК, до момента, когда он «получен» принимающим УК. Это время является интегральной характеристикой всех частных процессов в среде и пропорционально физическому расстоянию между передающим и приемным устройствами.

Из рассмотренных составляющих основного технологического времени при передаче в одноканальной системе Δt_2 является непредсказуемым, поэтому для его компенсации и необходимы УН. Все остальные задерживания времени должны быть наперед учтены и сведены к наименьшей величине при современном уровне знаний и технической реализации.

Основные сетевые функции – маршрутизация и управление входным трафиком – воздействуют на характеристики сети с известной зависимостью. При большом входном потоке и заданном \bar{T} , используя наилучшую маршрутизацию, можно достичь наибольшего значения пропускной способности G_C , которая определяется

$$G_C = \gamma_{\text{вх}} - \gamma_{\text{отв}}, \quad (1.9)$$

где $\gamma_{\text{вх}}$ – интенсивность входного трафика; $\gamma_{\text{отв}}$ – количество не допущенных инфцугов в сеть за единицу времени.

С другой стороны, ограничиваясь значением G_C , на основе наилучшего алгоритма маршрутизации можно добиться наименьшего значения \bar{T} . В последнем случае процедуры управления входным потоком должны ограничивать входной трафик на уровне G_C .

Необходимо отметить, что в идеальной сети значение времени передачи инфцугов по сети T (от момента отправки источником до момента получения адресатом) должно быть гарантированным. В связи с этим в целом для ИС необходимо задать гарантированное, максимально допустимое $T_{\text{доп}}$, определяющее предельное значение T для каждой ОА-пары.

В отличие от КС, в ИС, помимо инфцугов, находящихся в процессе передачи, значительное их количество одновременно находится в режиме ожидания в УН. Причем последнее оказывает существенное влияние на $T_{\text{доп}}$, так как является результатом неспособности сети мгновенно обслужить весь входной трафик и, по сути, определяет «сопротивление» сети в терминах времени между точками вход – выход.

Таким образом, с одной стороны, идеализируя информационный обмен, с другой – учитывая основные свойства ИС (передачу инфцугов и их хранение), характеристики G_C и T не являются достаточными для оценки эффективности информационного обмена, так как они характеризуют частные его стороны. Необходим обобщенный параметр, описывающий как скоростные возможности сети, так и накопительные свойства одновременно. В качестве такой характеристики предлагается квадратичная форма – кибернетическая мощность сети $P_{\text{ИС}}(t)$ [55] (также описана в разд. 2, 4, а ее приращение – в разд. 6).

Мгновенная кибернетическая мощность характеризует ИС в некоторый момент времени и равна произведению наибольшей скорости передачи ($R_C = G_C$) на предельное число инфцугов, находящихся в сети, при ограничении, заданном на временную задержку $T_{\text{доп}}$:

$$P_{\text{ИС}}(t) = N_{\text{max}} G_C \Big|_{T_{\text{доп}}}. \quad (1.10)$$

Заметим, что увеличение предельного значения N_{max} при фиксированном $T_{\text{доп}}$ требует большей G_C , что, в свою очередь, будет определять сеть с большей мощностью. Очевидно, интегральной оценкой является величина, равная средней мощности ИС на отрезке времени.

С целью определения основных направлений исследования ИС, рассмотрим модель поведения усредненной временной задержки \bar{T} (рис. 1.5).

В случае слабой нагрузки ($\gamma \leq \gamma'$) для определения \bar{T} можно воспользоваться выражением (1.7). В условиях идеальности – при полном учете скважности инфцугов, в предельном случае $R = C$, потоки в КС равны $\lambda_i = \bar{\mu} C_i$. Исходя из этого,

$$\bar{T} = \bar{n} / \lambda. \quad (1.11)$$

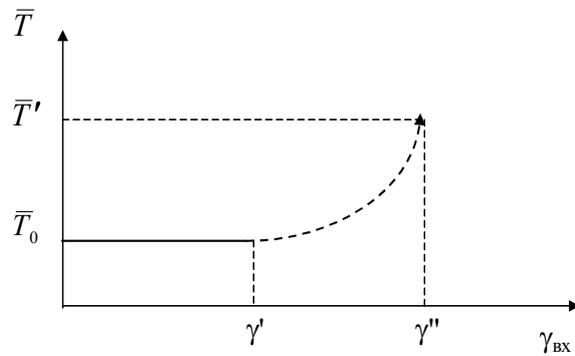


Рис. 1.5

Из (1.11) видно, что \bar{T} будет наименьшим в случае полностью связанной сети ($n = 1$). При этом $\gamma_{\text{вх}} = \gamma_{\text{вых}} = G_{\text{ИС}} = \sum_{i=1}^M \mu_i C_i = \sum_{i=1}^M \lambda_i = \lambda$. Таким образом, модель идеальной сети должна исключать коммутацию каналов.

Так как любая ИС является коммуникационной, то согласно выражению (1.11), число транзитных участков должно быть минимальным и, одновременно с этим, гарантирующим ее связность. Увеличение связности приводит к «распылению» трафика, что ухудшает качество обмена информацией. Концентрация же потоков увеличивает длины путей. Поэтому для эффективной передачи информации должно быть найдено компромиссное решение между концентрацией потоков и минимизацией числа транзитных участков.

Для сетей с большим числом абонентов при идеализации процессов передачи информации на сетевом уровне будут использоваться следующие ограничения:

1. Число коммутаций должно быть минимизировано. Для ИС с детерминированными регулярными структурами рекомендованное число соседних узлов является наименьшим [71].
2. Согласно теореме Л. Клейнрока [1] о концентрации потоков следует, что информационные потоки должны направляться по независимым (непересекающимся) путям. Следовательно, необходимо совмещать информационные потоки с сетевой структурой и на основе этого организовывать наибольшее число независимых сквозных каналов.

Если первое ограничение основано непосредственно на решении топологической задачи, то второе предполагает совместное рассмотрение топологии и процессов, протекающих в ней. Пусть в интервале $[\gamma', \gamma'']$ входной трафик насыщает все КС и УН. Тогда процесс передачи при равномерном распределении трафика по КС в этом интервале является непрерывным (условие непрерывности обеспечивают очереди инфцугов в УН). При $\gamma_{\text{вх}} = \gamma''_{\text{вх}}$ трафик насыщает УН до значения N_{max} . При корректном управлении процессами передачи для значения $\gamma''_{\text{вх}}$ имеет место предельная пропускная способность сети, гарантирующая заданное $T_{\text{доп}}$. В этом случае, согласно (1.10), кибернетическая мощность $P_{\text{ИС}}$ будет максимальной. В случае превышения $\gamma''_{\text{вх}}$ входной трафик должен ограничиваться процедурой управления нагрузкой.

В выражении (1.7) отношение λ_i/λ характеризует распределение потоков в слабонагруженной сети. Для принятой идеализации информационного процесса решение этой задачи должно осуществляться в два этапа: первый – мгновенный учет скажности для выполнения условия $R = C$; второй – распределение потоков при нагрузке, когда все КС заняты процессом передачи и происходит накопление инфцугов в сети до значения N_{max} . Если в первом случае можно ограничиться решением задачи определения кратчайших путей на графе, то во втором – необходимо совмещение потоковой структуры с топологией, что осуществимо на основе использования тензорной методологии (разд. 4, 5) тензорного анализа (разд. 7). В интервале входных воздействий $[\gamma', \gamma'']$ ИС будем считать находящейся в нагруженном состоянии. Одновременно с этим, при условии $\gamma_{\text{вх}} \approx \gamma''_{\text{вх}}$ ИС находится в сопредельном состоянии, т.е. близком к предельному состоянию. Нагруженная ИС, особенно в сопредельном состоянии, должна иметь возможность саморегулирования, исходя из потоковой ситуации. Другими словами, не только использовать долевое распределение потоков, но и иметь возможность корректировать топологию сети на основе пе-

ресеченности количества информации в путях. Таким образом, структурную модель ИС с идеализированным информационным обменом можно представить в виде рис. 1.6.

Исходя из рассмотренного, необходимыми условиями идеальности являются следующие.

1. Условие континуальности (непрерывности) среды распространения на заданном интервале времени, что означает:

а) сеть должна быть связна в любых условиях функционирования на заданном отрезке времени, т.е. для каждой ОА-пары должен существовать сквозной КС. Данное требование предполагает, что сеть должна быть абсолютно устойчива к любому воздействию, нарушающему условие связности;

б) континуальность КС означает необходимость исключения скважности. Для этого необходимо учитывать моменты появления инфцугов и их длительность.



Рис. 1.6

2. Во всех видах КС необходимо выполнение условия по скорости передачи информации $R = C$, что означает, как минимум, следующее:

а) пропускная способность сквозных каналов сети определяется пропускной способностью составляющих его КС, причем КС с наименьшей пропускной способностью. Поэтому с целью обеспечения наибольшей пропускной способности сквозной канал должны составлять КС с одинаковой наибольшей пропускной способностью. Если КС не будут иметь одинаковую пропускную способность, это приведет к возникновению очередей в УН, причем не по причине входного потока, а за счет неэффективности распределения потоков по сети;

б) топология сети должна быть такова, чтобы все сквозные каналы имели кратчайшие пути, а число непересекающихся путей было максимальным.

Для выполнения условия по скорости передачи необходимо:

а) обеспечение строгого учета скважности передаваемых инфцугов и их заполнение;

б) уменьшение переходных процессов до наименьшего значения временной задержки, которая достижима современной техникой. В том числе и переходные процессы при реконфигурации топологии, причем они должны быть меньше, чем время воздействия факторов, изменяющих технологию.

Структурно-логическая схема используемых условий идеальности ИС приведена на рис. 1.7.

Вопрос об идеальной ИС оставляет без внимания те параметры, которые ни при каких обстоятельствах не могут быть исключены из рассмотрения при проектировании сети, а именно: электронные и электрические параметры, обусловленные прежде всего физическими свойствами элементов устройств и цепей, а также реализация функций контроля всех системных процессов.



Рис. 1.7

1.4.3. ТРЕТИЙ УРОВЕНЬ ДОПУЩЕНИЙ: ТЕХНИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Модели сетей связи с очередями обладают следующими особенностями. Во-первых, количественные результаты исследования сетей с использованием СМО существенно отличаются от практических результатов. Во-вторых, такие модели не позволяют производить исследования на сетевом уровне для ИС любой сложности. В связи с этим разрабатываются имитационные модели, решающие сетевые задачи и являющиеся единственно возможными к применению математическими моделями. Однако качество их функционирования существенно зависит от степени точности воспроизведения основных процессов, которые протекают в реальных сетях, а также от тех ограничений и необходимой точности результатов, которые приняты при моделировании. Кроме того, разработанная модель одной сети связи может абсолютно быть неприемлемой к применению для другой сети связи, например, отличной только алгоритмом маршрутизации.

Возможность использования аналитических методов исследования сетей связи предполагает выполнение физических законов, согласно которым происходят процессы передачи информации по сети. При этом формула поведения должна связывать основные ее параметры. В качестве формулы поведения сети на данном уровне теоретических исследований можно использовать известную формулу Литтла [4]:

$$\bar{N} = \lambda \bar{T}, \quad (1.12)$$

где \bar{N} – среднее число инфцугов в сети; λ и \bar{T} – усредненные входная интенсивность и временная задержка в сети.

В настоящее время используется следующий подход к решению (1.12): величины \bar{N} или \bar{T} не могут быть найдены, пока не будут известны некоторые статистические характеристики системы, например стационарные вероятности p_n (вероятность пребывания $n = 0, 1, \dots$ инфцугов в системе). С помо-

щью p_n можно получить $\bar{N} = \sum_{n=0}^{\infty} np_n$. Далее непосредственно из формулы Литтла вычисляется временная задержка: $\bar{T} = \bar{N}/\lambda$. Следовательно, решение сети в этом случае означает определение стационарной вероятности p_n .

Для моделей, в которых поступающие потоки приняты пуассоновскими, а время обслуживания в каждом узле распределено по показательному закону и независимо от узла к узлу, маршруты между ОА-парами выбираются случайным образом с фиксированными вероятностями. Решение такой системы имеет вид произведения, впервые полученного Дж. Джексоном [4, 6]. Для разомкнутой сети Джексона с M обслуживающими приборами и одним источником решение имеет вид

$$p(n) = \prod_{i=1}^M p_i(n_i), \quad (1.13)$$

$$p_i(n_i) = (1 - \rho_i) \rho_i^{n_i},$$

$$\rho_i \equiv \lambda_i / \mu_i C_i < 1,$$

где $p(n_1, n_2, \dots, n_M) \equiv p(n)$ – совместная вероятность; $p_i(n_i)$ – вероятность того, что система i находится в состоянии n_i .

З а м е ч а н и е 7. Расчет сети вероятностными методами не учитывает информацию о ее структуре, следовательно, необходим новый подход, позволяющий топологию сети рассматривать в качестве переменной в формуле ее поведения.

1.5. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Научный интерес представляют задачи расчета ИС в условиях их динамики и высокой информационной нагрузки. Поэтому следует выделить важные особенности построения и анализа современных сетей, обуславливающие актуальность данной работы.

Во-первых, эффективность информационного обмена в условиях высокого трафика невысока, а в сетях со сложной структурой, использующих протоколы с СМД, имеет крайне низкое значение.

Во-вторых, аналитические методы расчета сетей, за исключением обладающих простейшими структурами (например, при рассмотрении ССС), не предполагают использование сведений о топологической структуре сети. Поэтому, с одной стороны, сложность описания внутрисетевых потоков, их взаимозависимость во времени и в пространстве–структуре, с другой – отсутствие возможности использования при этом сведений о топологии сети, приводят к необходимости перехода в процессе анализа сетей к имитационным моделям, которые разрабатываются конкретно для решения каждой сетевой задачи.

В-третьих, анализ исследований показывает, что ИС с детерминированными структурами более эффективны в смысле передачи информации по сравнению с сетями со случайными структурами. В сетях связи со случайными топологиями в целях повышения структурной эффективности стремятся использовать частичное упорядочение, например триангуляцию. В связи с этим применительно даже к мобильным ПРС, имеющим высокий трафик, целесообразны детерминированные топологии при их структурном построении.

В-четвертых, из-за отсутствия аналитического метода анализа сетей, совмещающего параметры структуры и процессы в ней, в теории и практике сетей до настоящего времени не применялся обобщенный показатель оценки эффективности информационного обмена, который может учитывать основные свойства сети: одновременно скорость передачи информации и свойство ее хранения в процессе передачи.

В связи с отсутствием такого показателя невозможно было осуществить оценку степени близости ИС в смысле передачи информации к предельным возможностям, т.е. определить в этом смысле кпд сети.

Учитывая проведенную идеализацию процессов передачи информации в ИС, рассмотренные условия идеальности, в частности континуальность среды при больших входных потоках (именно для этих условий существует сложность проектирования сети) и возможность обеспечения надежных КС, можно считать, что в каналах нагруженной сети осуществляется непрерывный процесс передачи. Используя предположение о надежности КС, расчет ИС следует проводить на основе аналитической математической модели, в которой структура сети и процессы, протекающие в ней, объединяются в единой формуле поведения.

Исходя из особенностей функционирования нагруженных ИС и проведенной идеализации информационных процессов, необходимо решение следующих важных задач:

1. На основе анализа основных подходов к оценке эффективности и использования аналогий с физическими системами определить обобщенный показатель оценки эффективности сети, который может служить инвариантом в процессе ее преобразований.

2. Разработать методологию анализа нагруженной ИС, при которой топология сети имеет принципиальное значение – используется для определения систем координат информационного пространства. Такой подход реализуется с помощью тензорной методологии. Далее определить формулу поведения ИС для ее стационарного состояния и формулы преобразования основных параметров сети. Разработать математическую модель сети, учитывающую особенности КС, их связность и наполняемость инфцугами УН во входных узлах. Показать вариант синтеза сетей связи на основе тензорной методологии.

3. Разработать метод формирования детерминированной топологии для мобильной ЦРС, который предполагает учет ее динамичности и одновременно с этим надежности на интервале рассмотрения.

4. Провести геометризацию информационных процессов в ИС. Определить информационные пространства каналов связи и путей передачи информации, метрику пространств. Определить ко- и контравариантность количества информации в сетях, показать инвариантность выбранного показателя оценки эффективности и его использование при описании динамики изменения состояния ИС.

5. Применить аппарат тензорного анализа к нагруженной ИС с целью исследования окрестности точки ее состояния. Определить для ИС коэффициенты связности путевого пространства, линейное приращение состояния сети в окрестности точки, обусловленное не только динамикой путевых потоков, но системными характеристиками ИС.

2. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА В МОБИЛЬНЫХ ЦИФРОВЫХ РАДИОСЕТЯХ

Эффективность передачи инфцугов в ИС оценивается вероятностно-временными характеристиками, а также известными усредненными показателями – производительностью, коэффициентом потерь и другими частными величинами. Для проведения сравнительной оценки нескольких сетей могут использоваться относительные характеристики, включающие вышеприведенные показатели. Они также являются частными. Использование совокупности указанных параметров позволяет более детально характеризовать эффективность информационного обмена в сети. При этом определение степени близости ИС к предельным возможностям передачи информации невозможно. Эта задача решается на основе введенного обобщенного показателя – кибернетической мощности [55], которая одновременно учитывает и скорость передачи информации по сети, и количество информации в ней, в том числе находящееся в режиме хранения, исходя из ограничений на временную задержку инфцугов. С целью введения обобщенного параметра проведена аналогия с физическими процессами и явлениями, показан вывод размерности обобщенного параметра. С помощью понятия идеальной сети определен показатель кпд в смысле передачи информации. Проведено имитационное моделирование ПРС, где наряду с обычными подходами к оценке информационной эффективности использован введенный параметр кпд.

2.1. СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА В ЦИФРОВЫХ РАДИОСЕТЯХ

Эффективность функционирования ЦРС определяется множеством показателей, которые отражают как существенные свойства информационных процессов, протекающих в сетях связи, так и основные характеристики их элементов. В работе [40] предложен векторный (многокритериальный) подход к формированию системы показателей эффективности пакетных радиосетей. Он позволяет производить оценку по отдельным показателям на различных уровнях иерархии ПРС. Согласно [40], составными компонентами вектора эффективности ПРС $\Xi(t)$ являются векторы показателей качества $\Xi_k(t)$, системных показателей $\Xi_c(t)$ и эксплуатационных показателей $\Xi_s(t)$:

$$\Xi(t) = |\Xi_k(t), \Xi_c(t), \Xi_s(t)|^T. \quad (2.1)$$

В (2.1) показатели функционально зависят от параметров среды распространения радиоволн $Z_{cp}(t)$, потоковой обстановки $\Lambda_{п}(t)$, топологии сети $\Gamma_c(t)$, используемых алгоритмов маршрутизации $f_m(\Lambda_{п}(t), \Gamma_c(t))$, множественного доступа $A_{мд}(t)$, вида сигналов $S_c(t)$, надежности элементов сети связи и др.

Качество функционирования сети, или ее информационная эффективность, оценивается вероятностно-временными характеристиками [4, 10 – 12, 40, 41, 67, 72, 88], которые определяют своевременность доведения инфцугов и описываются функцией распределения времени доставки $T_{дост}$ при ограничении надежности:

$$F_{T_{дост}}(T_{доп}) = p(T_{дост} \leq T_{доп} | D \leq D_{доп}), \quad (2.2)$$

где $T_{доп}$ и $D_{доп}$ – допустимые время доставки до адресатов инфцугов и потери информации соответственно.

В значительной части работ [1, 2, 6, 40, 88] для оценки качества функционирования сети в смысле передачи информации используется среднее время доставки до адресата \bar{T} . В качестве критерия эффективности при этом используется минимальное значение \bar{T} при заданных ограничениях на вероятность правильного приема инфцуга $P_{пп}$:

$$\min \bar{T} |_{P_{пп}}. \quad (2.3)$$

Для исследования в ИС различных протоколов сетевого уровня с учетом критерия эффективности сети (2.3) разумно использовать относительные показатели оценки, чувствительные к вариациям исследуемых протоколов [7]. В таких случаях используется опорный (эталонный) вариант модели сети, относительно которого производится сравнительная оценка эффективности других. Примером использования такого подхода являются исследования адаптивных алгоритмов маршрутизации в мобильной УКВ ПРС [93, 97, 98]. В качестве показателей оценки эффективности адаптивных алгоритмов используется параметр – относительное превышение среднего времени задержки инфцуга $\Delta\bar{T}$ для рассматриваемой модели ПРС с оцениваемым алгоритмом маршрутизации по сравнению с тем же показателем опорной модели

$$\Delta\bar{T} = \frac{\bar{T} - \bar{T}^*}{\bar{T}^*}, \quad (2.4)$$

где \bar{T} – среднее время задержки инфцуга в рассматриваемой модели, \bar{T}^* – в опорной модели.

Кроме этого, имеет место показатель, характеризующий относительное количество пользовательской информации [7], которое содержится в необслуженных инфцугах за определенный интервал времени

$$\Delta I = \frac{I_{\text{вх}} - I_{\text{пот}}}{I_{\text{вх}}}, \quad (2.5)$$

где $I_{\text{вх}}$ и $I_{\text{пот}}$ – количество информации на входе сети и потерянной в ней, соответственно.

Последнее определяется произведением длины инфцуга на количество потерянных инфцугов: $I_{\text{инфцуг}} [\text{бит}] \cdot n$. Используя при анализе относительный показатель потерь инфцугов для имитационной модели, можно производить количественную оценку качества функционирования алгоритма маршрутизации. Однако она является относительной.

Таким образом, критерием оценки эффективности адаптивных алгоритмов маршрутизации в общем случае может служить правило:

$$\text{минимизировать } \Delta \bar{T} \text{ при ограничении на } \Delta I. \quad (2.6)$$

Представленные выше количественные показатели информационной эффективности ИС дают оценку эффективности обмена информацией, а именно: степени соответствия требованиям по времени доведения информации до пользователей-адресатов; количества потерь. Они также позволяют производить сравнительный анализ алгоритмов маршрутизации и протоколов передачи.

Вместе с тем известные количественные показатели оценки эффективности информационного обмена в сетях не позволяют оценить степень близости сети к идеальности. Для этого необходимо учитывать не только скоростные возможности сети, но и ее свойство хранить информацию, которое в совокупности с производительностью, через ограничения на время пребывания сообщений (инфцугов), учитывает структуру сети и все протоколы, определяющие временную задержку. Такую оценку можно осуществить только с использованием обобщенного параметра сети.

2.2. АНАЛОГИИ ФИЗИЧЕСКИХ И КИБЕРНЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В ИС для каждого УК, при занятости выходных КС, инфцуги ожидают своей очереди на передачу в УН. Любую такую сеть обычно рассматривают в виде множества связанных между собой ОС, каждая из которых представляет последовательно соединенные УН и КС. Формируемые источником инфцуги имеют выраженную в битах длину, для каждой i -й ОА-пары образуют путевой поток x_i , определяемый интенсивностью (инфцуг/с). Путьевые потоки, проходящие через какую-либо ОС, ввиду ограниченной производительности последней, испытывают сопротивление системы, в результате чего инфцуги накапливаются в УН, ожидая очереди на передачу.

Основной характеристикой количества обслуживаний для любой сети, в терминах информатики, служит производительность сети G , количественным показателем которой является число успешно переданных инфцугов пользователям-адресатам в единицу времени:

$$G = \frac{n}{t} [\text{инфцуг/с}]. \quad (2.7)$$

Как было отмечено выше (п. 2.1), основной характеристикой качества обслуживания любой сети является среднее время перемещения инфцуга \bar{T} (т.е. интервал времени, определяемый задерживанием у системы времени на передачу и задержками от момента восприятия инфцуга сетью до момента его выдачи пользователю-адресату). Помимо задачи минимизации \bar{T} , с целью повышения эффективности ИС, стремятся повысить производительность сети G при фиксированном значении \bar{T} . Однако характеристики \bar{T} и G не являются обобщенными. Другими словами, они не позволяют оценивать работу сети по пересылке информации между абонентами (пользователями).

Рассмотрим с физической точки зрения процесс передачи инфцугов по сети, используя аналогию¹⁵, подобно представленному в работе [109]. Так как инфцуги в процессе передачи перемещаются по сети от отправителя к адресату, то в системе затрачивается работа на их перемещение. Здесь учитывается

¹⁵ Использование теории подобия [108] из-за разной природы протекающих процессов затруднительно.

физический смысл работы (A), а именно то, что работа есть скалярное произведение силы (F) на путь s , причем подразумевается составляющая силы в направлении перемещения:

$$A = (\vec{F} \vec{s}) = |\vec{F}| |\vec{s}| \cos \varphi, \quad (2.8)$$

где \vec{F} – это вектор силы; \vec{s} – вектор перемещения; φ – угол между этими векторами. Это произведение указывает, что не при любых условиях можно полностью использовать всю величину силы \vec{F} , а лишь ее часть: $F_i = F \cos \varphi_i$, так как $\cos \varphi$ может быть меньше единицы.

Поэтому введем для оценки информационной эффективности ИС новую физическую характеристику, именуемую «мощность» или параметр, который является производной: $dA/dt \equiv P$. С точки зрения физики, «мощность» является характеристикой систем, в которых выполняемая работа изменяется во времени (которая отражает выполненную работу в единицу времени).

Для определения размерности кибернетической мощности используем аналогии с механикой и электродинамикой. Согласно LT -таблице¹⁶, в которой все физические величины располагаются в клетках, соответствующих степеням L и T , где $[L]$ и $[T]$ – размерности длины и времени, соответственно, мощность имеет размерность (L^5/T^5) . Это отношение определяется размерностью массы (L^3/T^2) , которая непосредственно измеряется и служит первичной величиной для косвенного определения вторичных (или производных) величин. Основой для ее выражения в виде отношения послужил закон И. Кеплера, согласно которому отношение куба радиуса орбиты, по которой движется планета вокруг Солнца, к квадрату периода ее обращения есть величина постоянная. Этот факт постоянства Ньютон выразил величиной, которую назвал массой. Масса в этом случае является количественной мерой инертности тела при изменении его скорости.

В информатике отношения между объектами количественно выражаются единицей измерения информации – байтом, который равен восьми битам. Для ИС эти отношения между ее абонентами выражаются сообщениями или пакетами, т.е. инфцугами, имеющими побайтную структуру, количественно измеряемую в битах. Для простоты анализа будем считать длины всех инфцугов одинаковыми. Количество информации в инфцуге, измеряемое в битах, характеризуется (как и масса тела) его «инертностью». Это объясняется тем, что передача инфцуга большей длины требует большего значения импульса силы информационного воздействия. Таким образом, при определении размерности кибернетической мощности (информационных сетей), первичной¹⁷ величиной, вводящейся безотносительно по отношению к любым другим величинам, служит количественная мера информации, единица измерения которой – бит. Исходя из этого, можно записать, что универсальный параметр мощности

$$[P] = \frac{L^5}{T^5} = \frac{L^3}{T^2} \frac{L^2}{T^3} = [M] \frac{L^2}{T^3} \equiv [P_{ИС}] = [L_I] \frac{L^2}{T^3}, \quad (2.9)$$

где $P_{ИС}$ ¹⁸ – кибернетическая мощность информационной сети; L_I – количество информации в инфцуге, выраженное в битах (семантический аспект информации не рассматривается), а индекс «к» означает величину длины в кибернетике.

Между массой и количеством информации существуют динамические аналогии. Согласно теории относительности, масса не считается величиной постоянной и определяется выражением

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (2.10)$$

т.е. она увеличивается при скоростях, близких к скорости света c .

Количество пользовательской информации также может с течением времени изменяться: инфцуг в полной степени информативен при практически мгновенном его доведении и практически остается таковым до некоторого предельного временного значения $T_{доп}$, после которого информация в нем «устаревает» и необходимость его использования исчезает. В связи с этим инфцуги уничтожаются.

¹⁶ Таблица Бартини, используется в работе [45].

¹⁷ Понятия первичных и вторичных величин рассмотрены в работах [108, 110].

¹⁸ В данном разделе в обозначениях обобщенного параметра используется понятие информационной сети.

Согласно второму закону Ньютона, в основу динамики любой механической системы положено ускорение (изменение скорости), причиной которого является сила. Силы же обнаруживаются во всех процессах за счет взаимодействия материальных тел и определяются известным физическим законом $F = ma$. Важнейшей характеристикой силы является ее материальное происхождение.

В ИС информационное взаимодействие ее элементов характеризуется не только значением скорости передачи инфцугов, но и количеством информации в них. Исходя из конечной скорости распространения в среде, скоростей обработки при приеме и передаче, где существенную роль играют аппаратные переходные процессы, и путевых скоростей «прохождения через УК», которые в большей степени определяются временем ожидания инфцугов при продвижении по пути к адресату, скорости передачи инфцугов изменяются во времени. Так как каждый путевой поток имеет направление и размерность, инфцуг/с, то произведение количества информации в инфцуге на «ускорение», т.е. скорость изменения потока, по сути есть сила, действующая в сети со стороны информационного источника. Любой инфцуг «перемещается» (передается) в сети к адресату на определенное расстояние, выраженное, например, числом переприемов. Это «перемещение» отражает факт совершения сетью работы.

Таким образом, используя аналогию с физической системой, можно записать:

$$[P] = \frac{L^3}{T^2} \frac{L}{T^2} \frac{L}{T} = [M][a] \frac{L}{T} = [F] \frac{L}{T} = [P_{ис}] = [A_{ис}] / T =$$

$$= [F_I] \frac{^k L}{T} = [L_I] \frac{^k L}{T^2} \frac{^k L}{T} = \frac{^k L^3}{T^3}, \quad (2.11)$$

где F_I – сила информационного взаимодействия в сети, затрачиваемая на передачу инфцугов определенной длины (бит · инфцуг / с²); $A_{ис}$ – работа сети по перемещению инфцугов (бит · инфцуг · длина перемещения / с²).

Таким образом, кибернетическая мощность ИС (исходя из принятой первичной величины – количества информации, выражаемого количественной мерой – битами) прямо пропорциональна 3-й степени длины и обратно пропорциональна 3-й степени времени.

Выражение (2.8) объясняет определяющую роль информационно-силовых (направленных) воздействий в сети на ее мощность. Так как вектор входного потока для каждой ОА-пары по направлению может не совпадать с векторами передач инфцугов между УК сети (отклонение направлений передач по различным причинам, в том числе из-за маршрутизации), то проявляется эффект косинуса φ. Таким образом, в информационной сети всегда имеется активная составляющая ее мощности и бесполезная (реактивная).

В классической механике важным понятием, характеризующим скорость изменения со временем некоторой величины, является количество движения, или импульс силы. Импульс – это произведение массы тела на его скорость. По аналогии, для принятой нами терминологии, в ИС информационным импульсом является произведение количества информации в одном инфцуге на скорость его передачи. Если принять, что информация во времени не стареет (передается в допустимых временных интервалах), то скорость передачи информации в единицу времени может служить аналогом импульса силы. Используя аналогию третьего закона Ньютона и вытекающего из него закона сохранения импульса, находим, что для идеальной сети поток (инфцуг / с), входящий в любой узел, должен быть в точности равен выходной скорости передачи (также как и скорости изменения этих величин), а в конечном счете скорость ввода в сеть отправителями инфцугов (и ее изменение) должна быть в точности равна скорости получения их адресатами. Однако реально в сетях с коммутацией (в силу наличия переходных процессов, с одной стороны, а с другой – случайного характера входных потоков) добиться выполнения этого правила крайне сложно. В связи с этим основной задачей при анализе и синтезе кибернетических систем, в том числе ИС, является расчет всех переходных процессов на всех функциональных уровнях. Ее решение может оказаться достаточно эффективным, если использовать аналогии с электрическими цепями (сетями).

В соответствии с положениями электродинамики мощность в электрической цепи определяется выражением

$$P = UI = I^2 Z, \quad (2.12)$$

где I – проходящий через цепь ток; Z – внешнее полное сопротивление цепи для переменного тока, т.е. величина, характеризующая противодействие цепи (проводников) электрическому току.

В общем случае полное внешнее сопротивление определяется равенством

$$Z = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} . \quad (2.13)$$

Рассмотрим случай использования только активной составляющей сопротивления. Омическим сопротивлением (R) обычно называют элемент, вызывающий потерю электрической энергии в виде тепловыделения, в результате противодействия структурных элементов проводника электрическому току. В результате приложения напряжения к концам сопротивления производится работа электрического поля по перемещению электрических зарядов между точками приложения, которая определяется законом Ома

$$U = IR . \quad (2.14)$$

Уравнение (2.14) показывает, что падение напряжения на активном сопротивлении пропорционально величине электрического сопротивления и силе тока. Электрический ток есть упорядоченное движение электрически заряженных частиц. Общность движущихся электромагнитных импульсов (поля и зарядов) в электрической цепи и передаваемых цугов в ИС состоит в их направленном характере. Электрический ток характеризуется силой тока

$$I = q_0 n \bar{v} S , \quad (2.15)$$

где q_0 – плотность заряда частицы; n – число заряженных частиц в единице объема; \bar{v} – средняя скорость направленного движения частиц; S – площадь поперечного сечения проводника.

Если в общем случае электрические заряды являются источником электромагнитного поля, определяют взаимодействие в электромагнитном поле и связаны с материальными носителями – частицами и полем, то множество инфцугов, имеющих направления передачи (определяемые адресацией), формируют информационное пространство, характеризуемое множеством пересекающихся и влияющих друг на друга путевых потоков. Размерность силы информационного воздействия на УК (или ОС) определена выше (бит · инфцуг / с²).

Информационный поток при прохождении через ОС испытывает сопротивление в виде временной задержки инфцугов. Так как время обработки обслуживающим прибором определяется длиной цугов (при фиксированных способностях узла), то кибернетическим сопротивлением ОС будем считать время нахождения инфцуга с заданной длительностью (в битах) в ОС

$$[R_{\text{сис}}] = \frac{T}{L} . \quad (2.16)$$

Таким образом, на основе (2.12) и (2.14) можем записать выражение для мощности ИС с позиции электродинамики

$$[P_{\text{ИС}}] = [I_{\text{вх}}][I_{\text{вых}}][R_{\text{сис}}] = \frac{L^3}{T^3} . \quad (2.17)$$

Выражение (2.17), как и (2.11), показывает, что кибернетическая мощность ИС прямо пропорциональна третьей степени длины и обратно пропорциональна третьей степени времени. В случае, когда поток стационарен, сила входного потока будет определяться импульсом силы информационного воздействия на узел, который определяется как $L_i v_{\text{вх}}$, где L_i – количество информации в одном цуге; $v_{\text{вх}}$ –

скорость следования инфцугов по каналу, входящему в узел. Исходя из вышеприведенного, выражение, аналогичное закону Ома, есть формула Литтла

$$L_i v_{\text{вх}} \frac{T}{L_i} = \lambda_{\text{вх}} T = N. \quad (2.18)$$

Она выражает связь основных параметров ИС в виде их средних значений. Кроме того, (2.18), аналогично (2.12), показывает, что число инфцугов в ОС пропорционально кибернетическому сопротивлению и входному потоку. В условиях большого входного трафика выходной поток во времени не меняется, так как скорость передачи определяется полностью пропускной способностью канала. В этом случае выходной поток, подобно (2.15), равен выходному импульсу информационного воздействия. С учетом того, что во всей сети скорость передачи информации условно может быть рассчитана в форме скорости передачи инфцугов (длительность инфцуга учитывается временем его обслуживания принимаемыми узлами), получим, что выходная скорость передачи цугов в канал является производительностью узла:

$$\lambda_{\text{вых}} = I_{\text{вых}} = G_i. \quad (2.19)$$

Таким образом, на основании (2.17) – (2.19) анализ информационного обмена методами электродинамики позволяет перейти к размерности, которая учитывает длительность инфцуга временным отрезком при обслуживании. Согласно (2.17) и (2.19), получим:

$$[P_{\text{ИС}}] = [\lambda_{\text{вх}}][R_{\text{сис}}][\lambda_{\text{вых}}] = \frac{L}{c} \frac{c}{1} \frac{L}{c} = \frac{L^2}{c}. \quad (2.20)$$

Используя (2.18), где произведение средней входной интенсивности на среднее время нахождения одного инфцуга в системе равно числу инфцугов, получим окончательно выражение для кибернетической мощности ИС

$$P_{\text{ИС}} = N \lambda_{\text{вых}} = N G |_T. \quad (2.21)$$

Выражение (2.21) показывает, что мощность ИС есть характеристика, учитывающая ее производительность и число инфцугов, находящихся в ней. Параметр T – время нахождения инфцугов в сети, в данном случае является ограничением, характеризующим систему. Это означает, что, задав гарантируемое сетью значение $T_{\text{доп}}$ при имеющейся производительности, можно найти мощность сети, которая определяет максимально допустимое число инфцугов N_{max} . В этом случае выражение для мощности ИС будет иметь вид

$$P_{\text{ИС}} = N_{\text{max}} G |_{T_{\text{доп}}}, \quad (2.22)$$

где G – производительность сети при максимально допустимом значении временной задержки $T_{\text{доп}}$.

Помимо этого установлено следующее. Так как на сопротивлении, через которое протекает ток, всегда имеет место падение напряжения, то по аналогии с электрическими системами можно считать выражение (2.18) определяющим кибернетическое напряжение, которое равно работе системы по перемещению одного инфцуга с входа сети на ее выход. Другими словами, число инфцугов в системе означает кибернетическое напряжение, которое вызывает входной поток в зависимости от пропускной способности канала.

Рассмотрим совокупность некоммутированных ОС. Проводя аналогию с тензорным анализом электрических сетей [43] в качестве эталонной сети, целесообразно рассматривать примитивные контурные или разомкнутые сети ОС. Если кибернетическую мощность одной ОС определить как

$$P_i = N_i G_i |_{T_{\text{доп}}}, \quad (2.23)$$

то кибернетическая мощность примитивной сети из M ОС, при одинаковом ограничении на T , будет определять мощность идеальной сети

$$P = \sum_{i=1}^M P_i = \sum_{i=1}^M N_i G_i = P_{\text{ИДС}}. \quad (2.24)$$

Последняя характеризует предельные физические возможности системы по передаче информации с заданным ограничением на T и может отождествляться с понятием входной мощности.

Таким образом, на основе аналогий с электродинамикой появилась возможность исследовать сложные явления и процессы в ИС при помощи общезначимых параметров. Их можно перевести в термины электродинамики и в термины информатики, что и показано в табл. 2.1 [91, 111, 112]. Она позволяет представить абстрактные понятия информатики в метрологически корректных физико-технических терминах, необходимых для разработки методик аттестации ИС в смысле информационной эффективности.

Таблица 2.1

Физика		Кибернетика (информационные сети)	
Используемые параметры	РАЗМЕРНОСТЬ	Используемые параметры	Размерность
ПЕРЕМЕЩЕНИЕ	$[L]$	Перемещение	$[L]$
Время	$[T]$	Время	$[T]$
Масса	$[L^3/T^2]$, кг	Количество информации	$[L]$, бит
		Информационный цуг (неделимая совокупность информации, передаваемая по системе)	$[^kL]$
Скорость	$[L/T]$, м/с	Поток инфцугов	$[^kL/T]$, инфцуг/с
Ускорение	$[L/T^2]$, м/с ²	Скорость изменения потока	$[^kL/T^2]$, инфцуг/с ²
Сила	$[L^4/T^4]$, Н	Сила входного потока	$[^kL^2/T^2]$, бит·инфцуг/с ²
Работа (Энергия)	$[L^5/T^4]$, Дж	Работа	$[^kL^3/T^2]$, бит·инфцуг·длина пути/с ²
Мощность	$[L^5/T^5]$, Вт	Кибернетическая мощность	$[L^3/T^3]$, бит·инфцуг·длина пути/с ³ , $[L^2/T]$, инфцуг ² /с
Напряже-	В	Кибернетическое на-	$[^kE]$, чис-

ние		пряжение	ло цугов в системе (НУ)
Сопро- тивление (актив- ное)	Ом	Кибернетическое со- противление системы	$[T/{}^kL]$, время, необхо- димое на инфцуг

2.3. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СЕТИ

Отношение мощностей, определяемых выражениями (2.20) или (2.22) и (2.24), дает понятие коэффициента кибернетического полезного действия (кпд) $\eta_{ИС}$, т.е. отношение полезной кибернетической мощности сети к предельно возможной – полной или входной:

$$\eta_{ИС} = \frac{P_{ИС}}{P_{ИДС}}, \quad (2.25)$$

где $P_{ИДС}$ – кибернетическая мощность идеальной сети.

Принципиально значение $P_{ИДС}$ отображает максимально возможное количество передаваемой и одновременно находящейся в системе информации при условии абсолютной ортогональности всех одно-канальных систем (каналов) и ограничении на временную задержку $T_{доп}$.

По значению параметров $P_{ИС}$ и $\eta_{ИС}$ можно однозначно оценить эффективность сети и ее функциональные возможности. Заметим, что определяющим при этом является временная задержка, или кибернетическое сопротивление. Максимальное значение параметра η для сети с потерями позволяет найти целесообразное соотношение между временной задержкой T и сетевым трафиком.

Согласно (2.8), информационная эффективность ИС также может быть охарактеризована «потерями на $\cos \varphi$ ». В шестом разделе введено понятие пространств состояний КС и путевых потоков. В пространстве состояний КС их взаимное информационное влияние определяется метрическим тензором, компонентами которого являются косинусы углов. Они и определяют реактивную составляющую кибернетической мощности путем вычислений скалярных произведений передаваемого количества информации в КС и путях.

2.4. Использование кибернетических параметров для оценки эффективности мобильной

ПАКЕТНОЙ РАДИОСЕТИ

Для демонстрации эффективности использования показателя кибернетической мощности информационной сети проведено моделирование пакетной радиосети в режиме информационного обмена, где инфцуги соответствуют пакетам фиксированной длины. Топология сети задается диграфом $G(N, L)$, где $N = \{i_v, v = 1, \dots, n\}$ есть множество его вершин, а L – множество ребер графа. Вершины соответствуют абонентам сети, а ребра – линиям связи, которые связывают этих абонентов. Ребро, соединяющее две соседние вершины i и j , имеет длину $d_{ij} > 0$, которая характеризует взаимную удаленность абонентов i и j . Смена состояния каждого ребра определяется как дискретный марковский процесс с двумя состояниями: E_1 – существует линия связи, E_0 – линия связи отсутствует. Вероятности начального состояния заданы как $P_1(0) = P_{св}$, $P_0(0) = 1 - P_{св}$, где $P_{св}$ – вероятность связи двух вершин. Время пребывания линии связи в состоянии E_v , $v = 1, 2$, распределено экспоненциально с параметром λ_v , который характеризует среднюю интенсивность в переходах за минуту из состояния E_v .

Относительно модели ПРС принято условие единичного захвата с вероятностью 1. Эти условия использованы при моделировании протокола обмена служебной информацией и реализации протокола передачи пользовательской информации.

В основу решения задачи маршрутизации положен распределенный асинхронный алгоритм Беллмана–Форда [6]. Для определения кратчайшего пути до адресата k абонент i производит итерации

$$D_{ik} := \min_{j \in N(i)} \{D_{jk}\} + 1 \text{ для всех } i \neq k, \quad (2.26)$$

где D_{jk} – последняя оценка, полученная от соседей $j \in N(i)$. Значение 1 в правой части означает первую уходящую дугу (i, j) с геометрической длиной d_{ij} . В случае, когда маршрутов одинаковой длины для пары источник–адресат несколько, выбирается маршрут, у которого первая уходящая дуга, по решению отправителя, имеет минимальное значение d_{\min} (на основе захвата).

Этот алгоритм маршрутизации условно будем считать вариантом А. Вариант Б соответствует дальнейшему совершенствованию системы, когда предполагается возможность тройного захвата. Используя свойство такой сети, из трех уходящих ЛС на направлениях, кратчайших по числу транзитных участков путей, алгоритмом выбирают ту, которая соответствует соседнему УК с наименьшей загрузкой УН.

Структура ФК для обмена маршрутной информацией. ФК является каналом с временным разделением по двум информационным признакам [78, 81 – 83]. Временное разделение по первому информационному признаку означает закрепление временного окна за пользователем сети, в котором разрешено передавать о нем всем абонентам сети. Представление окна посредством микроокон, число которых равно максимально возможному числу транзитных участков в ПРС, отражает временное разделение ФК по второму информационному признаку. При этом в нулевом микроокне окна i разрешается передавать только пользователю, который закреплен за окном i . В первом микроокне окна i передают все его соседи. Во втором микроокне – соседи соседей и т.д.

Передача пользовательских инфцугов с запросом. Формирование пользовательских инфцугов производится в моменты времени, образующие пуассоновский поток с параметром $\Lambda = \sum \lambda_i$, где λ_i есть интенсивность формирования инфцугов пользователем-источником i , $i \in \mathbf{M}$. При этом для него случайный точечный процесс $X_t^{(i)} = (x_1^{(i)} \leq x_2^{(i)} \leq x_3^{(i)} \leq \dots \leq x_s^{(i)} \leq t)$, где $t \in [0, \infty)$, является маркированным. Марку точки $x_s^{(i)}$ определяют номер пакета s и его маршрут, определенный согласно МТ абонента. При формировании инфцуга заполняется его заголовок. В поля «источник» и «отправитель» записывается идентификатор абонента-источника i . В поле «адресат» – идентификатор адресата j , $j \in \mathbf{M}$, случайно взятый из МТ источника. Из МТ выбирается идентификатор транзитного абонента, который является ближайшим на пути к адресату и заносится в поле «следующий». В поле «время формирования» записывается время возникновения инфцуга $x_s^{(i)}$, в поля «время передачи» и «время задержки» – нуль. В поле «пространственные координаты» записываются текущие координаты отправителя (на промежуточных этапах передачи записываются текущие координаты транзитного отправителя).

Индивидуальная обработка инфцугов осуществляется в порядке их поступления (ОПП). Для этого просматривается УН пользовательских инфцугов, выбирается инфцуг с наименьшим временем формирования. Анализируется МТ, и в случае положительного решения инфцуг помещается в буфер для передачи. Условием положительного решения при анализе является наличие в МТ строки с данным адресатом. В противном случае передача откладывается на случайный интервал времени от 1 до 5 с, и процесс выбора инфцуга для передачи повторяется.

Передача инфцугов, например, источником $i = 2$ адресату начинается в момент t_v , если выполняется условие $x_s^{(2)} < t_v < t$, т.е. время формирования меньше текущего (t_v есть временная метка, с которой можно начинать передачу, $t_{v+1} - t_v = \Delta t = 0,05$ с). При этом передается запросный инфцуг транзитному абоненту в ГЗК с СМД. Запрос необходим для получения разрешения на передачу пользовательского инфцуга в индивидуальном канале получателя (канал закреплен на прием). Длина запросного инфцуга, так же как и инфцуга разрешения, существенно меньше длины пользовательского инфцуга. Начиная с момента t_v , передаются запросные инфцуги и другими абонентами. Захваченный инфцуг помещается в буфер хранения запроса. Если $\Delta t n > \tau_{\text{зап}}$ (n – целое число, $\tau_{\text{зап}}$ – временной интервал, необходимый для передачи и приема запросного инфцуга), то в очередной момент времени $t_v + n$ транзитный абонент начинает передавать инфцуг-разрешение отправителю 2 в его подканале. После получения разрешения отправитель 2 снимает свой запрос и с началом очередного момента времени $t_v + n + m$ начинает передачу пользовательского инфцуга в информационном подканале транзитного абонента. Приняв пользовательский инфцуг, транзитный абонент посылает квитанцию в подканале отправителя, при получении кото-

рой отправитель стирает переданный инфцуг в УН пользовательских инфцугов. При продвижении по сети в пользовательском инфцуге изменяются поля его заголовка (кроме полей «источник» и «адресат»). При этом определяется временная задержка передаваемого инфцуга. В случае, если временная задержка инфцуга превышает 30 с, он выводится из системы и считается потерянным.

Темп передачи инфцугов зависит от приема запросов в ГЗК, которые передаются отправителем постоянно с каждым моментом t_v до получения инфцуга-разрешения. Однако в силу непостоянства линий связи как запрос, так и разрешение могут быть не приняты соответственно получателем и отправителем. С учетом этого в случае отсутствия в пятисекундный интервал времени разрешения отправителем уничтожается запросный инфцуг и делается попытка передать следующий инфцуг (альтернативная маршрутизация отсутствует). Запросы, поступающие к получателю в момент занятости буфера запросов, игнорируются.

Получатель, принявший запрос и передавший разрешение, в случае необнаружения передачи пользовательского инфцуга в течение 5 с, снимает сигнал разрешения и стирает инфцуг в буфере запросов.

Результаты моделирования. Моделирование проведено для сети с $m = n = 30$. Связность графа $G(N, L)$ определена с вероятностью связи $P_{св}$. Каждая ЛС за одну минуту в среднем меняет свой статус на противоположный (наличие или отсутствие). Пропускная способность индивидуальных КС 2400 бит/с, а служебных (запросных и каналов подтверждения) во всех случаях – 300 бит/с. Длина пользовательских инфцугов 300 бит, служебных – 75 бит. Время жизни пользовательского инфцуга – 30 с, емкость УН инфцугов – 200, максимальное число транзитных участков – 4. На всех приведенных рисунках: *a* – алгоритм маршрутизации А; *б* – алгоритм маршрутизации Б. Кривые 1, 2, 3 и 4 соответствуют связностям сети при $P_{св} = 0,9$, $P_{св} = 0,7$, $P_{св} = 0,5$ и $P_{св} = 0,3$, соответственно.

Зависимость временной задержки пользовательских инфцугов от входной интенсивности приведена на рис. 2.1. Некоторый спад задержек, для высокой входной нагрузки – более 110 инфцугов/с, объясняется уничтожением инфцугов в УН, время жизни которых больше 30 с. Зависимость производительности сети от входного трафика представлена на рис. 2.2. Как видно из рисунков, эффективность ПРС с вариантом маршрутизации Б выше, что очевидно, так как он учитывает загрузку УН абонентских терминалов.

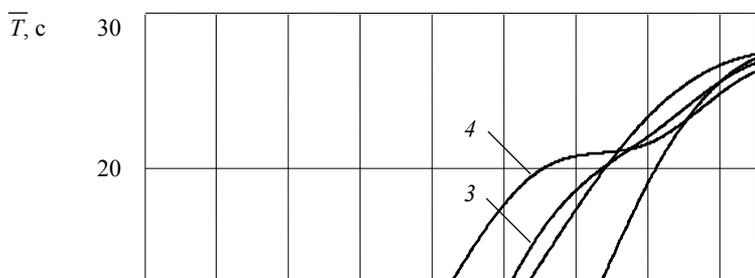
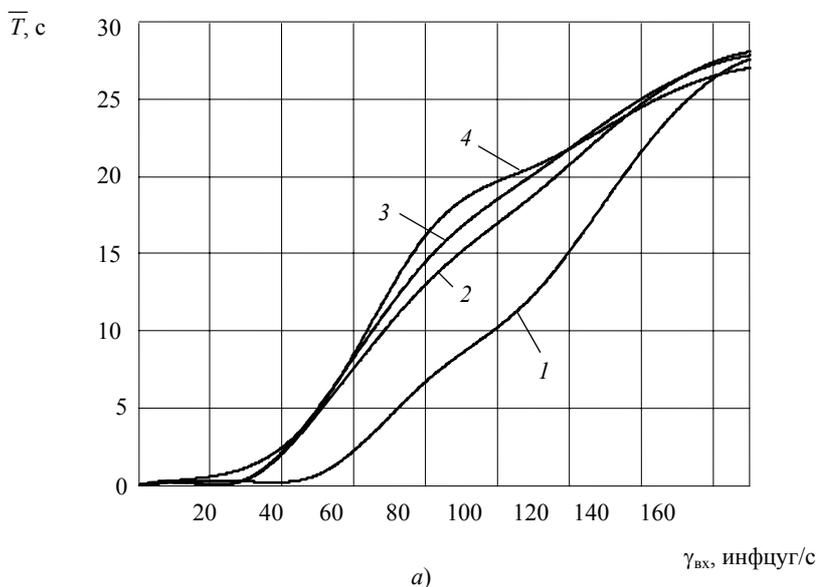


Рис. 2.1

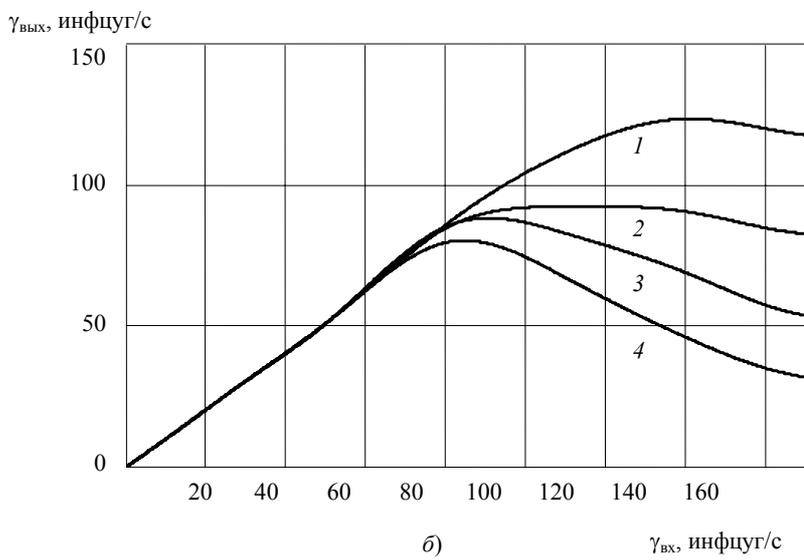
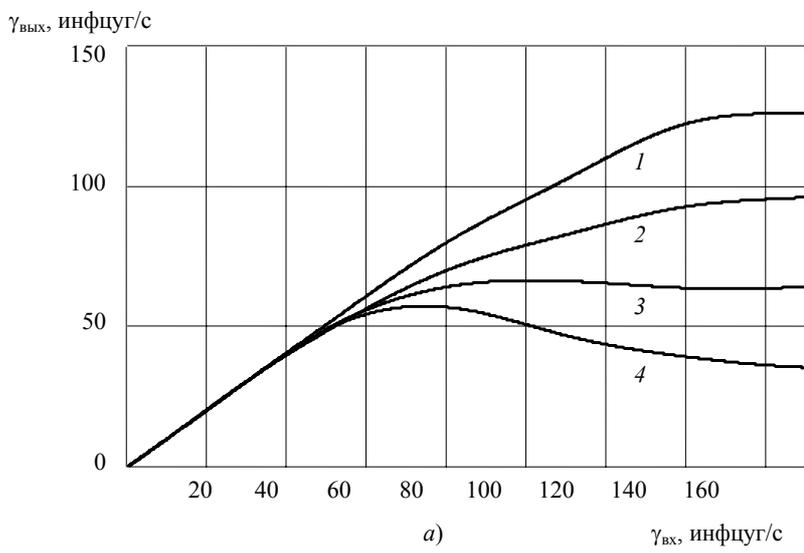


Рис. 2.2

Сравнительный анализ эффективности различных алгоритмов маршрутизации, в частности исходного (вариант А), учитывающего пространственное расположение абонентов (в секторах) и учитывающего дополнительно нагрузку УН трех наилучших соседних абонентских терминалов (на основе тройного захвата), можно осуществить, используя показатель относительной эффективности $\Delta\bar{T}$ (рис. 2.3). Указанные особенности алгоритмов маршрутизации соответствуют кривым 1, 2 и 3.

Значения приведенных показателей на рис. 2.1 – 2.3 даже в комплексе не дают полного представления о том, насколько сеть эффективна в смысле передачи информации относительно ее предельных возможностей. Такую оценку можно получить, применяя параметр «кибернетическая мощность» $P_{ис}$. При этом, вычислив ее значение для идеальной сети, можно определить КПД сети в смысле передачи информации $\eta_{ис}$.

Зависимости $\eta_{ис}$ от входного трафика для ПРС с различными значениями пропускных способностей индивидуальных КС ($C = 1200$ бит/с, $C = 2400$ бит/с и $C = 4800$ бит/с) приведены на рис. 2.4, 2.5 и 2.6, соответственно.

Вертикальными пунктирными линиями показаны границы входного трафика, когда сеть работает без потерь. Анализируя полученные результаты по кривым на рис. 2.4, 2.5 и 2.6, можно сделать следующие основные выводы относительно обмена информацией в ПРС со случайной топологией.

$\Delta\bar{T}$

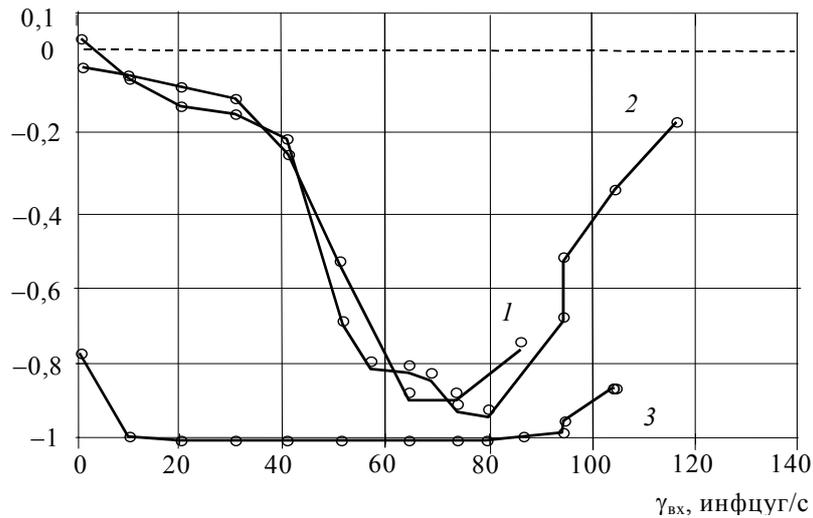
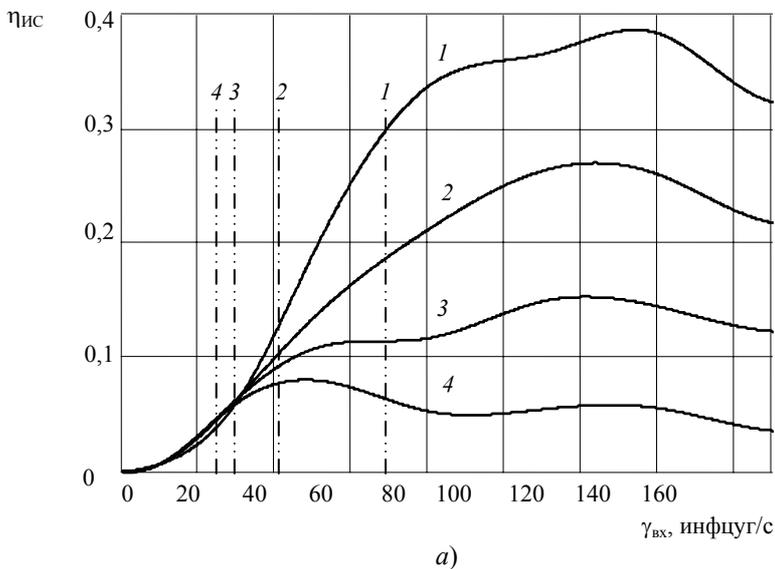


Рис. 2.3



а)

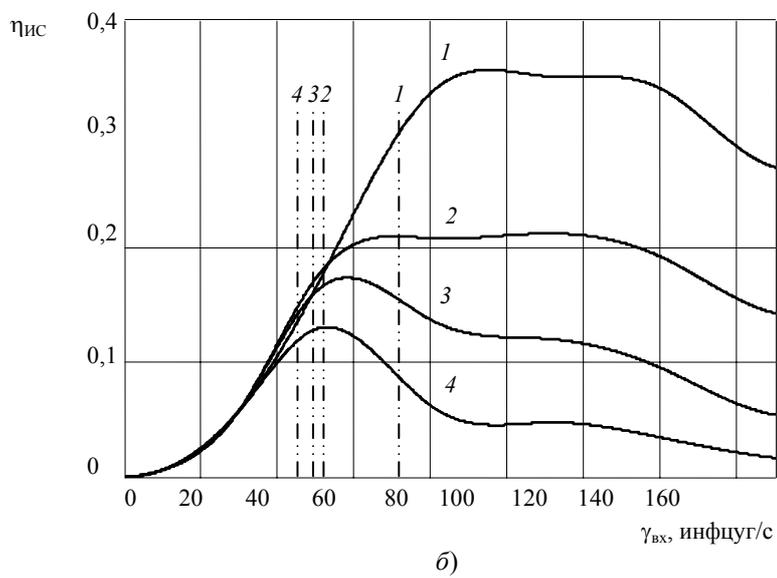


Рис. 2.4

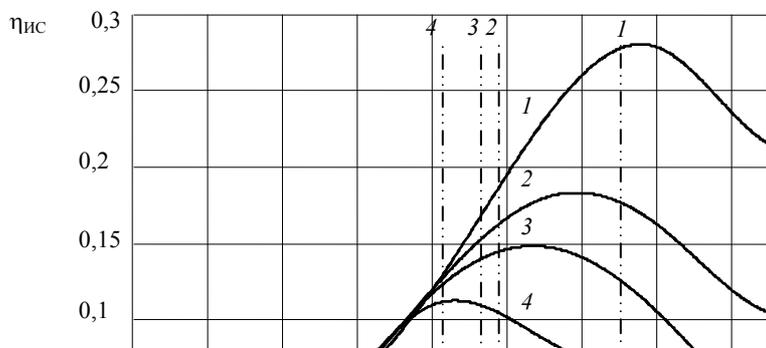
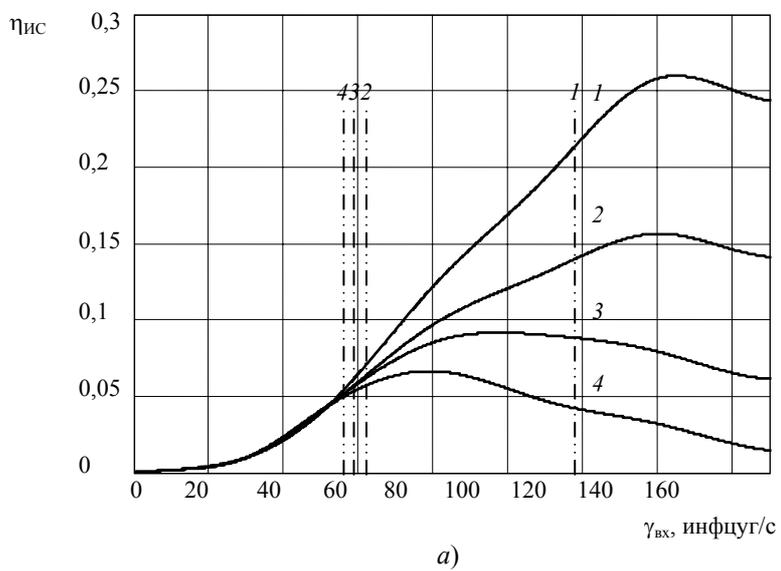
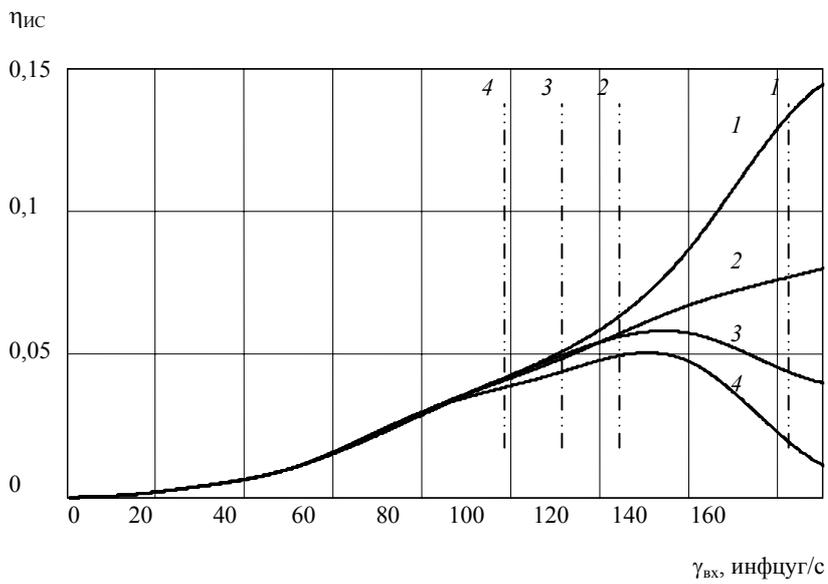
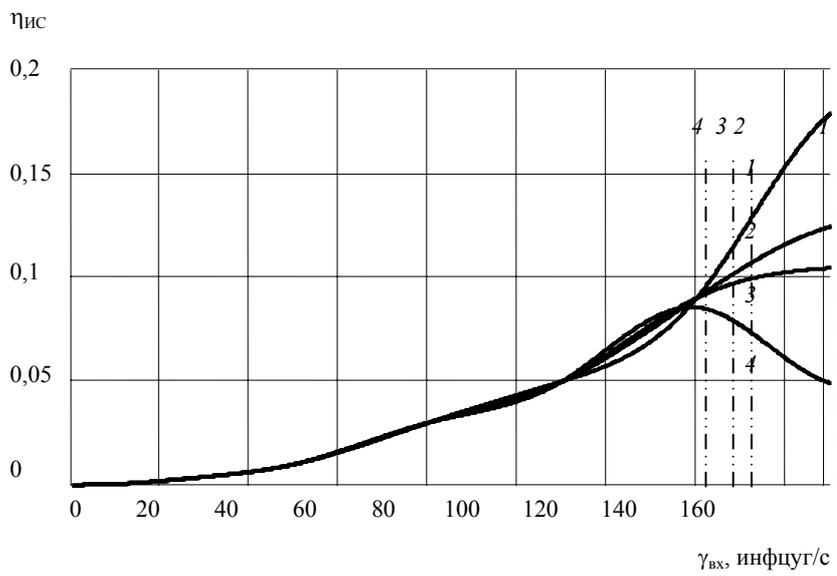


Рис. 2.5



а)



б)

Рис. 2.6

Во-первых, введение ограничения на потери инфцугов (вероятность потери одного инфцуга около $0,7 \cdot 10^{-5}$) с точки зрения эффективности информационного обмена является невыгодным, если связность сети невысокая. Например, при $C = 2400$ бит/с и алгоритме маршрутизации А $\eta_{ИС}$ увеличивается от значения $\eta_{ИС} \approx 0,07$ при $P_{св} = 0,7$ до $\eta_{ИС} \approx 0,22$ при $P_{св} = 0,9$. Во-вторых, $\eta_{ИС}$ имеет максимальное значение, если предложить относительно высокую входную нагрузку и допустить большой процент потерь инфцугов. Так, например, при алгоритме маршрутизации А, связности сети, определяемой $P_{св} = 0,5$,

$C = 2400$ бит/с, сеть имеет максимальное значение $\eta_{ИС}$ при входном трафике около 90 инфцугов/с. Потери инфцугов при этом составляют примерно 14 %. В-третьих, с увеличением пропускной способности КС, при фиксированной длине инфцугов, $\eta_{ИС}$ уменьшается. Например, при $P_{св} = 0,7$, алгоритме маршрутизации Б и $C = 1200$ бит/с максимальное значение $\eta_{ИС} \approx 0,21$, при $C = 2400$ бит/с – $\eta_{ИС} \approx 0,18$, а при $C = 4800$ бит/с – $\eta_{ИС} \approx 0,15$. Такое изменение обусловлено влиянием эффекта коммутации, так как время нахождения инфцугов в УК становится существенно большим по сравнению с временем нахождения инфцугов в процессе передачи по КС.

Таким образом, на примере имитационной модели мобильной ПРС показано, что в отличие от известных характеристик ИС – производительности сети и средней временной задержки – применение параметра кибернетической мощности и КПД в смысле передачи информации позволяет производить оценку эффективности ПРС относительно предельных возможностей передачи пользовательского трафика. Кроме того, кибернетическая мощность наиболее полно одновременно отображает свойства сети: хранение инфцугов в процессе передачи и ее производительность.

3. СИНТЕЗ ИЗБЫТОЧНЫХ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ СТРУКТУР ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ ЦИФРОВЫХ РАДИОСЕТЕЙ

В сетях связи со случайной топологией рекомендуемое число соседей для каждого УК существенно превышает их минимально необходимое значение регулярных детерминированных структур [71]. Так как в мобильных ЦРС¹⁹ применяются случайные топологии [58, 80], то это означает, что они, обладая структурной избыточностью, имеют сниженную эффективность информационного обмена (что подтверждается низким $\eta_{ИС}$, см. п. 2.4). В связи с этим, предлагается для таких сетей формировать детерминированные структуры с минимально допустимой связностью, используя ресурс избыточности случайных топологий для обеспечения функциональной устойчивости, и применять эффективные методы расчета сетей в условиях высокого трафика с учетом информации о их топологии.

Использование детерминированных структур мобильных ЦРС обусловлено следующим важным обстоятельством. В данной работе топология нагруженной ЦРС используется для определения систем координат в пространствах состояний КС и путевых потоков. При этом изменение топологии означает преобразование систем координат. Поэтому процесс преобразования должен быть предсказуемым, строго определенным. Кроме постоянства на интервале определения состояния ЦРС, топология должна соответствовать протекающим в ней процессам.

Детерминированный подход при формировании структур мобильных ЦРС, находящихся в сопредельных состояниях, позволяет обратить внимание на следующий важный факт напряженных физических систем. Он был выявлен проф. Т. Гораздовским²⁰ и заключается в следующем: реоменные струк-

¹⁹ Представителями мобильных ЦРС, с ярко выраженными проблемами сетевого и канального уровней, являются ПРС УКВ диапазона.

²⁰ Его описание имеется в работе [113].

туры, находящиеся в *напряженном* состоянии, разрушаются не произвольно, а по струне. Аналогично можно предположить, что ЦРС, находящиеся в сопредельном состоянии, в случае, например, перегрузки информационным трафиком, будут распадаться на несвязные части по совокупности перегруженных КС, обладающей свойством струны. Для повышения надежности нагруженных ЦРС это предположение требует отдельного исследования сопредельных состояний. С целью его проведения необходимо формировать топологии, которые независимо от динамики УК и изменчивости трафика являются устойчивыми на интервале рассмотрения.

В разделе показано построение детерминированных структур мобильных ЦРС, в которых могут определяться их ослабляющие, усиливающие или нейтральные элементы. На основе ТНМ предложен метод формирования различных сложных ЦРС, где каждый элемент структурно идентичен сложной конфигурации (подобно фракталам). Метод позволяет получить тороидальные структуры, которые могут при фиксированном числе КС существенно изменять их структурные характеристики.

Выбор в качестве математического аппарата ТНМ обусловлен, с одной стороны, возможностью описания детерминированных структур, в том числе сложных, приспособленных к условиям динамики, с другой – их описанием, позволяющим связать структурное построение ЦРС с метрикой пространства состояний КС. При этом функции принадлежности элементов ЦРС (КС, УК) могут быть определены с учетом значений косинусов углов метрического тензора информационного пространства.

3.1. ЗАДАЧА СИНТЕЗА ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ СТРУКТУР ЦИФРОВЫХ РАДИОСЕТЕЙ С МОБИЛЬНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Формирование топологий ЦРС предполагает использование эвристических подходов, в основе которых лежат наиболее разработанные: вогнутый метод устранения ребер [2] и метод насыщенного сечения

[2, 4, 6, 7]. Задача оптимизации структуры предполагает ее пошаговое изменение путем удаления или замены недогруженных ребер при выполнении ограничения по связности и диаметру [7, 114]. При этом качество ее решения оценивается такими показателями, как стоимость, среднесетевая задержка и производительность.

Эта задача осложняется частыми изменениями связности, которые характерны для мобильных ЦРС. Из-за изменчивости трафика определенная в один интервал времени структура может оказаться нецелесообразной в следующий временной интервал. Поэтому относительно высокая мобильность может не позволить оптимизировать сеть с помощью многократного чередования процедур трансформации топологии и распределения потоков, так как внешние условия могут меняться быстрее, чем решается задача.

Согласно [71], наибольшей информационной эффективностью обладают сети связи, число соседей в которых для каждого узла при случайной топологии составляет шесть – восемь, а при детерминированной – три. Исходя из этого, с целью решения топологической задачи далее в работе предлагается применить следующий подход: *формировать избыточную детерминированную структуру для мобильной ЦРС таким образом, чтобы использовать имеющуюся избыточность (например, шесть – восемь вместо трех соседей) для усиления реакции на изменчивость этой структуры из-за каких-либо разрушающих факторов.*

В настоящее время многие ЦРС, с одной стороны, обладают высокой избыточностью абонентов, с другой – ограничением на пользование сетевыми услугами. Примером могут служить системы связи военного назначения, где последнее обстоятельство в большей степени обусловлено отсутствием для многих абонентов необходимости сетевых услуг. Исходя из этого, на организацию топологии мобильной ЦРС накладываются следующие ограничения. Все множество абонентов ЦРС представим двумя непересекающимися подмножествами: подмножеством абонентов – пользователей сети и подмножеством абонентов, которые могут участвовать в функционировании ЦРС, но не пользоваться ее услугами (или ограниченные в пользовании). Таких абонентов будем называть фоновыми абонентами (ФНА).

Разделение абонентов сети на два подмножества позволит обеспечить надежное функционирование ЦРС в интересах небольшой группы абонентов-пользователей. Избыточность физической структуры

сети позволяет осуществить построение упорядоченной логической структуры, в которой уровни принадлежности абонентов сети к различным сетевым подгруппам могут быть представлены в виде различных функций принадлежности к мягким подмножествам, характеризующим эти подгруппы. Используя теорему о декомпозиции (определяющей возможность разложения нечеткого множества на совокупность обычных множеств по различным уровням), процедуру подключения и взаимного дублирования УК (или КС), можно демпфировать изменения трафика, корректируя структуру. Кроме того, определив структуру из непосредственных пользователей (будем считать ее основной), можно поддерживать ее надежность фоновыми абонентами. Поясним это на примере поддержания связности основной структуры (рис. 3.1) из четырех узлов $1 - 4$ (условно узлы A) с привлечением четырех узлов-дублеров $1' - 4'$ (узлы A').

Каждый ФНА, кроме непосредственной связи $A - A'$ со своим пользователем, имеет связи и с его соседями. Это позволяет, при ухудшении непосредственной связности между пользователями, передать часть сетевых функций узлу-дублеру, т.е. ФНА. Таким образом, логическое перераспределение функции «основной – дублер» путем изменения функций принадлежности в сторону основной структуры может обеспечить ее устойчивость, используя ресурс ФНА. На рис. 3.1, б, в показаны варианты дублирования абонентов, которые могут быть реализованы для различных ситуаций, например: выход из строя одного узла и отказ одновременно двух узлов, соответственно.

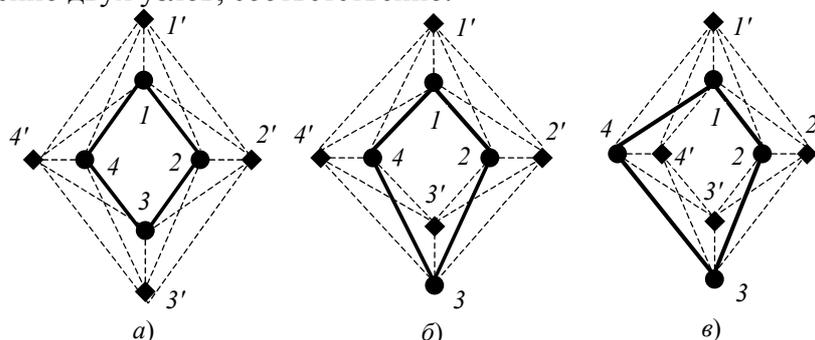


РИС. 3.1

Если топологию избыточной сети в смысле числа абонентов описать нечетким графом, то последний аналитически разлагается по уровням, которые могут характеризовать используемую избыточность любых функциональных особенностей, например, структурную надежность или необходимую логическую связность. На каждом уровне имеют место обычные множества абонентов:

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 \\ \hline 0,1 & 0,8 & 0,5 & 0,9 & 0,7 \\ \hline \end{array} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,1 \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 \\ \hline 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ \hline \end{array}, \\ 0,7 \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 \\ \hline 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ \hline \end{array}, \\ 0,8 \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 \\ \hline 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ \hline \end{array} \right\} \quad (3.1)
 \end{array}$$

где 0,1; 0,7; 0,8 – коэффициенты, характеризующие указанные параметры – структурную надежность или степень логической связности.

Как видно, имеется возможность перехода к топологиям различной связности.

Анализ существующих алгоритмов управления топологией мобильной ЦРС подтверждает возможность повышения производительности радиосети на основе поддержания фиксированного числа соседних узлов каждого узла, например, управлением мощностью передатчиков [58], уменьшением или увеличением числа соседей для каждого абонента. В связи с этим задача выделения необходимой логической (отображающей необходимое взаимодействие между абонентами) структуры из избыточной физической структуры является реализуемой.

Указанное выше делает возможным решение следующих задач:

1. Поддержание необходимой структурной устойчивости радиосети на основе алгоритма оценки деформации избыточной детерминированной структуры и дублирования отказавших элементов.

2. Формирование детерминированной топологии сложной сети, позволяющей быстро распространять служебную информацию на основе ее логического построения.

3. Разработка гибкой, параметрически управляемой, детерминированной топологии, согласующейся с уровнем входной нагрузки сети и алгоритмом ее управления.

Решение этих задач приведено в работах [115 – 127].

3.2. ПОДДЕРЖАНИЕ НЕОБХОДИМОЙ СТРУКТУРНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ МОБИЛЬНОЙ ЦИФРОВОЙ РАДИОСЕТИ

Управление топологией мобильной ЦРС основано на оценке ее качества по степени изменения структурных характеристик и влияния элементов (УК и КС) на деформацию структуры. Первое предполагает исследование уже сформированных структур, второе – возможность разработки алгоритмов структурной устойчивости и поэтому является объектом дальнейшего рассмотрения. При рассмотрении этого вопроса использована ТНМ [25 – 36], а также подход [36], использующий для описания нечетких графов понятие нечеткого множества, введенного Заде.

В качестве входного параметра задачи оценки структуры сети будем использовать качество КС. На основе этого топология в целом будет оцениваться по соотношению числа «хороших», «плохих» и «разорванных» путей передачи информации, представляемых цепями на графе.

В силу различного качества КС топологию сети представим нечетким графом $\tilde{G}(X, \Gamma)$ с конечным множеством вершин X ($x_i \in X, i = 1, 2, \dots, n$) и нечеткими, в смысле расплывчатости (или мягкости), множествами Γ_x соседних вершин, для каждой вершины $x \in X$. Функции принадлежности $\mu_{\Gamma_x}(y)$ узлов $y \in X$ к подмножеству Γ_x принимают значения из отрезка $[0, 1]$ и характеризуют степень принадлежности абонентов из X к множеству Γ_x . Далее, с целью упрощения записи функции принадлежности, вместо $\mu_{\Gamma_x}(y)$ по тексту будет использоваться запись $\mu_{xy} \equiv \mu_{ij}$, где $i, j = 1, 2, \dots, n$ из X . Тогда $M = \|\mu_{ij}\|$ является матрицей отношений графа \tilde{G} . отождествим степень принадлежности с надежностью КС. Представим цепь в графе \tilde{G} из w последовательно соединенных линий, которая начинается из узла i и заканчивается в узле k , в виде

$$\gamma_{i,k,\alpha}^w = (\mu_{i,j_1}, \mu_{j_1,j_2}, \dots, \mu_{j_{w-1},k}). \quad (3.2)$$

Индекс α служит меткой рассматриваемой цепи и характеризует начинающиеся в i -м узле все s пути длиной из w линий. Прочность данного пути $\sigma(\gamma_{i,k,\alpha}^w)$, очевидно, определяется надежностью самой слабой линии связи. Поэтому с учетом (3.2) прочность пути можно определить:

$$\sigma(\gamma_{i,k,\alpha}^w) = \mu_{i,j_1} \wedge \mu_{j_1,j_2} \wedge \dots \wedge \mu_{j_{w-1},k}. \quad (3.3)$$

Известно, что произведение матриц предполагает операции умножения и суммирования. Если, основываясь на ТНМ, их заменить соответствующими операциями взятия \min (\wedge) и \max (\vee) соответственно, то умножение матрицы $M = \|\mu_{ij}\|$ w раз самой на себя приведет к матрице M^w , в которой каждый элемент можно определить в виде

$$\mu_{ik}^w \equiv m_{i,k}^w = \sigma(\gamma_{i,k,1}^w) \vee \sigma(\gamma_{i,k,2}^w) \vee \dots \vee \sigma(\gamma_{i,k,s}^w),$$

или

$$\mu_{ik} = \underset{\alpha}{\vee} \sigma(\gamma_{i,k}^w), \quad (3.4)$$

где $\underset{\alpha}{\vee}$ означает взятие максимума, т.е. определение максимальной прочности, по всем s цепям длины w , соединяющим вершины i и k . Другими словами, каждый элемент матрицы M^w , определяемый мини-максной операцией (3.3) и (3.4), представляет собой прочность самой прочной цепи среди всех цепей длины w .

Согласно рассмотренному выше, процедура определения максимального элемента всех матриц степени не более w , т.е.

$$M + M^2 + \dots + M^w, \quad (3.5)$$

определит самую прочную цепь из всех цепей длины не более w .

В (3.5) знак «+» означает взятие \max по каждому элементу всех матриц. Таким образом, приведенная последовательность операций (3.3) – (3.5) позволяет определить самые прочные пути на основе используемых функций μ_{ij} .

С целью определения степени надежности топологии ЦРС рассмотрим известную градацию описывающих их графов относительно характеристики связности:

U_1 – множество всех слабых графов;

U_2 – множество всех односторонних графов;

U_3 – множество сильных графов. Очевидно, $U_3 \subset U_2 \subset U_1$.

Определим степень влияния каждого узла (или в равной степени каждой линии, в зависимости от рассмотрения типа графа) на изменение связности сети. Используем понятие «ослабляющих», нейтральных или усиливающих узлов и обозначим непересекающиеся множества следующим образом [36]:

$$C_3 = U_3; \quad C_2 = U_2 - U_3; \quad C_1 = U_1 - U_2. \quad (3.6)$$

Пусть некоторый оргграф $G \in U_2$. Тогда $G - x_1$, где x_1 – условно первая вершина графа, будет оргграф, полученный в результате удаления вершины x_1 . Очевидно, что если полученный оргграф будет принадлежать множеству C_3 , т.е. является сильным, то первая вершина исходного графа будет ослабляющей (W -вершиной), если $G - x_1 \in C_2$, то x_1 – нейтральная (N), в противном случае – $G - x_1 \in C_1$, вершина x_1 является усиливающей (S). Учитывая возможность абонента принадлежать различным подмножествам множества X (или подсетям), а также рассмотрение его в оргграфе, он может быть одновременно W , N и S – вершиной, т.е. (W, N, S) – типом.

В первых двух случаях, т.е. в графах C_3 и C_2 , две любые вершины соединены ориентируемым путем. Это означает, что для определения наиболее прочного пути между парами узлов необходимо использовать выражение (3.4) и процедуру (3.5). В третьем случае, т.е. когда имеет место слабый оргграф, в котором каждая пара его вершин соединена путем, не учитывающим ориентацию дуг графа, вместо рассмотрения матрицы M^w необходимо использовать матрицу

$$Q = \|q_{ik}\| = (M \vee M^T)^w. \quad (3.7)$$

Другими словами, необходимо выбрать максимальное значение функций принадлежности ik -путей, учитывая противоположные направления.

Из рассмотренного следует, что степень принадлежности любого графа к множеству сильных U_3 , односторонних U_2 и слабых U_1 можно определить следующим образом [36]:

$$\mu_{U_3}(\tilde{G}) = \min_{i,k} \mu_{ik}, \quad \mu_{U_2}(\tilde{G}) = \min_{i,k} \max(\mu_{ik}, \mu_{ki}), \quad \mu_{U_1}(\tilde{G}) = \min_{i,k} q_{ik}. \quad (3.8)$$

По аналогии с графами и узлами определим качество КС. Примем $\mu_{ij} = \mu_{\text{доп}}$ в качестве допустимой границы качества канала. Тогда при $\mu_{ij} < \mu_{\text{доп}}$ КС считается отсутствующим или не обеспечивающим необходимую надежность; при $\mu_{\text{доп}} < \mu_{ik} < 1$ канал условно можно принять соответствующим ослабленной, но допустимой надежности связи; при $\mu_{ij} = 1$ имеем КС устойчивой связи.

Как известно, диаметр сети d характеризует максимальные из кратчайших путей. При отказе отдельных связей в структуре кратчайшие пути, получившие надежность $\mu_{ij} < \mu_{\text{доп}}$, вынуждены становиться длиннее (для той же ОА-пары в исходной структуре) для обеспечения необходимой надежности сети. При этом их длина может превышать значение диаметра исходной структуры. Например, в структуре на рис. 3.2 вместо ослабленной непосредственной связи $1 - 6$ выбирается путь $1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6$ требуемой надежности и длиной, превышающей диаметр исходной структуры: $l = 5 > d = 3$. Поэтому для оценки степени деформации исходной структуры необходимо вводить ограничение не только на надежность пути $\mu_{ij} \geq \mu_{\text{доп}}$, но и на его длину $l \leq d$. Для учета последнего используем ранее представленные выражения (3.3) и (3.5) при условии $w = d$.

На рис. 3.3 для различных кольцевых топологий определены типы их узлов и степени принадлежности соответствующих структур к множествам U_i . Диграфы (структуры с симметричными КС) представлены на рис. 3.3, $a - в$, орграфы (с асимметричными КС) – на рис. 3.3, $a^* - в^*$.

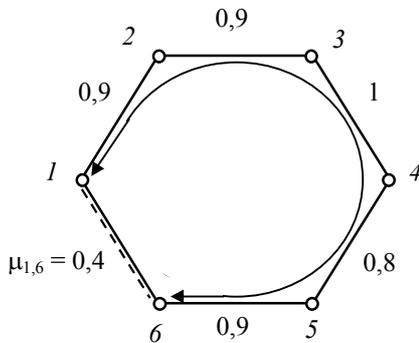


Рис. 3.2

Используя оценку надежности пути, применив (3.8), можно ввести показатель структурной устойчивости

$$\sigma_{U_i} \equiv \mu_{U_i}(w=d) \geq \mu_{Q_{\text{доп}}}, \quad (3.9)$$

где $\mu_{Q_{\text{доп}}}$ – допустимое (требуемое) значение структурной устойчивости, задаваемое разработчиками сети. Показатель σ_{U_i} позволяет определить характерные диапазоны изменения качества (градиенту состояний) структуры и некоторые их особенности.

1. $\sigma_{U_3} = 1$. Предельно возможный уровень функциональной устойчивости. Структура с качеством устойчивых связей ($\mu_{ij} = 1$) является исходной (соответствующей заданной).

2. $\mu_{Q_{\text{доп}}} \leq \sigma_{U_3} < 1$. Функционирование сети устойчивое. Однако имеют место следующие особенности:

а) в диапазоне $\sigma_{U_3} > \mu_{Q_{\text{доп}}}$ происходит ослабление связей при сохранении исходных структурных параметров (связность, диаметр);

б) равенство $\sigma_{U_3} = \mu_{Q_{\text{доп}}}$ означает, что исходные параметры сохранены при минимально возможном качестве.

Условие $\sigma_{U_i} \geq \mu_{Q_{\text{доп}}}$ должно предполагать режим прогнозирования.

3. $\sigma_{U_3} < \mu_{Q \text{ доп}}$. Состояние деформации. Деформация предполагает определение новой топологии при фиксированном числе узлов и КС и основана на увеличении длин возможных путей, построенных на каналах повышенной надежности. Это означает нахождение матрицы M^w , $d < w \leq n-1$, удовлетворяющей условию $\min M^w = 1$.

В процессе деформации существуют следующие варианты:

а) $w = d_1$, $d < d_1 < n-1$, $\sigma'_{U_3} = 1$. Под воздействием внешних факторов диаметр структуры с учетом устойчивых связей увеличивается до d_1 , но структура в целом снова обладает сильными связями, т.е. для любой пары вершин существует путь качеством не ниже единицы и длиной не более d_1 (ситуация 1);

б) $w = n-1$, $\sigma'_{U_3} = 1$. В такой структуре линии связи с качеством не ниже единицы образуют остоновый (минимально связный) граф с диаметром $d = n-1$;

в) $w = n-1$, $\sigma_{U_3} = \mu_{Q \text{ доп}}$. Остоновый граф с минимально допустимым качеством связей, т.е. (дальнейшее) продолжение ухудшения качества любой связи в структуре приведет к ее распаду на несвязные компоненты.

Дальнейшее ослабление структуры приводит сеть радиосвязи к однонаправленной передаче и поэтому далее не рассматривается. Наихудшую ситуацию, соответствующую разрушению сети, можно характеризовать следующим пунктом.

4. $\sigma_{U_1} \leq \mu_{Q \text{ доп}}$. В этом случае структура сети несвязна.

Указанные состояния динамической структуры (в порядке уменьшения качества структурных связей), соответствующие им интервалы изменения оценок, а также варианты решений по восстановлению структуры представлены в табл. 3.1. В графе решений указаны следующие варианты: Y – соответствие требованиям устойчивости; D – требуется замена W -вершины; P – переход к другой структуре сети. Очевидно, в условиях мобильности топология сети не должна допускать состояний 3б – 4.

Из оценки деформации, в том числе кольцевой структуры, сделаем обобщение для более сложных структур.

1. W -вершина – причина ослабления всей структуры, поэтому требуется ее замена, если ослабление вызвано присутствием помех, либо нужна корректировка маршрутов с исключением из маршрутных таблиц W -вершины в случае, например, большой очереди инфцугов в УН данного узла.

2. Признак «сильной» структуры – нейтральность ее вершин при устойчивом качестве связей ($\mu_{ij} = 1$). Наиболее удачное дублирование W -вершины основано на упомянутом признаке.

3. Показатель качества σ определяет нахождение структуры в одном из трех основных состояний: в исходном (заданном) с устойчивым функционированием – $\sigma_{U_3} \approx 1$; в состоянии, когда надежность находится в пределах заданного допуска – $\mu_{Q \text{ доп}} \leq \sigma_{U_i} < 1$; в состоянии перехода к новой топологии (деформации структуры) – $\sigma_{U_3} < \mu_{Q \text{ доп}}$.

4. Определение поведения сети предлагается оценивать граничным показателем надежности μ_{U_i} , который соответствует разным классам структур U_i . Таким образом, каждой топологии ставится в соответствие ее уровень (сильная, односторонняя или связная) с качеством $\mu_{U_i} = \alpha_i$. При этом определяют типы вершин, на основе которых осуществляется любая корректировка структуры.

Алгоритм оценки деформации и дублирования отказавших элементов состоит из этапа анализа и этапа восстановления устойчивости структуры. Первый этап включает:

- 1) ввод исходных данных: матрицы отношений абонентов в ПРС, допустимого качества КС $\mu_{\text{доп}}$ и уровня требований к качеству структуры $\mu_{\text{доп}}$;
- 2) проверку состояния ПРС путем вычисления σ_{U_3} ;
- 3) проверку симметрии каналов и определение типов вершин.

На втором этапе, при обнаружении W -вершины, вводятся дублирующие вершины, в противном случае – проверка структуры на соответствие требуемому уровню качества.

Таким образом, рассмотренный выше подход к организации топологии ИС позволяет определять слабые компоненты структуры, прогнозировать ее изменение и, в результате этого, восстанавливать свойства сети.

3.3. СИНТЕЗ СЛОЖНЫХ СТРУКТУР МОБИЛЬНЫХ ЦИФРОВЫХ РАДИОСЕТЕЙ

Устойчивое управление и высокая живучесть мобильной ЦРС достигается непрерывным контролем динамичности топологии сети. Например, в радиосети DARPA [58] топологическая информация периодически обновляется посредством инфцугов организации пакетной радиосети и хранится в виде трех таблиц: таблицы соседей, таблицы слоев, таблицы устройств. Такой подход позволяет обеспечить высокую гибкость при построении устойчивой и надежной сети пакетной радиосвязи. Однако при росте числа абонентов сети размер маршрутных таблиц возрастает в лучшем случае линейно [128].

Предлагаемый ниже метод организации сложной сети позволяет формировать сложные детерминированные структуры, идентичные логическим структурам функций принадлежности. Он основан на обобщении теории нечетких подмножеств, предложенном Гогеном [28]: будем рассматривать структуры сети как результат отображения L^E , где L – наделенное структурой решетки подмножество принадлежности к универсальному множеству E . Закон, описывающий отношение между элементами подмножества L , распространяется на множество L^E и определяет его свойства. Задавая различные структуры на L , можно получить структуры любой сложности с соответствующими характеристиками. Процедура построения структуры L^E , рассмотренная в [121, 123], заключается в вычислении для каждой пары результатов заданного отношения и в попарном сравнении элементов множества.

Распространение сведений о структуре любой ПРС осуществляется посредством передачи служебных пакетов. Служебные пакеты в такой сети должны отображать два подмножества L и E . Будем предполагать, что они состоят из двух независимых блоков. Элементы первого блока представляют множество $E = \{1, \dots, k\}$ мощностью $\text{card}(E) = k$. Последовательность элементов второго блока $L = \{0, \alpha, \beta, \dots, 1\}$ мощностью $\text{card}(L) = h$ характеризует множество принадлежности, ставящее в соответствие каждому элементу множества E степень принадлежности к некоторому нечеткому подмножеству множества E .

Наделим L структурой решетки, т.е. представим в виде упорядоченного множества, где для каждой пары $(i, j) \in L$ существует один элемент, называемый нижней границей, и один элемент, называемый верхней границей. В этом случае отображение E на L дает множество L^E мощностью $\text{card}(L^E) = h^k$, которое также имеет структуру решетки со свойствами, идентичными L , т.е. получается упорядоченное множество существенно больших размеров. Его элементами являются нечеткие подмножества A_i , состоящие из упорядоченных пар $(x/\mu_{A_i}(x))$, где $x \in E$, а $\mu_{A_i}(x) \in L$ есть функция принадлежности элемента x , значение которой соответствует степени принадлежности x нечеткому подмножеству A_i . Например, $A_2 = \{(a|0), (b|\alpha)\}$ означает, что a не принадлежит подмножеству A_2 , а степень принадлежности элемента b к подмножеству A_2 равна α . Отношения доминирования элементов в L определяются операциями Δ и ∇ , которые индуцируют на L^E операции \sqsubseteq и \sqsupseteq . Зададим множества E и L : $E = \{a, b\}$, $L = \{0, \alpha, \beta, 1\}$. При этом множество функций принадлежности L наделим структурой булевой решетки, которая представлена на рис. 3.4, а.

Результаты операций определения нижней и верхней границ (Δ, ∇) на множестве L представим в табличной форме:

	Δ	0	α	β	1
∇		0	α	β	1
	0	0	0	0	0
	α	α	α	0	α
	β	β	1	β	β
	1	1	1	1	1

(3.10)

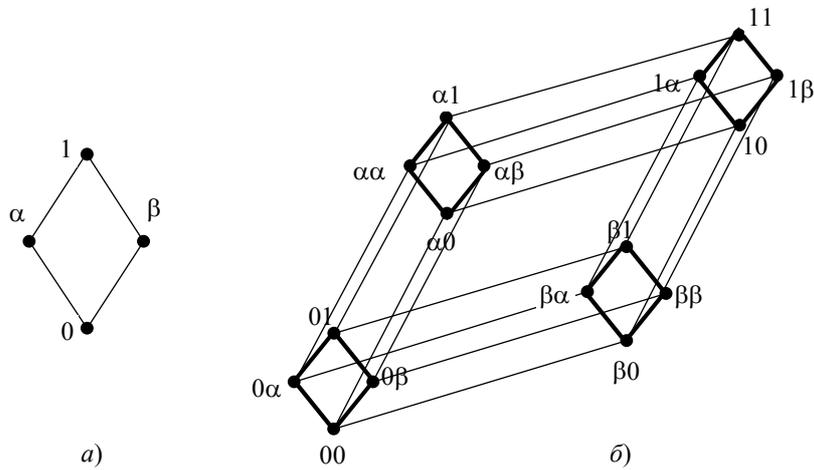


Рис. 3.4

Так как операции Δ и ∇ обладают свойствами коммутативности и идемпотентности, то в (3.10) обе операции представлены в одной матрице так, что значения над главной диагональю соответствуют результату выполнения Δ , а значения под главной диагональю – ∇ . Выполнение операции \sqsubseteq в \mathbf{L}^E , например с нечеткими подмножествами \mathbf{A}_1 и \mathbf{A}_2 , означает следующее:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_1 \sqsubseteq \mathbf{A}_2 &= \{(a | \mu_{\mathbf{A}_1}(a) \Delta \mu_{\mathbf{A}_2}(a)), (b | \mu_{\mathbf{A}_1}(b) \Delta \mu_{\mathbf{A}_2}(b))\} = \\ &= \{(a | 0 \Delta 0), (b | 0 \Delta \alpha)\} = \{(a | 0), (b | 0)\} = \mathbf{A}_1. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Выполним подобные операции со всеми возможными парами следующих нечетких подмножеств:

$$\begin{aligned} \mathbf{L}^E &= \{\mathbf{A}_1 = (0,0), \mathbf{A}_2 = (0,\alpha), \mathbf{A}_3 = (0,\beta), \mathbf{A}_4 = (0,1); \\ &\mathbf{A}_5 = (\alpha,0), \mathbf{A}_6 = (\alpha,\alpha), \mathbf{A}_7 = (\alpha,\beta), \mathbf{A}_8 = (\alpha,1); \\ &\mathbf{A}_9 = (\beta,0), \mathbf{A}_{10} = (\beta,\alpha), \mathbf{A}_{11} = (\beta,\beta), \mathbf{A}_{12} = (\beta,1); \\ &\mathbf{A}_{13} = (1,0), \mathbf{A}_{14} = (1,\alpha), \mathbf{A}_{15} = (1,\beta), \mathbf{A}_{16} = (1,1)\}, \end{aligned} \quad (3.12)$$

структура множества \mathbf{L}^E мощностью $\text{card}(\mathbf{L})^{\text{card}(E)} = h^k$ будет иметь вид, представленный на рис. 3.4, б. Как и \mathbf{L} , она является булевой решеткой, причем ее структурные параметры прогнозируемы на \mathbf{L} : связность, диаметр, число независимых путей структуры \mathbf{L}^E пропорциональны параметрам структуры \mathbf{L} с коэффициентом $k = \text{card } E$.

Таким образом, достаточная топологическая информация об упорядоченной структуре произвольной сложности содержится в ее элементарной структуре \mathbf{L} и мощности универсального множества E . Распространение указанных параметров [операции $\Delta(\nabla)$ на \mathbf{L} и $\text{card } E$] по сети позволяет формировать упорядоченные структуры различной конфигурации и сложности. Пример расчета логической структуры сложной сети приведен в прил. 4.

Процедуру построения радиосети со сложной структурой, определяемой $\mathbf{L}^E = \mathbf{L}^2 = \mathbf{L} \times \mathbf{L}$ (при $k = \text{card } E = 2$), можно свести к двум этапам:

1. Формирование h экземпляров структуры \mathbf{L} . Каждому элементу структуры \mathbf{L}^E присваивается двухразрядный идентификационный номер \mathbf{A}_i (по сути нечеткое подмножество) в соответствии с выра-

жением (3.12), в котором старший разряд означает номер экземпляра (элементарной структуры), младший разряд – номер элемента в экземпляре.

2. Соединение элементов с одинаковыми номерами младших разрядов всех экземпляров структуры \mathbf{L} в соответствии с отношением инцидентности самой структуры \mathbf{L} . Например: если структура \mathbf{L} – кольцо (звезда), то множество вершин (x, α) , где $x \in \{0, \alpha, \beta, 1\}$, также образует кольцо (звезду).

Перенесение свойств элементарной структуры на сложные справедливо не только для отношения порядка, но и для отношения инцидентности. Поэтому рассмотренный выше подход позволяет формировать структуры более широкого класса сложности. Изменение уровня декомпозиции повышает гибкость сложной структуры, что дает возможность реагировать на колебания внешней нагрузки.

Подход к построению ЦРС сложной конфигурации можно совершенствовать, введя в структуру неоднородности. Отношения между узлами также могут быть упрощены на основе ТНМ. Предположим, что $\mu_A(x_i)$ принимает свои значения в \mathbf{L}_i , $i=1, 2, \dots, k$. Тогда, согласно рассмотренной выше процедуре, можно получать структуры, представляющие собой множество нечетких подмножеств [28]:

$$\mathbf{L}_1^{\{x_1\}} \times \mathbf{L}_2^{\{x_2\}} \times \dots \times \mathbf{L}_k^{\{x_k\}}, \quad (3.16)$$

где $\{x_i\}$, $i=1, 2, \dots, k$ – обычные одноточечные подмножества \mathbf{E} .

Элементы множества (3.16) являются неоднородными нечеткими подмножествами и на примере двух таких подмножеств могут быть представлены в виде:

$$\tilde{\mathbf{A}} = \begin{array}{c|c|c|c} & K_1 & K_2 & K_3 & \dots \\ \hline \alpha & & 0, & B & \dots \\ & & 1 & & \\ \hline \in & \in & \in & \dots & \\ \mathbf{L}_1 & \mathbf{L}_2 & \mathbf{L}_3 & & \end{array} ; \quad (3.17)$$

$$\tilde{\mathbf{B}} = \begin{array}{c|c|c|c} & K_1 & K_2 & K_3 & \dots \\ \hline \beta & & 0, & C & \dots \\ & & 71 & & \\ \hline \in & \in & \in & \dots & \\ \mathbf{L}_1 & \mathbf{L}_2 & \mathbf{L}_3 & & \end{array} .$$

Нечеткие (мягкие) подмножества в виде (3.17) показывают степень их принадлежности (средняя строка) к структурам различных множеств функций принадлежности (нижняя строка) по критериям, указанным в верхней строке. Как видно, к двум и более нечетким подмножествам одинаковой размерности можно применить различные операции сравнения по выбранным критериям. Если использовать понятие относительного обобщенного расстояния Хемминга [28], то появляется возможность решения, например, задачи приоритетной передачи инфцугов на сетевом уровне. При этом в качестве общего алгоритма целесообразно использовать алгоритм, представленный в работе [28].

3.4. ТОРОИДАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ РАДИОСЕТЕЙ

В мобильных ЦРС со случайной структурой при повышении информационной активности абонентов число повторных передач и, следовательно, уровень внутрисетевого трафика на бит полезной информации растет. Детерминированные структуры могут устранить указанный недостаток, однако, высокая чувствительность типовых топологий к условиям мобильности усложняет их использование при построении мобильных ЦРС.

Структура динамичной сети должна предусматривать:

- а) дублирование элементов без ухудшения структурных и сетевых характеристик (возможность рассмотрена в п. 3.1);
- б) несколько альтернативных маршрутов равной длины для каждой ОА-пары;
- в) гибкость и управляемость сетевой конфигурации, допускающей согласование с интенсивностью нагрузки для обеспечения требуемого качества обслуживания.

В разд. 1 показано (на основе результатов, полученных Л. Клейнроком [1]), что для достижения информационной эффективности сети необходимо руководствоваться компромиссом между снижением \bar{L} при возрастающей нагрузке и сохранением концентрации потоков на заданном высоком уровне. Приемлемое решение обеспечивается снижением \bar{L} при сохранении числа КС N и K -связности сети с помощью изменения по определенному правилу отношения инцидентности. Это реализуется в сети с тороидальной структурой.

В работе [129] рассмотрены регулярные решетки, уложенные на торе, и показано, что квадратная решетка (аналог тороидальной сети «Манхэттэн» (MSN), широко применяемой в высокоскоростных вычислительных сетях [130]), обладает уникальным свойством: большая часть кратчайших маршрутов (75 %) имеет равную или примерно равную длину. При увеличении рабочей нагрузки растет число отклонений от маршрута, в результате чего инфцуг затрачивает больше времени на прохождение по сети. Этим объясняется характерное для большинства топологий снижение пропускной способности при среднем и высоком уровнях трафика. В сети MSN такого снижения производительности не происходит, так как отклоняющиеся инфцуги проходят по путям, длина которых равна длине основных путей. Этот факт подтверждается в работе [130]. Поэтому сеть MSN имеет стабильно высокую пропускную способность в широком диапазоне входных нагрузок.

Профессором Т. Гораздовским замечено, что в торе замкнутый путь имеет длину 4π . Применительно к ЦРС это означает, что прохождение инфцугов в сети с тороидальной структурой может быть организовано по непересекающимся путям. Сокращение пересеченности путей между каждой ОА-парой существенно повышает производительность сети. Последняя особенность (пересеченность) характеризует кривизну путевого пространства, которая будет описана в разд. 7.

Пример построения ЦРС с тороидальной структурой представлен на рис. 3.5.

Она состоит из m экземпляров элементарных структур $L_3 \equiv L_1$ ($\text{card } L_1 = n$), в которых вершины с одинаковым номером соединены между собой в соответствии со структурой L_2 ($\text{card } L_2 = m$). Такая структура может быть построена с использованием ранее рассмотренного алгоритма формирования сложных структур для двумерного

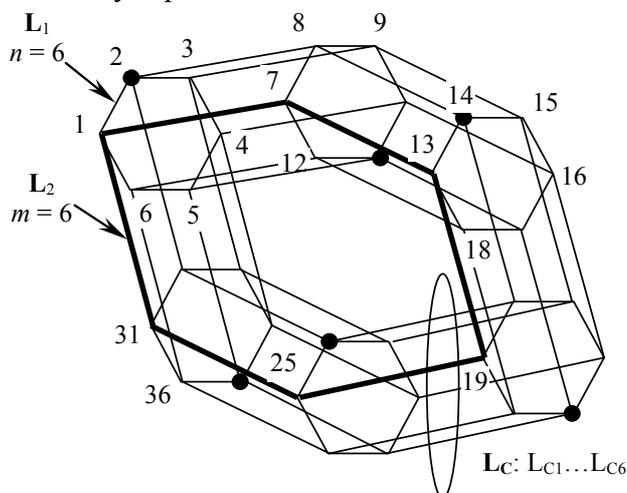


Рис. 3.5

случая ($k = 2$), если в качестве L_1 и L_2 выбрать кольца с произвольным числом вершин и сформировать $L = L_1 \times L_2$. В результате полученная структура представляет собой тор из m колец, содержащих по n вершин, соединенных между собой циклами межсоединения (ЦМС). Множество, непересекающихся в узлах циклов, длина и число которых зависят от выбранного шага ЦМС, представляет сеть межсоединений L_C , которая покрывает совокупность узлов структуры L . Изменяя шаг цикла, можно получить последовательность однородных сетей, у которых при постоянном числе КС средняя длина пути \bar{L} и диаметр сети D существенно изменяются. Таким образом, имеется возможность формирования ЦРС с гибкой топологией. Краткое описание и результаты исследований тороидальной структуры приведены в прил. 5. Важно отметить, что на основе тороидальной структуры имеется возможность в широких пределах корректировать структурные характеристики сети и, следовательно, существенно изменять топологию сети с учетом сетевой нагрузки.

Выбор топологии из множества устойчивых управляемых Ω можно осуществлять на основе нечеткого логического управления [132]. Принцип оптимальности определяется функцией выбора f_v , которая ставит в соответствие любой топологии $\Omega_i \subset \Omega$ (или действию, направленному на ее преобразование) оценку из множества параметров в критериальном пространстве E_m : $\varphi(\mathbf{X}) = \langle \varphi_1(x), \dots, \varphi_m(x) \rangle \in E_m$. Нечеткое логическое управление позволяет на основе принятых функций принадлежности лингвистических переменных и максиминных операций адаптивно управлять топологией.

Однако при этом принципиально существует проблема выбора функций принадлежности, их вида. Эта задача неразрывно связана с задачей распределения сетевого трафика и в совокупности должна представлять единую сетевую задачу анализа и расчета сетей связи. Решение такой задачи, где структура сети определяет систему координат для информационных потоков, представлено в последующих разделах, основанных на тензорной методологии и непосредственно на тензорном исчислении.

4. ТЕНЗОРНАЯ МЕТОДОЛОГИЯ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА НАГРУЖЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СЕТЕЙ, НАХОДЯЩИХСЯ В СТАЦИОНАРНОМ СОСТОЯНИИ

Тензорная методология расчета ИС [133, 134] позволяет рассматривать процессы передачи информации неотъемлемо от пространств-структур, в которых они происходят. При этом структура сети определяет систему координат, а ее изменения соответствуют преобразованиям системы координат. В качестве инварианта преобразований служит полная кибернетическая мощность сети. В разделе приведена формула поведения сети для ее стационарного состояния, показаны формулы преобразования основных ее параметров. Разработана ортогональная подразделенная модель ИС, позволяющая рассчитывать сеть с учетом задания в качестве исходных данных как входных потоков, так и накоплений инфцугов в УН. Приведена тензорная методология синтеза [135], где в качестве инварианта могут быть использованы критерии поведения ИС.

4.1. ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕНЗОРНОЙ МЕТОДОЛОГИИ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СЕТЯХ И ЕЕ ОСОБЕННОСТИ

Представим ИС в виде совокупности КС и УК. Пусть КС характеризуются пропускными способностями, а УК – состояниями УН. Будем считать, что сеть находится в сопредельном состоянии. В этом случае решение задачи эффективного распределения потоков информации в смысле минимизации времени ее доведения или потерь с ограничением по временной задержке, наряду с алгоритмом маршрути-

зации, существенно зависит от топологии сети. При этом потоки в сетях и структурное построение самих сетей являются взаимоопределяющими.

Из известных аналитических методов решения задачи распределения трафика в сети в настоящее время можно выделить два основных подхода. Первый состоит в использовании потоковой модели, где объектом исследования является непрерывное пространство состояний, а методы решения определяют маршруты передачи информации с минимальной первопроизводной длиной путей потоков, например, метод девиации потока или проекционные методы (метод наискорейшего спуска, метод Ньютона) [6]. Важной их особенностью является вид используемой стоимостной функции. Она выбирается исходя из предположения описания очередей в УН моделью СМО – М/М/1. Так как основой применения теории СМО в моделях информационных сетей являются сети Джексона с Клейнроковской аппроксимацией независимости [1, 2] (эти модели предполагают разрушение структуры сети), то данный подход не может использовать информацию о структуре сети, а значит, не может в полной мере решить задачу эффективной передачи информации. Основным понятием при таком решении сетевой задачи является матрица.

Второй подход основан на использовании теории графов и, в частности, алгоритмов определения кратчайших путей на графе, например, Беллмана–Форда, Дейкстра или Флойда–Уоршела [6]. Он не учитывает процессы, протекающие в структуре, их закономерные соотношения. Очевидно, при таком подходе к решению сетевой задачи основным используемым математическим понятием является граф.

Существует методология анализа, которая успешно совмещает понятия графа и матрицы (конечно, использование этих понятий – не самоцель). Она основана на тензорном анализе электрических цепей Г. Крона [43, 44, 46]. Тензорная методология при расчете сети предполагает совмещенность процессов и структур, в которых эти процессы протекают. Некоторые аспекты применения ее в информационных сетях с позиции задач сетевого уровня изложены в работе [56]. Автор представил важные преимущества метода – матричную запись усредненных величин в СМО и их преобразование при переходе к другой топологии, применил метод к вопросам надежности. Однако в указанной работе не определен инвариант – важнейшая обобщенная характеристика – и не указано на его наличие в информационных сетях (в тензорном исчислении наличие инварианта является принципиальным). Автор [56] не развил тензорный подход применительно к анализу сети и значительную часть работы посвятил исследованию информационных сетей на основе теории СМО. В связи с этим, не умаляя сделанное в [56], в данной работе идейным основанием применения тензорной методологии будет служить тензорный анализ электрических сетей Г.Крона и его расширение к теории систем [45]. Работа [55] в значительной степени относится к построению тензорных баз данных и не исследует проблемы передачи информации в ИС.

Необходимость применения тензорной методологии в теории информационных сетей по аналогии с электрическими сетями обусловлена следующим важным и определяющим обстоятельством. Г. Крон в электрических сетях использовал для построения теории только измеряемые, физически существующие величины – напряжение и ток. Аналогичные величины существуют и в ИС. Кроме того, тензорная методология тем и замечательна, что она просто представляет сложные структуры и обладает рядом инвариантов, опора на которые позволяет несложно получать формулы вычисления параметров элементов, входящих в матрицу тензора. При этом цепь наглядно объединяет в своих понятиях структуру и протекающие в ней процессы.

Основаниями возможности применения тензорного анализа является выполнение условий непрерывности и однородности. В ИС, находящихся в нагруженном состоянии, в отличие от однородного непрерывного (континуального) пространства-геометрии, для тензоров используется пространство-структура самой сети, которое непрерывно вдоль линий. Необходимое условие тензорного анализа – однородность во всей области анализируемого объекта, т.е. всех элементов сети – обеспечивается однотипностью элементов, в которых происходят одинаковые процессы. При этом формула поведения как элементов в отдельности, так и сети в целом имеет один и тот же вид. Преобразование такого пространства, по сути, означает изменение соединений между элементами, что может быть обобщено в нашем случае к топологическим преобразованиям ИС. По-другому, если потоки, проходящие по ветвям независимых замкнутых и разомкнутых путей, использовать как системы координат, то изменение структуры или выбор путей будут рассматриваться как преобразование системы координат. В этом случае, если представить набор ветвей как некоторую обобщенную сеть, то любое их соединение в структуру будет проекцией обобщенной сети в частной системе координат (это одна из важнейших особенностей тензорной методологии сетей).

Следующим условием применения тензорного анализа для ИС является наличие инварианта, относительно которого с использованием формул поведения сети и преобразования параметров можно находить значения параметров в сетях с другой конфигурацией. Этим инвариантом является квадратичная форма – кибернетическая мощность ИС, описанная в разд. 2 [55, 91, 111, 112].

Важной особенностью при анализе ИС является использование аналогии с электрическими сетями Г. Крона в части введения понятия примитивной сети, которая соответствует структуре «эталонной» системы координат. Такое введение позволяет описать другие системы в терминах этого эталона. Кроме того, открывается возможность аналитически определять степень близости к идеальности информационных систем в смысле передачи информации, т.е. использование показателя эффективности – кпд ИС – в смысле передачи информации.

Применение тензорной методологии в теории ИС требует более досконального внимания на теоретическое обоснование использования метода аналогии структур сетей и континуума множества евклидова пространства. Поэтому методология применительно к ИС будет несколько модифицирована в части теоретической корректности ее применения, в разделах геометризации информационных процессов и тензорного анализа ИС. Все компоненты тензора будут представлены не усредненными и не зависимыми от значений потоков в интервале рассмотрения, а дифференциалами, т.е. главными частями изменения параметров, что позволяет хорошо (в первом приближении) аппроксимировать изменения параметров элементов сети и самой ИС в целом. (При этом основной, или первичной, величиной будет служить количественная мера информации (в числе инфцугов), а потоки и накопления инфцугов – производными, или вторичными, величинами.)

Таким образом, на основе тензорной методологии, изложенной в данном разделе, можно определять точку состояния ИС, а использование тензорного анализа в классическом его представлении [47 – 54] (который начинается, по сути, с применения понятия ковариантной производной) позволит исследовать окрестность этой точки (разд. 7). Управление движением точки в «пошаговом» режиме в условно бесконечно малом интервале позволит сконцентрировать внимание на одной важнейшей проблеме ИС – переходных процессах.

4.2. ФОРМУЛА ПОВЕДЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СЕТИ

Известная формула Литтла [2, 4, 6] показывает физическую связь основных усредненных параметров для любой i -й одноканальной системы: времени нахождения инфцугов в системе T_i , входного потока Λ_i , в общем случае обусловленного суммой входных, транзитного и внешнего потоков, и объема накопления инфцугов V_i в УН. В общем виде известное соотношение можно записать

$$V_i = T_i \Lambda_i. \quad (4.1)$$

В случае, если не предполагать разделения входного потока и инфцугов на транзитные и внешние, для ОС разомкнутого типа можно использовать соответственно обозначения: γ_i и N_i (рис. 4.1, а).

Заметим (показано в разд. 2), линейная форма (4.1) аналогична выражению закона Ома электрической цепи.

Важной особенностью формулы Литтла является ее идентичное применение не только к элементам сети, но и к сети в целом.

Поведение модели сети разомкнутого типа (рис. 4.1, б) можно описать усредненными по сети параметрами:

$$V = T \Lambda. \quad (4.2)$$

Такую же линейную форму можно использовать и для сети замкнутого типа, упрощенная модель которой (рис. 4.1, в) соответствует эквивалентным схемам Нортона [4], которые используются для исследования управления трафиком оконными методами. В этом случае

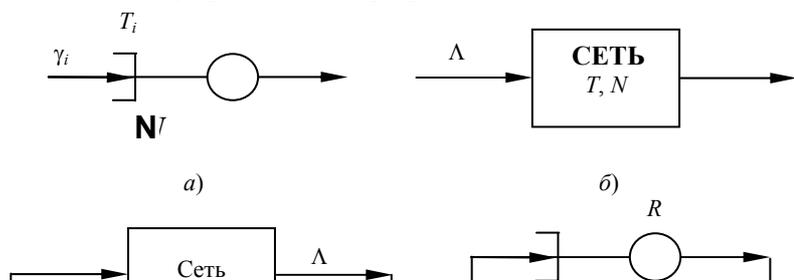


Рис. 4.1

задается результирующая пропускная способность каналов R и число инфцугов V , циркулирующих в системе. Производительность Λ такой системы можно определить обобщенным выражением

$$\Lambda = RV . \quad (4.3)$$

Обратно: любой канал с памятью, занятый непрерывной передачей со скоростью R_i , с постоянным числом n_i инфцугов в нем на интервале рассмотрения можно представить ОС замкнутого типа (рис. 4.1, з) с циркулирующим значением n_i . При этом ее производительность определяется выражением

$$\lambda_i = R_i n_i . \quad (4.4)$$

Так как время нахождения инфцугов в системе есть величина, обратная скорости их передачи в ней, то в зависимости от исходных данных можно осуществлять выбор типа системы, т.е. использовать в качестве уравнения поведения (4.1) или (4.4) для одноканальных систем и (4.2) или (4.3) в обобщенном виде для сети в целом. В любом случае линейная форма остается инвариантной, а соответствующие величины в ней – идентичные параметры.

Используя свойство сохранения закона поведения для элементов сети и сети в целом, причем независимо от их типа, приведем матричную форму записи формулы поведения сети (4.2)

$$\mathbf{V} = \mathbf{T}\Lambda , \quad (4.5)$$

где каждая матрица представляет совокупность значений идентичных параметров одноканальных систем.

Особенностью записи в матричной форме является то, что в матрице упорядоченные значения параметров ОС могут отображать их взаимное влияние. Например, матрица временных задержек \mathbf{T} для сети из n ОС представляется следующим образом:

$$\mathbf{T} = \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} & 1 & 2 & \dots & n \\ \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ \dots \\ n \end{array} & \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline T_{11} & T_{12} & \dots & T_{1n} \\ \hline T_{21} & T_{22} & \dots & T_{2n} \\ \hline \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hline T_{n1} & T_{n2} & \dots & T_{nn} \\ \hline \end{array} \end{array} \end{array} \quad (4.6)$$

Очевидно, если для n ОС интенсивности входного трафика представить в виде вектора с n компонентами, то по правилу перемножения матриц, согласно формуле (4.5), получим вектор накоплений инфцугов в УН, где каждый его компонент соответствует состоянию УН. Заметим, что наличие взаим-

ных временных задержек, характеризующих информационное влияние друг на друга в виде, например, дополнительных передач или удлинения инфцугов за счет расширяющих последовательностей, позволяет учесть дополнительные накопления в УН. (Это замечание относится в большей степени к проблемам множественного доступа, электромагнитной совместимости и помехоустойчивости в ЦРС).

Как видно из (4.6), все строки и столбцы матрицы задержек помечаются, т.е. они соответствуют конкретным ОС. Введение дополнительного числа ОС в сеть, очевидно, увеличит размерность матрицы, но не нарушит закрепления индексов за строками и столбцами. Дополнительные системы образуют свои строки и столбцы. Таким образом, каждую матрицу необходимо рассматривать не просто в виде упорядоченной совокупности значений параметров, а совместно с пришпиленными к ней координатами. Это означает, что с каждой такой матрицей отождествляется условная система координат. Учитывая аналогию, проведенную между сопротивлением в электрических цепях и сопротивлением в терминах времени в кибернетических системах (разд. 2), где последние соответствуют временным задержкам, двумерной матрице \mathbf{T} будут приписаны индексы, подчеркивающие также ковариантный характер параметра. В этом случае можно использовать скользящие индексы, принимающие значения от 1 до n :

$$\mathbf{T}_{\alpha\beta} = \begin{array}{c} \beta \rightarrow \\ \alpha \downarrow \\ \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline T_{11} & T_{12} & \dots & T_{1n} \\ \hline T_{21} & T_{22} & \dots & T_{2n} \\ \hline \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hline T_{n1} & T_{n2} & \dots & T_{nm} \\ \hline \end{array} \end{array} \quad (4.7)$$

Согласно правилу перемножения матриц [136], выражение (4.5) теперь можно записать в координатной форме:

$$V_{\alpha} = \sum_{\beta=1}^m T_{\alpha\beta} \Lambda^{\beta} = T_{\alpha\beta} \Lambda^{\beta}. \quad (4.8)$$

В дальнейшем, как показано в выражении (4.8), если один и тот же индекс встречается один раз наверху и один раз внизу, знак суммы по правилу Эйнштейна будет опускаться. Такое использование одного индекса будет означать, что по нему происходит суммирование.

Вектор (1-матрица) потоков, по аналогии с током в электрических цепях, имеет контравариантные компоненты. Как видно, закон, определяющий соотношения между основными измеряемыми величинами в сетях, не будет меняться независимо от количества абонентов и их связи. При этом он одинаков как для элементов сети (4.1), так и для сети в целом (4.8), где величины представляются уже матрицами. В связи с этим, учитывая аналогию указанных выражений с законом Ома как для элементов цепи, так и для цепи в целом, выражение (4.8) будем считать формулой поведения информационной сети стационарного состояния. Она инвариантна относительно связности сети. Действительно, изменение связности сети даже с вариантностью числа абонентов в ней можно рассматривать как отображение этой сети в различных, частных системах координат. Формула при этом останется прежней, а компоненты матриц будут меняться. Так как количество физических понятий и взаимосвязь между ними не меняются, то оказывается возможным сохранение неизменным количества математических символов и взаимные отношения между ними. Это подтверждает правомерность использования формулы Литтла в матричном и, одновременно с этим, координатном представлении в качестве формулы поведения ИС.

В формуле поведения каждый символ (коренная буква) обладает математической сущностью, которая называется «геометрическим объектом». Если система координат меняется, то изменяются компоненты геометрического объекта, но сам геометрический объект остается неизменным. Переход от одной системы координат к другой осуществляется с помощью 2-матрицы преобразования C_{α}^{α} , элементы которой представляют обычные коэффициенты²¹ (формирование C_{α}^{α} будет раскрыто в п. 4.4). Таким об-

²¹ Для сети в стационарном, сопредельном состоянии на интервале рассмотрения, когда задержки инфцугов можно считать не зависимыми от изменения трафика. Такое состояние определяет точку в пространстве возможных состояний сети. Динамика и изменение со-

разом, каждый геометрический объект предполагает использование понятий: n -матрица, группа матриц преобразования, полная совокупность которых образует тензор преобразования, и формула преобразования (основу которой составляют C_{α}^{α}). Для ИС это означает, что основополагающие величины: накопления инфцугов в УН, путевые потоки и временные задержки – являются геометрическими объектами, компоненты которых есть реально измеряемые информационные параметры.

Итак, уравнение поведения в форме (4.8) представляет взаимосвязь величин – геометрических объектов, преобразующихся по линейному закону. Ввиду этого они являются тензорами, а само уравнение соответствует записи в тензорной форме, т.е. является тензорным.

4.3. ИНВАРИАНТНОСТЬ ПОЛНОЙ КИБЕРНЕТИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ ИНФОРМАЦИОННОЙ СЕТИ

Основанием применения тензорной методологии для решения инженерных задач является инвариантность ряда характеристик геометрического или физического объекта, отображенных тензором. В электрических цепях одной из таких характеристик является входная (полная) мощность. На первый взгляд, отсутствие сохранения мощности при различных соединениях ветвей говорит о том, что при одних и тех же входных воздействиях величины потоков энергии в структуре меняются во времени, т.е. мощность сетей с одинаковым числом элементов, но с различной связностью будет разной. С другой стороны, изменение мощности сети при последовательном изменении ее структуры приводит к изменению мощности двойственной сети. В работе [45] (результат был получен путем моделирования) показано, что суммарная мощность сетей заданных конфигураций и двойственных им является постоянной.

По аналогии, для ИС полная (входная) кибернетическая мощность примитивной сети определяется как

$${}^n P_{ИС} = \sum_{i=1}^n V_i \gamma^i = V_i^{БЫХ} \gamma^i, \quad (4.9)$$

где $i=1, \dots, n$ – номера ОС с общим их числом n ; V_i и γ^i – состояние i -й ОС, определяемое транзитными и внешними (вошедшими из вне) инфцугами, и ее производительность, соответственно.

Итак, полная мощность ИС определяется суммой мощностей не связанных между собой ОС с очередями. Она является инвариантной при фиксированном, заданном числе ОС. Для ИС это утверждение имеет простое объяснение. Если число ОС зафиксировать значением n , а их физические возможности передачи – значениями пропускной способности, то независимо от топологии (различной коммутации ОС) предельные возможности системы, выраженные (4.9), при фиксированном ограничении на временную задержку не изменятся, что очевидно. Поэтому эта кибернетическая мощность называется входной, или полной. Очевидно, соединение ОС в коммуникационную сеть уменьшает кибернетическую мощность, но под ней необходимо понимать полезную составляющую полной мощности. Синтез такой сети на основе тензорной методологии должен «обеспечить» максимальную полезную (активную) мощность сети при заданной ее структуре, которая, в свою очередь, должна отвечать требованиям надежности, компактности по структуре и эффективности по эксплуатации.

Таким образом, максимальная кибернетическая мощность может быть только в примитивной контурной сети (рис. 4.2, а) или в примитивной сети разомкнутых цепей (рис. 4.2, б). Она определяется суммой произведений максимально возможного накопления требований в каждом буфере на скорость передачи соответствующего обслуживающего прибора при ограниченном значении времени нахождения инфцуга в системе T .

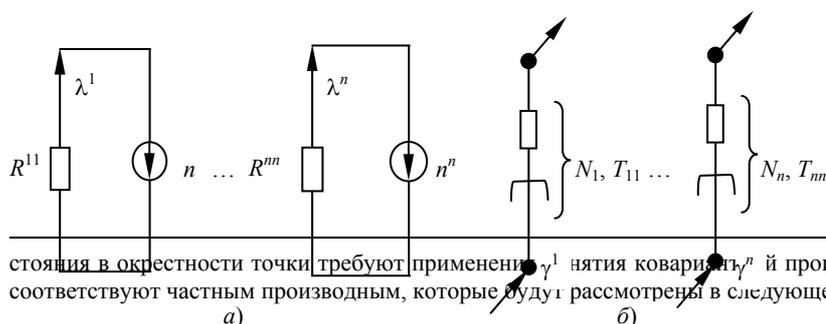


Рис. 4.2

Из вышеприведенных рассуждений видно, что кибернетическая мощность ОС с очередью как комплексная величина включает «детальные» величины, а именно: состояния УН и производительность обслуживающего устройства. Это означает, что при расчете сетей возможно более полно раскрыть возможности ОС или сети в целом путем отдельного представления как УН, так и КС.

4.4. ВЫВОД УРАВНЕНИЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СЕТИ В СООТВЕТСТВИИ С ТЕНЗОРНОЙ МЕТОДОЛОГИЕЙ

Уравнения связной ИС с фиксированным числом абонентов можно получить, согласуя этапы его вывода с тензорной методологией [43 – 45].

1. На первом этапе необходимо выделить из множества сетей некоторую эталонную сеть, в которой анализ является сравнительно простым. В качестве таковой удобно использовать сеть примитивного типа (разомкнутую, замкнутую, ортогональную [43] или подразделенную [44, 46]). Уравнение состояния, например, примитивной сети разомкнутого типа отождествляется с формулой ее поведения и имеет вид

$$N_{\alpha} = T_{\alpha\beta} \gamma^{\beta}, \quad (4.10)$$

где матрица временных задержек имеет квадратичную форму.

Скользящие индексы принимают значения номеров ОС, т.е. от 1 до n , где n – число ОС в ИС.

2. Следующим шагом является определение отличия топологии всех возможных связных ИС с заданным количеством ОС от принятой примитивной (или от другой «эталонной») сети. Эти отличия, заключающиеся в соединениях ОС, устанавливаются матрицей преобразования $C_{\cdot\alpha'}^{\alpha}$, компоненты которой полностью определяют способ соединения, выбор переменных, которыми каждая частная сеть отличается от примитивной сети. Индекс со штрихом соответствует соединенной сети, к которой осуществляется переход от исходной, примитивной сети. Для определения матрицы преобразования воспользуемся контурным методом расчета [43] (в этом случае будем использовать ОС замкнутого типа). В соединенной сети выберем совокупность линейно независимых путевых потоков, проходящих по разомкнутым и замкнутым путям. Суммарное их число, согласно комбинаторной топологии, равно числу ОС в примитивной сети. Если записать потоки для каждой ОС через выбранные контурные потоки, приравняв их величины, то получится следующее выражение в тензорной форме:

$$\lambda^{\alpha} = C_{\cdot\alpha'}^{\alpha} \lambda^{\alpha'}, \quad (4.11)$$

где слева – потоки ОС примитивной сети (условно старой), справа – контурные потоки, проходящие через ОС в соединенной сети (условно новой).

Соотношение (4.11) записано в матричной форме. Одинаковые индексы со штрихом один раз наверху и один раз внизу означают, что для каждой ОС происходит суммирование проходящих через нее путевых потоков. Прохождение потока через ОС будет соответствовать коэффициенту, равному единице. (В общем случае коэффициенты могут быть и не равны единице). Таким образом, коэффициенты при новых потоках $\lambda^{\alpha'}$ образуют искомую матрицу преобразования $C_{\cdot\alpha'}^{\alpha}$.

3. После определения матрицы преобразования (или их множества, соответствующего возможному числу топологий для ИС с заданным количеством ОС), далее находятся параметры сети, соответствующие новой конфигурации. В этом основополагающую роль играет инвариант сети – полная кибернети-

ческая мощность информационной сети с заданным числом одноканальных систем ${}^{\alpha}P^{22}$. Согласно (4.9), исходя из инвариантности полной кибернетической мощности, в нашем случае имеет место тождество

$$V_{\alpha}\lambda^{\alpha} \equiv V_{\alpha'}\lambda^{\alpha'}. \quad (4.12)$$

После подстановки (4.11) в (4.12) правило преобразования компонент, соответствующих накоплениям передающихся инфцугов, будет иметь вид

$$V_{\alpha'} = C_{\alpha'}^{\alpha} V_{\alpha}. \quad (4.13)$$

Инвариантность формулы поведения позволяет получить уравнение преобразования компонент временных задержек

$$T_{\alpha'\beta'} = C_{\alpha'}^{\alpha} T_{\alpha\beta} C_{\beta}^{\beta'}. \quad (4.14)$$

Так как выражения для величин соединенной ИС получены, можно записать уравнение ее поведения уже в терминах контурных потоков и числа инфцугов, хранящихся в сети и требующих передачи по ним:

$$V_{\alpha'} = T_{\alpha'\beta'} \lambda^{\beta'}. \quad (4.15)$$

В связи с тем, что потоки в контурах соединенной сети определены с использованием матрицы преобразования, выражение для накоплений инфцугов в каждой ОС будет иметь вид

$$V_{\gamma} = T_{\gamma\alpha} C_{\alpha}^{\alpha'} \lambda^{\alpha'}. \quad (4.16)$$

В общем, при расчете ИС необходимо учитывать следующее. Анализ любой сети как сложной системы состоит из описания установившегося состояния с выполнением условия непрерывности и переходных процессов. Последнее является одной из основных трудностей синтеза сети. В связи с этим, во-первых, целесообразно рассматривать ортогональную модель сети, так как задаются одновременно различные исходные данные – накопления в УН и значения входных (внешних) потоков; во-вторых, необходимо ввести разделение ОС на составляющие кибернетические элементы (КЭ). Это приведет к представлению примитивной сети в виде подразделенной ортогональной модели. Модель соединенной ИС будет отличаться от обычного представления совокупности соединенных ОС. При таком подходе в дальнейшем для расчета информационных сетей может быть использован симплексный метод Данцига [44].

Таким образом, использование тензорной методологии электрических цепей в теории информационных сетей, на основе формулы поведения сети в тензорном виде (4.8), инварианта – введенного в сеть параметра – полной кибернетической мощности (4.9) и формул преобразования (4.11), (4.13), (4.14), (4.16), позволяет определять компоненты основных параметров как сети в целом, так и ее одноканальных систем в отдельности, не зависимо от топологии. Особую роль при этом играет тензор преобразования $C_{\alpha'}^{\alpha}$. Отличительной особенностью от традиционных методов расчета ИС является одновременный учет и структуры сети (в неявной форме с использованием матриц преобразования), и процессов, происходящих в ней, т.е. передачи и распределения информационных потоков.

4.5. АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННОЙ СЕТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОРТОГОНАЛЬНОЙ ПОДРАЗДЕЛЕННОЙ МОДЕЛИ

²² Индексы справа зарезервированы под вариантность параметров. В связи с этим используется индекс слева, означающий принадлежность к сети заданной размерности. Изменение размерности приведет к изменению полной кибернетической мощности, а это означает, что она не будет являться уже инвариантом рассматриваемой сети. (Индексы слева, наверху, внизу предложено применять Я. Схоутеном [49] для изменения коренной буквы.)

Расчет ИС тензорной методологией предполагает взаимодействие ее материальной части с параметрами T и R , т.е. топологии с «живой» сущностью в виде совокупности информационных потоков, которая определяется параметрами Λ , V . В связи с этим в моделях ИС потоки распределяются автоматически в зависимости от топологии сети и временных задержек инфцугов в КЭ, т.е. в КС и УН. Последнее означает, что в узлах коммутации УН можно принудительно (на основе алгоритмов распределения трафика) не разделять по исходящим направлениям передачи в КС. С другой стороны, в любой ОС кибернетическим сопротивлением в терминах времени T обладает как КС, выступающий в роли обслуживающего устройства, так и УН УК. Исходя из этого, в предположении анализа ИС на интервале времени, когда параметры T_{bb} (или R^{bb}) для УН и T_{cc} (или R^{cc}) для КС не являются функциями потоков (наряду с условиями непрерывности и однородности, которые предполагаются для сети в сопредельном состоянии), ОС можно разделить на два новых типа кибернетических элементов: КЭ-УН и КЭ-КС. Каждому УН и КС поставим в соответствие эквивалентную ветвь, характеризуемую ортогональными переменными, т.е. они одновременно будут описываться параметрами цепей разомкнутого и замкнутого типа. Это объясняется следующими обстоятельствами.

1. В КС непрерывно передается информация в виде инфцугов определенной длины ($1/\bar{\mu}$, бит). При заданной пропускной способности КС (C , бит/с) кибернетическую проводимость определим как $R^{cc} = \bar{\mu}C$ (инфцуг/с). Двойственным параметром является время T_{cc} , которое система затрачивает на передачу одного инфцуга по КС. Интенсивность стационарного потока Λ^c в КС определяется двумя составляющими:

λ^c – интенсивностью, характеризующей скорость, с одной стороны, уменьшения числа инфцугов в УН отправителя, с другой – увеличения числа инфцугов в УН получателя; интенсивностью внешнего потока γ^c , который воздействует на КС в виде использования части его ресурса (например, помеховый сигнал). Таким образом, в КС присутствуют потоки информации, которые можно охарактеризовать параметрами одновременно замкнутой (n_c, λ^c) и разомкнутой (N_c, γ^c) систем.

2. УН с ожидающими инфцугами представляет также сопротивление в терминах времени входному потоку. Прохождение транзитного потока через УК с параметрами λ^b, n^b (где n^b – число инфцугов в УН при известном времени нахождения в очереди T_{bb} , обуславливающее значения λ^b) характеризуется параметрами замкнутого контура, так как источником кибернетического напряжения являются накопления инфцугов n^b транзитного трафика. Одновременно с этим входные потоки γ^b из-за наличия T_{bb} вызывают дополнительные накопления N_b . Последние будем считать параметрами разомкнутых цепей.

Таким образом, примитивную цепь ОС можно рассматривать в виде уже подразделенной цепи на две части кибернетических элементов – КЭ-УН и КЭ-КС (рис. 4.3, а, б, соответственно).

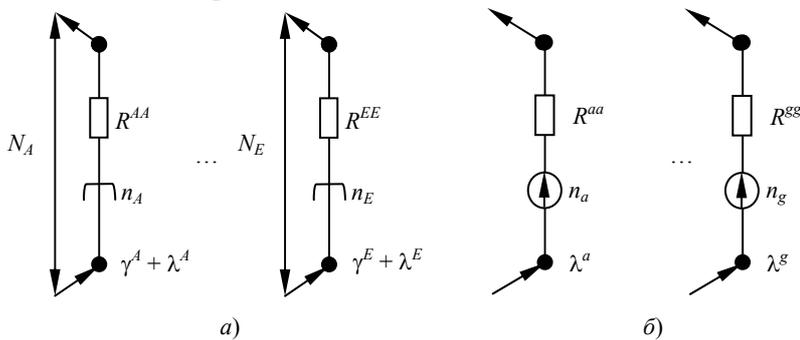


Рис. 4.3

В этом случае все КЭ описываются ортогональными переменными. Систему координат, определяющую подразделенную примитивную цепь, обозначим α . Особенность преобразования подразделенной примитивной цепи, в отличие от обычной, состоит в том, что в соединенной структуре должно су-

существовать также подразделение на два типа ветвей. Согласно комбинаторной топологии, каждой ветви топологического орграфа, характеризующего структуру ИС, приписываются значения одной из компонент тензора T (или R). Для определения взаимного расположения в модели двух типов ветвей отметим особенности передачи по сети инфцугов по двум последовательно соединенным КС: в промежутке между ними, после проверки правильности приема в первом КС, инфцуги посещают УН. Кроме того, все внешние входные пользовательские инфцуги перед передачей по КС также помещаются в УН. Это поясняется условной графической моделью для сети из пяти УК в виде сети из соединенных определенным образом ОС (рис. 4.4, а). Если предположить, что непрерывные потоки одноприоритетных инфцугов распределяются, исходя из времени передачи в выходных КС, то все УН в узле, например в A , можно объединить в единое УН, в котором протекают петлевые потоки с выходом в разные КС. Из-за ограничений R^{cc} уходящих КС скорости передачи инфцугов до петли в УК и после нее различные. С учетом этого, используя понятия кибернетических параметров, аналогично электрическим, получим модель, представленную на рис. 4.4, б.

Стрелки внутри кружков, обозначающих обслуживающие устройства (в нашем случае КС), показывают направления передач инфцугов, а прямоугольники – наличие кибернетических сопротивлений в терминах времени для всех КЭ. В целом такая модель изображается двумя составляющими: *первая часть* – горизонтальная подсеть, характеризуется ветвями связи (т.е. КС) и отображает топологию сети; *вторая часть* – вертикальная подсеть состоит из ветвей – узловых пар «узел коммутации – УН».

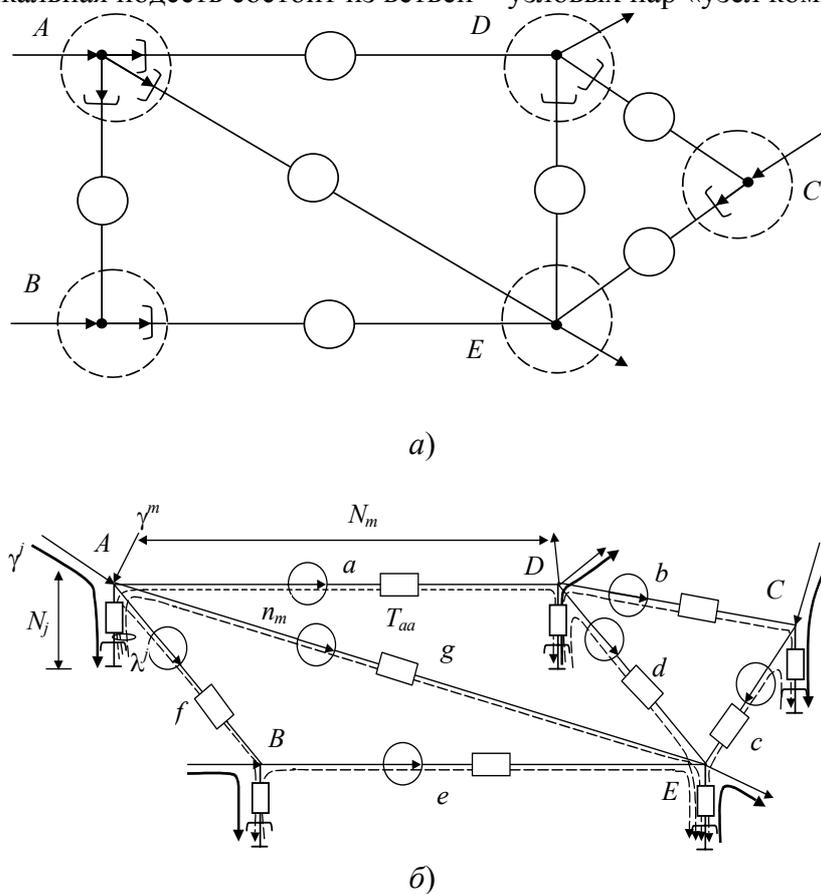


Рис. 4.4

Узел коммутации в данном контексте означает точку соединения различного рода КС (в том числе внешних: входных и выходных) и УН временного хранения инфцугов. Система координат такой сети (рис. 4.5) характеризуется потоками разомкнутых цепей (j), проходящих через узловые пары, и замкнутых контуров (m), каждый из которых включает КС и два УН, подсоединенных к его входу и выходу. Новую систему координат обозначим β .

Рассмотрим подразделенную примитивную цепь. Уравнения сети в тензорной форме имеют вид:

$$а) V_{\alpha} = T_{\alpha\alpha} \Lambda^{\alpha}; \quad б) \Lambda^{\alpha} = R^{\alpha\alpha} V_{\alpha}, \quad (4.17)$$

$$\alpha = \begin{array}{|c|} \hline b \\ \hline c \\ \hline \end{array} \quad \alpha = \begin{array}{|c|} \hline b \\ \hline c \\ \hline \end{array} \quad (4.18)$$

Предположение об ортогональных переменных означает для УН: $V_b = N_b + n_b$, $\Lambda^b = \gamma^b + \lambda^b$. Подобные выражения существуют и для КС.

С учетом приведенного уравнения сети в общем случае можно записать:

$$\begin{array}{|c|} \hline b \\ \hline c \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline N_b + \\ n_b \\ \hline N_c + \\ n_c \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline b \\ \hline c \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline T_{bb} & T_{bc} \\ \hline T_{cb} & T_{cc} \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline b \\ \hline c \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \gamma^b + \\ \lambda^b \\ \hline \gamma^c + \lambda^c \\ \hline \end{array}, \quad (4.19)$$

$$\begin{array}{|c|} \hline b \\ \hline c \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \gamma^b + \\ \lambda^b \\ \hline \gamma^c + \\ \lambda^c \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline b \\ \hline c \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline R^{bb} & R^{bc} \\ \hline R^{cb} & R^{cc} \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline b \\ \hline c \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline N_b + \\ n_b \\ \hline N_c + \\ n_c \\ \hline \end{array}, \quad (4.20)$$

где индексы «b» и «c» при тензорах в выражениях (4.18 – 4.20) являются компаунд-индексами, заменяющими фиксированные индексы соответствующих КЭ.

Исходя из (4.19), (4.20), ортогональные уравнения для СК α можно записать в виде:

$$\text{а) } N_b + n_b = T_{bb}(\gamma^b + \lambda^b) + T_{bc}(\gamma^c + \lambda^c); \quad (4.21)$$

$$\text{б) } N_c + n_c = T_{cb}(\gamma^b + \lambda^b) + T_{cc}(\gamma^c + \lambda^c);$$

$$\text{а) } \gamma^b + \lambda^b = R^{bb}(N_b + n_b) + R^{bc}(N_c + n_c); \quad (4.22)$$

$$\text{б) } \gamma^c + \lambda^c = R^{cb}(N_b + n_b) + R^{cc}(N_c + n_c).$$

Составляющие матрицы $R^{\alpha\alpha}$ (то же относится и к двойственным величинам $T_{\alpha\alpha}$) R^{bc} и R^{cb} характеризуют взаимные кибернетические проводимости между УН и КС. Так как какая-либо физическая связь УН и КС в примитивной подразделенной цепи отсутствует, взаимные кибернетические проводимости равны 0. Это означает, что условно передаваемые потоки в КС не вызывают одновременного возникновения кибернетических напряжений в УК, в частности в УН.

Для соединенной сети, т.е. модели ИС, в СК β , ортогональные уравнения будут иметь вид:

$$\text{а) } N_\beta + n_\beta = T_{\beta\beta}(\gamma^\beta + \lambda^\beta); \quad \text{б) } \gamma^\beta + \lambda^\beta = R^{\beta\beta}(N_\beta + n_\beta). \quad (4.23)$$

Из (4.28), с учетом разложения на составляющие треугольной матрицы C_{β}^{α} , получим:

$$\begin{matrix} & \beta \\ j & \begin{bmatrix} n_j \end{bmatrix} \\ m & \begin{bmatrix} n_m \end{bmatrix} \end{matrix} = \begin{matrix} & b & c \\ j & \begin{bmatrix} C_j^{\cdot b} & \end{bmatrix} \\ m & \begin{bmatrix} C_m^{\cdot b} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \end{matrix} \begin{matrix} \alpha \\ b & \begin{bmatrix} n_b \end{bmatrix} \\ c & \begin{bmatrix} n_c \end{bmatrix} \end{matrix}, \quad (4.29)$$

т.е.

$${}^{\beta}n_j = C_j^{\cdot b} n_b, \quad (4.30)$$

$${}^{\beta}n_m = C_m^{\cdot b} n_b + n_c. \quad (4.31)$$

Из (4.31) видно, что в соединенной сети кибернетические напряжения замкнутых контуров (определяемые КС) зависят от связности сети и кибернетических напряжений УК.

С целью определения информационных потоков в ИС определим кибернетические проводимости в СК β :

$$R^{\beta\beta} = A_{\cdot\alpha}^{\beta} R^{\alpha\alpha} A_{\alpha}^{\beta}, \quad (4.32)$$

их составляющие:

$$\begin{aligned} \text{а) } R^{jj} &= A_{\cdot\alpha}^j R^{\alpha\alpha} A_{\alpha}^j; & \text{б) } R^{jm} &= A_{\cdot\alpha}^j R^{\alpha\alpha} A_{\alpha}^m; \\ \text{в) } R^{mj} &= A_{\cdot\alpha}^m R^{\alpha\alpha} A_{\alpha}^j; & \text{д) } R^{mm} &= A_{\cdot\alpha}^m R^{\alpha\alpha} A_{\alpha}^m, \end{aligned} \quad (4.33)$$

где R^{jm} и R^{mj} – взаимные проводимости между разомкнутыми и замкнутыми цепями. Используя разложение компаунд-тензора $R^{\alpha\alpha}$ на составляющие, определим кибернетические проводимости в соединенной структуре:

$$\begin{aligned} R^{\beta\beta} &= \begin{matrix} & j & m \\ j & \begin{bmatrix} R^{jj} & R^{jm} \\ R^{mj} & R^{mm} \end{bmatrix} \\ m & \end{matrix} = \begin{matrix} & j & m \\ j & \begin{bmatrix} A_{\cdot b}^j R^{bb} A_b^j + & A_{\cdot b}^j R^{bb} A_b^m + \\ + A_{\cdot b}^j R^{bc} A_c^j + & A_{\cdot b}^j R^{bc} A_c^m + \\ + A_{\cdot c}^j R^{cb} A_b^j + & A_{\cdot c}^j R^{cb} A_b^m + \\ + A_{\cdot c}^j R^{cc} A_c^j & A_{\cdot c}^j R^{cc} A_c^m \end{bmatrix} \\ m & \begin{bmatrix} A_{\cdot b}^m R^{bb} A_b^j + & A_{\cdot b}^m R^{bb} A_b^m + \\ + A_{\cdot b}^m R^{bc} A_c^j + & + A_{\cdot b}^m R^{bc} A_c^m + \\ + A_{\cdot c}^m R^{cb} A_b^j + & + A_{\cdot c}^m R^{cb} A_b^m + \\ + A_{\cdot c}^m R^{cc} A_c^j & + A_{\cdot c}^m R^{cc} A_c^m \end{bmatrix} \end{matrix} = \\ &= j \left[\begin{matrix} j & m \\ A_{\cdot b}^j R^{bb} A_b^j + A_{\cdot c}^j R^{cc} A_c^j & A_{\cdot c}^j R^{cc} A_c^m \end{matrix} \right], \end{aligned}$$

$$m \left[\begin{array}{c|c} A_c^m R^{cc} A_c^j & A_c^m R^{cc} A_c^m \end{array} \right] (4.34)$$

где учтена треугольная форма матрицы преобразования A_c^β и нулевые значения компонент R^{cb} и R^{bc} . В полученном выражении составляющие матрицы R^{ij} зависят: первая (${}^b R^{ij}$) – от числа ожидающих инфцугов в очередях УН, вторая (${}^c R^{ij}$) – от кибернетических проводимостей КС. Диагональные элементы ${}^c R^{ij}$ отображают кибернетические проводимости УН, равные сумме проводимостей всех подключенных к ним КС (без учета направления, учитывая каналный ресурс УК как на прием, так и на передачу), а недиагональные элементы расписывают их в зависимости от УК-соседей. Матрицей R^{jm} указывается для УК совокупность входных и выходных КС с заданными кибернетическими проводимостями, а матрицей R^{mj} – для каждого КС кибернетические проводимости в точках УК-отправителя и УК-получателя.

В случае отсутствия внешнего потока в каналах связи ($\gamma^m = 0$ и $N_m = 0$) ортогональные тензорные уравнения для информационных потоков в СК β можно записать:

$$\gamma^j + \lambda^j = R^{jj} (N_j + n_j) + R^{jm} n_m; \quad (4.35)$$

$$\lambda^m = R^{mj} (N_j + n_j) + R^{mm} n_m, \quad (4.36)$$

где кибернетические проводимости определяются выражением (4.34), а источники кибернетических напряжений в КЭ – выражениями (4.30), (4.31). Для рассматриваемой сети уравнение (4.35) можно записать в развернутом виде:

$$\begin{aligned} \gamma^{j_1} + \lambda^{j_1} &= R^{j_1 j_1} (N_{j_1} + n_{j_1}) + \dots + R^{j_1 j_5} (N_{j_5} + n_{j_5}) + R^{j_1 m_1} n_{m_1} + \dots + R^{j_1 m_7} n_{m_7}; \\ \gamma^{j_2} + \lambda^{j_2} &= R^{j_2 j_1} (N_{j_1} + n_{j_1}) + \dots + R^{j_2 j_5} (N_{j_5} + n_{j_5}) + R^{j_2 m_1} n_{m_1} + \dots + R^{j_2 m_7} n_{m_7}; \\ \gamma^{j_3} + \lambda^{j_3} &= R^{j_3 j_1} (N_{j_1} + n_{j_1}) + \dots + R^{j_3 j_5} (N_{j_5} + n_{j_5}) + R^{j_3 m_1} n_{m_1} + \dots + R^{j_3 m_7} n_{m_7}; \\ \gamma^{j_4} + \lambda^{j_4} &= R^{j_4 j_1} (N_{j_1} + n_{j_1}) + \dots + R^{j_4 j_5} (N_{j_5} + n_{j_5}) + R^{j_4 m_1} n_{m_1} + \dots + R^{j_4 m_7} n_{m_7}; \\ \gamma^{j_5} + \lambda^{j_5} &= R^{j_5 j_1} (N_{j_1} + n_{j_1}) + \dots + R^{j_5 j_5} (N_{j_5} + n_{j_5}) + R^{j_5 m_1} n_{m_1} + \dots + R^{j_5 m_7} n_{m_7}, \end{aligned} \quad (4.37)$$

где $j_i, i = 1, \dots, 5$ – индексы, характеризующие номер по порядку узловых пар (рис. 4.5), например: A соответствует $j_1, m_i, i = 1, \dots, 7$ – характеризуют соответствующие контурные цепи, например, m_1 соответствует контуру, который включает КС a .

Как видно, уравнения (4.35), (4.36) определяют все потоки в любой СК, характеризующей связную информационную сеть. Однако для их решения необходимо учесть следующее. В (4.35), (4.37) внешний пользовательский поток γ^j состоит из известных входных ${}^{bx} \gamma^j$ и неизвестных выходных ${}^{вых} \gamma^j$ потоков. В связи с этим ортогональные уравнения соединенной сети (4.35), (4.37) необходимо решать в два этапа: на основе входного трафика определить реакцию УК в виде дополнительных накоплений инфцугов, затем по известным накоплениям определяются выходные потоки. Таким образом, разделив (4.35), (4.37) на две части относительно входных и выходных потоков, необходимо решить следующие уравнения относительно различных неизвестных:

$$N_j = {}^{bx} \left[R^{jj} \right]^{-1} \left[{}^{bx} \gamma^j + {}^{bx} \lambda^j - {}^{bx} R^{jj} n_j - {}^{bx} R^{jm} n_m \right]; \quad (4.38)$$

$${}^{вых} \gamma^j = {}^{вых} R^{jj} (N_j + n_j) + {}^{вых} R^{jm} n_m - {}^{вых} \lambda^j, \quad (4.39)$$

где все матрицы кибернетических проводимостей имеют прямоугольную форму.

Для их определения сначала находятся полные (квадратные) матрицы R^{jj}, R^{jm} , затем они подразделяются на две части по горизонтали, обратная матрица $R^{jj}{}^{-1}$ подразделяется по вертикали. При решении

Таким образом, в отличие от задачи анализа, где инвариантом является кибернетическая мощность ИС, при решении задачи синтеза таковым является выбранный критерий поведения.

Если в качестве критерия поведения выбрать инвариантность временной задержки входному трафику [135], то основными этапами синтеза аналогично [43] можно выделить следующие задачи.

1. Определение соотношений между временными задержками сообщений в путях соединенной исходной сети, которые соответствуют функционированию сети требуемым образом. Эти соотношения между компонентами тензора $T_{\alpha\alpha}$ ²³, где $\alpha = 1, \dots, n$ – индекс, означающий исходную сеть, а n – число абонентов в ней, являются *критериями поведения сети* и служат инвариантом в преобразованиях. (Здесь принято и в дальнейшем будет использовано следующее *упрощение*: приписанные к корневой букве T два ковариантных скользящих индекса, которые независимо друг от друга пробегают значения от 1 до n , имеют одинаковое обозначение: α . Такое упрощение вынужденное, так как существенно упрощает в дальнейшем записи преобразований в тензорной форме для различных сетей.)

2. Находятся соотношения между задержками $T_{\beta\beta}$ синтезируемой сети (скользящие индексы β соответствуют другой, т.е. новой сети с числом абонентов $m \neq n$) без выхода из критерия по задержке. При этом используется тензор синтеза $C_{\beta'}^{\alpha'}$:

$$T_{\beta'\beta'} = C_{\beta'}^{\alpha'} T_{\alpha'\alpha'} C_{\beta'}^{\alpha'}. \quad (4.41)$$

Таким образом, этот этап предполагает определение тензора синтеза $C_{\beta'}^{\alpha'}$.

3. Если тензор синтеза $C_{\beta'}^{\alpha'}$, меняющий $T_{\alpha'\alpha'}$ на $T_{\beta'\beta'}$ без выхода из области согласия с критерием, известен, то в последующем можно определить тензор синтеза для примитивных сетей C_{β}^{α} . Этот тензор меняет временные задержки $T_{\alpha\alpha}$ ОС примитивной сети, формирующих исходную ИС, на тензор временных задержек $T_{\beta\beta}$ ОС любой другой сети (в нашем случае β) без определения $T_{\alpha'\alpha'}$ и $T_{\beta'\beta'}$, но с учетом топологий, т.е. соединений ОС в реальные структуры.

Таким образом, итогом задачи синтеза, при определенных критериях поведения относительно исходной сети, является определение тензора синтеза C_{β}^{α} для примитивных сетей, что означает определение временных параметров для одноканальных систем в отдельности, но с учетом числа абонентов и связности синтезируемой сети. Особенностью при синтезе является то, что тензоры $C_{\beta'}^{\alpha'}$ и C_{β}^{α} представляют новый тип преобразования. В отличие от обычных тензоров преобразования $C_{\alpha'}^{\alpha}$ и C_{β}^{β} , осуществляющих преобразования в пределах соответствующих сетей, тензоры синтеза устанавливают соответствие между сетями, имеющими вообще различную топологию с неодинаковым числом каналов.

Б. Критерий постоянства временной задержки входного трафика

В качестве модели ИС используем ортогональную модель, приведенную в п. 4.5 и графически представленную на рис. 4.4, б. Значения состояний УН, потоков и временных задержек каналов и узловых пар представляются в виде компаунд-тензоров, обеспечивающих описание сети с помощью системы из двух ортогональных тензорных уравнений вдоль осей замкнутых контуров и узловых пар:

$$N_j + n_j = T_{jj}(\gamma^j + \lambda^j) + T_{jm}\lambda^m; \quad (4.42)$$

$$n_m = T_{mj}(\gamma^j + \lambda^j) + T_{mm}\lambda^m, \quad (4.42')$$

где предполагается отсутствие внешних потоков в КС ($\gamma^m = 0$, а, следовательно, и реакция на него в каналах в виде накоплений инфцугов $N_m = 0$).

Выразим из (4.42') потоки в КС и подставим результат в (4.42), получим:

²³ Штрих характеризует соединенную сеть связи.

$$N_j + n_j = T_{jj}(\gamma^j + \lambda^j) + T_{jm}T_{mm}^{-1}[n_m - T_{mj}(\gamma^j + \lambda^j)]. \quad (4.43)$$

Преобразуем (4.43) к виду обобщенного тензорного уравнения

$$V_{\alpha'} = \Lambda^{\alpha'} T_{\alpha'\alpha'}, \quad (4.44)$$

где $V_{\alpha'}$ – количество инфцугов в ИС; $\Lambda^{\alpha'}$ – тензор интенсивностей в сети (как внешних, так и внутренних).

В результате получим

$$N_j + n_j - T_{jm}T_{mm}^{-1}n_m = (\gamma^j + \lambda^j)[T_{jj} - T_{jm}T_{mm}^{-1}T_{mj}]. \quad (4.45)$$

В выражении (4.45) в правой части в квадратных скобках имеет место соотношение временных задержек в соединенной сети α , т.е. в исходной сети

$$T_{\alpha'\alpha'} = T_{jj} - T_{jm}T_{mm}^{-1}T_{mj}, \quad (4.46)$$

которое и служит критерием постоянства временных задержек.

4.7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕНЗОРА СИНТЕЗА

Предположим в качестве синтезируемой сети другую, произвольную сеть (она будет сопровождаться индексом β), которая может быть получена с помощью тензора преобразования $C_{\beta'}^{\alpha'}$. В общем случае число каналов в ней $m \neq n$. Для выполнения условия инвариантности временной задержки входного потока необходимо, независимо от тензора преобразования (а следовательно, от топологии, числа абонентов и пропускных способностей КС), чтобы установленный критерий поведения сети не менялся. Это означает, что он должен иметь одну и ту же форму как до преобразования, так и после преобразования посредством $C_{\beta'}^{\alpha'}$.

Воспользуемся процедурой определения тензора $C_{\beta'}^{\alpha'}$, которая представлена в [43] для расчета электрических цепей. Она состоит в предварительном преобразовании тензора временных задержек $T_{\beta'\beta'}$ посредством несингулярного неопределенного тензора синтеза $C_{\beta'}^{\alpha'}$. Затем, используя некоторые упрощения последнего, восстановим форму критерия поведения для синтезируемой сети.

Согласно анализу ортогональной модели в п. 4.5, компаунд-тензор временных задержек $T_{\alpha'\alpha'}$ исходной сети имеет вид

$$T_{\alpha'\alpha'} = \begin{array}{c} \alpha \\ \rightarrow \\ \alpha \downarrow \\ \begin{array}{cc} j & m \\ \hline j & \begin{array}{|c|c|} \hline T_{ij} & T_{jm} \\ \hline T_{mj} & T_{mm} \\ \hline \end{array} \\ m \end{array} \end{array} \quad (4.47)$$

Составим в общем виде несингулярный компаунд-тензор преобразования $C_{\beta'}^{\alpha'}$, каждая компонента которого – неопределенный 2-тензор:

$$C_{\beta'}^{\alpha'} = \begin{array}{c} \beta \\ \searrow \\ \rightarrow \\ \alpha \downarrow \\ \begin{array}{cc} j & m \\ \hline j & \begin{array}{cc} C_{.j}^j & C_{.m}^j \\ \hline C_{.j}^m & C_{.m}^m \end{array} \end{array} \end{array} \quad (4.48)$$

Необходимо заметить, что в общем случае, когда синтезируемая сеть имеет отличное число абонентов от исходной, число линейно независимых контуров и узловых пар сети β может отличаться от сети α . Это означает, что тензор синтеза, представленный не компаунд-составляющими, а непосредственно осями, характеризующими пути в сети, будет являться уже сингулярным.

Итак, компоненты тензора задержек $T_{\beta'\beta'}$ синтезируемой сети с использованием тензора преобразования (синтеза) $C_{\beta'}^{\alpha'}$ и формулы преобразования (4.14) имеют вид:

$$T_{\beta'\beta'} = C_{\beta'}^{\alpha'} T_{\alpha'\alpha'} C_{\beta'}^{\alpha'}$$

$$T_{\beta'\beta'} = \begin{array}{c} \beta \\ \searrow \\ \rightarrow \\ \beta \\ \downarrow \\ \begin{array}{cc} j & m \\ \hline j & \begin{array}{cc} C_j^j (T_{jj} C_{.j}^j + T_{jm} C_{.j}^m) & C_j^j (T_{jj} C_{.m}^j + T_{jm} C_{.m}^m) \\ + C_j^m (T_{mj} C_{.j}^j + T_{mm} C_{.j}^m) & + C_j^m (T_{mj} C_{.m}^j + T_{mm} C_{.m}^m) \\ \hline m & \begin{array}{cc} C_m^j (T_{jj} C_{.j}^j + T_{jm} C_{.j}^m) & C_m^j (T_{jj} C_{.m}^j + T_{jm} C_{.m}^m) \\ + C_m^m (T_{mj} C_{.j}^j + T_{mm} C_{.j}^m) & + C_m^m (T_{mj} C_{.m}^j + T_{mm} C_{.m}^m) \end{array} \end{array} \end{array} \quad (4.49)$$

Так как, с одной стороны, независимо от конфигурации сети между узловыми парами моделей исходной и синтезируемой сетей не может быть физического соединения, кроме как через каналы, а с другой – постоянство временной задержки рассматривается относительно выбранных ОА-пар, то компонента в левом верхнем углу компаунд-тензора преобразования в (4.49) будет являться единичной матрицей: $C_j^j = I$. Кроме того, согласно (4.46), для обеспечения инвариантности соотношений временной задержки входному трафику, необходимо определение в терминах $T_{\beta'\beta'}$ обратного тензора – от компоненты в правом нижнем углу компаунд-тензора (4.49). Чтобы выполнить это условие, необходимо принять компоненту тензора синтеза C_j^m равной нулю.

Тензор задержек $T_{\beta'\beta'}$ после принятых условий для тензора синтеза будет иметь следующий вид:



$$\begin{array}{c}
\beta \\
\rightarrow \\
j \qquad \qquad m \\
\beta \\
\downarrow \\
j \\
T_{\beta'f} \\
m
\end{array}
\begin{array}{|c|c|}
$T_{jj} + C_{.j}^m T_{jm} +$ $+ T_{mj} C_j^m + C_{.j}^m T_{mm} C_j^m$	$T_{jm} C_m^m + C_j^m T_{mm}$
$C_m^m T_{mj} + C_m^m T_{mm} C_j^m$	$C_m^m T_{mm} C_m^m$

\quad (4.50)$$

В силу принятого критерия (4.46) временная задержка относительно осей синтезируемой сети должна определяться аналогичным выражением

$${}^{\beta}T_{jj} - {}^{\beta}T_{jm} ({}^{\beta}T_{mm})^{-1} {}^{\beta}T_{mj} =$$

$$= (T_{jj} + C_{.j}^m T_{jm} + C_j^m T_{mj} + C_{.j}^m T_{mm} C_j^m) - (T_{jm} C_m^m + C_j^m T_{mm} C_m^m) (C_m^m T_{mm} C_m^m)^{-1} (C_m^m T_{mj} + C_m^m T_{mm} C_j^m). \quad (4.51)$$

ПРОАНАЛИЗИРУЕМ ПОЛУЧЕННОЕ ВЫРАЖЕНИЕ, ИСПОЛЬЗУЯ ВРЕМЕННЫЕ ЗАДЕРЖКИ МЕЖДУ ВЫБРАННЫМИ КОНТУРАМИ И РАЗОМКНУТЫМИ ЦЕПЯМИ В СЕТИ α , СОСТАВЛЯЮЩИЕ КОМПАУНД-ТЕНЗОРА СИНТЕЗА $C_{\beta'}^{\alpha}$, А ТАКЖЕ УЧТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРАВИЛА ЭЙНШТЕЙНА:

${}^{\beta}T_{jj}$ – первый член суммы (4.51) состоит из следующих компонент. T_{jj} – время нахождения инфцугов в УН УК, которые рассматриваются в качестве входных как для соединенной сети α' , так и для синтезируемой сети β' . Компонента $C_{.j}^m T_{jm}$ характеризует время в узлах новой сети на обработку инфцугов от момента изъятия их из УН до момента начала передачи по всем используемым каналам старой сети. Значения составляющей $C_j^m T_{mj}$ характеризуют время, затрачиваемое входными узлами на прием инфцугов по всем входящим каналам старой сети (если они используются) от момента начала передачи инфцугов передающими узлами до момента окончания приема. Компонента $C_{.j}^m T_{mm} C_j^m$ – временные задержки между узлами новой сети, которые используют непосредственно передачи по каналам старой сети. Таким образом, первая составляющая характеризует затраты, в нашем случае временные, на обслуживание примыкающих каналов старой системы (исходной) как на прием, так и на хранение и передачу.

ИЗ ВРЕМЕННЫХ ЗАТРАТ, УКАЗАННЫХ ВЫШЕ, ВЫЧИТАЕТСЯ ВТОРАЯ КОМПОНЕНТА. ЕЕ СОСТАВЛЯЮЩАЯ $(C_m^m T_{mm} C_m^m)^{-1}$ ОЗНАЧАЕТ ВЕЛИЧИНУ, ОБРАТНУЮ ЗАДЕРЖКЕ, ОБУСЛОВЛЕННОЙ ВЗАИМНЫМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕМ КС С УЧЕТОМ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ СЕТИ. ДРУГИМИ СЛОВАМИ, ЕЕ КОМПОНЕНТЫ ХАРАКТЕРИЗУЮТ СКОРОСТЬ ПЕРЕДАЧИ КАНАЛОВ В УСЛОВИЯХ ВЗАИМНОГО ВЫРАЖЕНИЯ УЗЛОВЫХ ПОТОКОВ ЧЕРЕЗ КОНТУРНЫЕ ПОТОКИ ИСХОДНОЙ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ. СОСТАВЛЯЮЩАЯ C_m^m , В СВОЮ ОЧЕРЕДЬ, ОПРЕДЕЛЯЕТ ВЫРАЖЕНИЕ КОНТУРНЫХ ПОТОКОВ СТАРОЙ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ ЧЕРЕЗ СОВОКУПНОСТЬ КОНТУРНЫХ ПОТОКОВ НОВОЙ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ.

ЧТОБЫ РАЗОБРАТЬ ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ КОМПОНЕНТЫ $T_{jm} C_m^m + C_j^m T_{mm} C_m^m$, РАЗБЕРЕМ ЕЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ. ТАК КАК T_{mm} – ВРЕМЯ ПЕРЕДАЧИ ПО КАНАЛАМ, ТО ВТОРОЕ СЛАГАЕМОЕ ХАРАКТЕРИЗУЕТ ВРЕМЯ ПЕРЕДАЧИ ОТ УЗЛОВ НОВОЙ СЕТИ ПО КАНАЛАМ, КОТОРЫЕ К НИМ ПОДКЛЮЧЕНЫ. ПЕРВОЕ СЛАГАЕМОЕ – $T_{jm} C_m^m$ ХАРАКТЕРИЗУЕТ

ВРЕМЯ ОБРАБОТКИ ПРИ ПЕРЕХОДЕ УЗЛА ОТ РЕЖИМА ХРАНЕНИЯ К РЕЖИМУ ПЕРЕДАЧИ ПО ЭТИМ КАНАЛАМ.

Компоненты ${}^{\beta}T_{mj}$ характеризуются аналогично ${}^{\beta}T_{jm}$, с той лишь разницей, что они характеризуют процессы приема инфцугов до момента их постановки в очередь УН узлов коммутации.

Последний элемент матрицы преобразования (4.52) характеризует задержки в КС, вызванные взаимным их влиянием.

С ДРУГОЙ СТОРОНЫ, ПРОВЕДЯ СУММИРОВАНИЕ ПО ВСЕМ ИНДЕКСАМ СОГЛАСНО ПРАВИЛУ ЭЙНШТЕЙНА, ПОЛУЧИМ

$${}^{\beta}T_{jj} - {}^{\beta}T_{jm} ({}^{\beta}T_{mm})^{-1} {}^{\beta}T_{mj} = {}^{\alpha}T_{jj} - {}^{\alpha}T_{jm} ({}^{\alpha}T_{mm})^{-1} {}^{\alpha}T_{mj}. \quad (4.52)$$

ИЗ ВЫРАЖЕНИЯ (4.52) СЛЕДУЕТ, ЧТО ПОСЛЕ ТОГО КАК ТЕНЗОР СИНТЕЗА ПРИНЯЛ УПРОЩЕНИЕ, ПОСЛЕДУЮЩЕЕ УМНОЖЕНИЕ ЕГО НА $T_{\alpha'\alpha'}$ ОСТАВЛЯЕТ КРИТЕРИЙ ПОВЕДЕНИЯ БЕЗ ИЗМЕНЕНИЯ, ТАК КАК ВСЕ КОМПОНЕНТЫ ТЕНЗОРА СИНТЕЗА НЕ УЧАСТВУЮТ В ОПРЕДЕЛЕНИИ ВРЕМЕННЫХ ЗАДЕРЖЕК ВХОДНОГО ТРАФИКА СИНТЕЗИРУЕМОЙ СЕТИ. ТЕМ НЕ МЕНЕЕ ТЕНЗОР СИНТЕЗА ИЗМЕНЯЕТ ВЗАИМОСВЯЗЬ УЗЛОВ КОММУТАЦИИ, МЕНЯЕТ ПРОПУСКНЫЕ СПОСОБНОСТИ КС.

Как видно, тензор синтеза $C_{\beta'}^{\alpha'}$ изменяет $T_{\alpha'\alpha'}$ на $T_{\beta'\beta'}$ другой сети, имеющей те же характеристики поведения. Так как компоненты $T_{\alpha'\alpha'}$ и $T_{\beta'\beta'}$ представляют собственные и взаимные задержки в КС, соединенных в определенную сетевую топологию, то определение задержек в отдельных КЭ является достаточно трудоемкой задачей. Поэтому необходимо определить примитивный тензор синтеза C_{β}^{α} , который должен устанавливать переход состояния отдельных КЭ, обеспечивающих в совокупности требуемые характеристики поведения (в данном случае постоянную среднюю временную задержку). С его помощью находятся собственные и взаимные задержки КЭ синтезируемой сети через собственные и взаимные задержки КЭ исходной сети. Такое преобразование принципиально важно, так как оно позволяет определять собственные и взаимные задержки КЭ, не используя определение таковых в путях разомкнутых и замкнутых цепей.

Для определения примитивного тензора синтеза проведем подобные преобразования [43], в которых участвуют обычные тензоры преобразования для исходной и синтезируемой сети, т.е. $C_{\alpha'}^{\alpha}$ и $C_{\beta'}^{\beta}$. Так как в каждой соединенной сети тензоры временных задержек определяются соотношениями $T_{\alpha'\alpha'} = C_{\alpha'}^{\alpha} T_{\alpha\alpha} C_{\alpha}^{\alpha'}$ и $T_{\beta'\beta'} = C_{\beta'}^{\beta} T_{\beta\beta} C_{\beta}^{\beta'}$, то используя преобразование для получения $T_{\beta'\beta'}$ в общем виде (4.51), можно записать:

$$C_{\beta'}^{\beta} T_{\beta\beta} C_{\beta}^{\beta'} = C_{\beta'}^{\alpha'} (C_{\alpha'}^{\alpha} T_{\alpha\alpha} C_{\alpha}^{\alpha'}) C_{\beta'}^{\alpha'}.$$

При переносе тензоров преобразования из левой части в правую получим

$$T_{\beta\beta} = C_{\beta}^{\beta'} C_{\beta'}^{\alpha'} (C_{\alpha'}^{\alpha} T_{\alpha\alpha} C_{\alpha}^{\alpha'}) C_{\beta'}^{\alpha'} C_{\beta}^{\beta'}. \quad (4.53)$$

Если учесть формулу преобразования $T_{\beta\beta} = C_{\beta}^{\alpha} T_{\alpha\alpha} C_{\beta}^{\alpha}$, не обращая внимания на скобки (они использованы с методической точки зрения), примитивный тензор преобразования будет определяться

$$C_{\beta}^{\alpha} = C_{\alpha}^{\alpha'} C_{\beta'}^{\alpha'} C_{\beta}^{\beta'}. \quad (4.54)$$

Итак, определение примитивного тензора синтеза предполагает определение в обычном понимании матрицы преобразования исходной сети и тензора преобразования для синтезируемой сети.

Особенностью подхода к синтезу сетей является произвол коэффициентов тензора синтеза, которые не участвуют в критерии поведения. Это обусловлено следующим.

Несингулярная матрица преобразования исходной сети имеет отличную размерность подобной матрицы другой сети. Исходя из этого основной задачей синтеза является определение собственных

и взаимных временных задержек синтезируемой сети в терминах таких же величин первой сети, причем таким образом, чтобы обе сети имели одинаковое кибернетическое сопротивление в терминах времени входному трафику. В этом случае выбор коэффициентов тензора синтеза должен определяться физической реализуемостью кибернетических элементов, т.е. каналов и УН.

5 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕНЗОРНОЙ МЕТОДОЛОГИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИНФОРМАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИФРОВЫХ РАДИОСЕТЕЙ

В разделе решены прикладные задачи определения информационной эффективности ЦРС различных структур с использованием тензорной методологии. В качестве показателя эффективности применен КПД в смысле передачи информации, полученный на основе параметра – кибернетическая мощность. Результаты проверены имитационным моделированием процессов передачи инфцугов в ЦРС на языке СМО GPSS.

5.1. ОЦЕНКА ИНФОРМАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИФРОВОЙ РАДИОСЕТИ С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЯ НА ВРЕМЕННУЮ ЗАДЕРЖКУ ИНФЦУГОВ

В основу тензорного модельного отображения ЦРС положена ортогональная модель, рассмотренная в п. 4.5 (рис. 4.5). При помощи формул преобразования, решая ортогональные уравнения (4.38), (4.39) и (4.36), в работе [138] были найдены все основные параметры модели стационарной сети, имеющей ячеистую топологию. Кроме этого, произведены топологические преобразования, определена информационная эффективность ЦРС с различными структурами в стационарном режиме информационного обмена и одинаковых условиях эксплуатации.

Применение тензорной методологии к оценке эффективности информационного обмена в ЦРС предполагает наличие трех основных подходов к решению поставленной задачи. Все они различаются способами определения ограничения по временной задержке инфцугов, находящихся в сети [139]. Ортогональные модели ЦРС смешанного типа (с элементами древовидной и ячеистой топологий) и структурой типа «звезда», нашедшие широкое применение в современных системах связи и обладающие рядом существенных достоинств [14, 140, 141], представлены на рис. 5.1 и 5.2 соответственно.

Первый подход к оценке информационной эффективности ЦРС состоит в нахождении допустимого времени пребывания инфцугов в сети $T_{\text{доп}}$ расчетным способом с помощью тензора преобразования длинных путей (путевых потоков) C_{δ}^{α} . В качестве исходных данных для проведения расчета в данном случае используются:

- структура сети, определяющая тензоры преобразования (соединения) A_{α}^{β} , A_{α}^{β} , C_{β}^{α} ;
- пропускные способности КС $C_{kan}[i]$ и выходных каналов $C_{vix}[i]$;
- длина инфцуга $L_{pak} = 300$ бит;
- тензоры внешних потоков γ^b (значения выбраны произвольно);
- число инфцугов в КС примитивной сети n_c задается единичным вектором, показывающим, что система постоянно находится в нагруженном состоянии;
- тензор накоплений инфцугов в УН примитивной сети n_b отсутствия очереди и для входных УК $n_b[i] = 1$, чем обеспечивается выполнение условия непрерывности; при наличии очереди ее величина вычисляется

$$n_b[i] = (\gamma_{mp}[i] - C_{sum_kan}[i]) / L_{pak}, \quad (5.1)$$

исходя из значения транзитного трафика $\gamma_{mp}[i]$ и пропускных способностей КС $C_{sum_kan}[i]$, выходящих из узла коммутации).

Для реализации первого подхода к нахождению $T_{доп}$ в среде Maple V R5 была разработана аналитическая модель оценки эффективности информационного обмена в ЦРС с различными структурами на основе тензорной методологии [142]. Алгоритм функционирования разработанной модели представлен на рис. 5.3. Нахождение основных параметров ЦРС осуществлено на основе исходных данных с использованием формул преобразования или из решения ортогональных уравнений (4.38), (4.39) и (4.36).

В качестве допустимого времени нахождения инфцугов в сети принято наибольшее значение временной задержки при следовании инфцуга по маршруту (длинному пути²⁴) от УК-отправителя до УК-получателя. Поэтому оно включает в себя суммарное значение времени нахождения инфцугов в УН УК и времени передачи по КС, принадлежащих длинному пути. Для того чтобы правильно учесть все перечисленные задержки в суммарном значении путевой задержки использован тензор путевых потоков C_{δ}^{α} [139].

²⁴ Впервые данный термин был использован Г. Кроном в работе «Исследование сложных систем – диакоптика» при расчете основных параметров сложной электрической цепи по частям. Там этим понятием обозначались пути протекания контурных токов, проходящие через несколько контурных и узловых катушек. Поэтому, по аналогии для ортогональной модели ЦРС, его можно применить к путевым потокам.

$n'_b = n_{m(b)}$;	\downarrow	b'	1																	
$n'_c = n_{m(c)} +$ $n_{m(p)}$;	Д	c'		1																1
$n'_d = n_{m(d)} +$ $n_{m(n)}$;	И	d'			1															1
$n'_e = n_{m(e)}$;	Н	e'				1														
$n'_f = n_{m(f)}$;	Ы	f'					1													
$n'_g = n_{m(g)} +$ $n_{m(m)}$;	Е	g'						1												1
$n'_h = n_{m(g)} +$ $n_{m(n)}$;	пути	h'							1											1
$n'_k = n_{m(h)} +$ $n_{m(o)}$;	$C_8^{\beta(m)}$	k'								1										1
$n'_l = n_{m(h)} +$ $n_{m(p)}$;		l'									1									1
$n'_m = n_{m(k)} +$ $n_{m(n)}$;		m'										1								1
$n'_n = n_{m(k)} +$ $n_{m(m)}$;		n'											1		1					
$n'_o = n_{m(l)} +$ $n_{m(o)}$;		o'														1				1
$n'_p = n_{m(l)} +$ $n_{m(p)}$.		p'															1			1

(5.2)

$$A_{\cdot\alpha}^{\beta} = \begin{matrix} & & b & c \\ \begin{matrix} i \\ m \end{matrix} & \begin{matrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{0} \end{matrix} & \begin{matrix} A_c^j \\ \mathbf{I} \end{matrix} \end{matrix} \quad (5.3)$$

Произведение тензоров (5.2) и (5.4) дает искомый тензор путей, являющийся результатом группы преобразований:

$$C_{\delta}^{\cdot\alpha} = C_{\delta}^{\cdot\beta(m)} C_{\beta(m)}^{\cdot\alpha}. \quad (5.5)$$

С учетом формулы преобразования для временных задержек (4.14) тензор путевых задержек $T_{puti} = T_{\delta\delta}^{25}$ определяется выражением

$$T_{\delta\delta} = C_{\delta}^{\cdot\alpha} T'_{\alpha\alpha} C_{\cdot\delta}^{\alpha}, \quad (5.6)$$

где $C_{\cdot\delta}^{\alpha} = (C_{\delta}^{\cdot\alpha})_t$; $T'_{\alpha\alpha}$ – специально полученный тензор временных задержек в примитивной сети, отличающийся от исходного тензора $T_{\alpha\alpha}$, используемого в расчетах параметров сети, блоком задержек в УН T_{bb} . Он определяет на основании задания тензора n_c , матрицы связности M_{sv} , учитывающей производительность каждого УК как суммарную пропускную способность выходящих из него КС, собственно значений $C_{kan}[i]$ и тензора n_{b1} , элементы которого $n_{b1}[i_{vx}] = N_b[i]$ позволяют учитывать задержки внешнего трафика.

Диагональные элементы тензора $T_{\delta\delta}$ представляют собой суммарные временные задержки для каждого длинного пути, складывающиеся из задержек в УН УК и времени передач в КС. Все остальные члены характеризуют точки пересечения различных путевых потоков и могут быть отнесены к процедурам множественного доступа и другим задачам, учитывающим взаимное информационное влияние. Следовательно, найдя наибольший из диагональных элементов тензора путевых задержек $T_{\delta\delta}$ (для этой функции в модели разработан специальный блок), определяется допустимое время нахождения инфцугов в сети $T_{доп}$. В данном случае оно используется в качестве ограничения только при нахождении полной кибернетической мощности. Ограничения числа инфцугов в сети не происходит, исходя из того (работа ЦРС без учета потерь), что само значение $T_{доп}$ определяется накоплениями сетевого трафика [142, 144].

На основании рассчитанных параметров ортогональных моделей ЦРС и с учетом ограничения по временной задержке вычисляется полная кибернетическая мощность $P_{полн}$ и кибернетическая мощность ЦРС $P_{ЦРС}$, при нахождении которой также учитывается ограничение производительности сети G по пропускной способности выходного КС в случае высокой информационной нагрузки. Их отношение, как отмечалось выше (2.25), дает значение кпд в смысле передачи информации, отражающее эффективность информационного обмена в ЦРС с заданной структурой.

На рис. 5.4 представлены исходные данные и результаты расчета информационной эффективности в ортогональной модели ЦРС со смешанной структурой на основе первого подхода к нахождению $T_{доп}$.

Тензор преобразования $A_{\cdot\alpha}^{\beta}$ записан в компаунд-форме с подробным представлением блока $A_{\cdot c}^j$, отражающего зависимость потоков в узловых парах исследуемой модели от потоков в КЭ-КС примитивной подразделенной сети. Отсутствие накоплений транзитного и выходного трафика в УН УК приведенной модели обуславливает невысокую величину общего числа инфцугов в сети $N_{summar} = 1011$ (даже с учетом накоплений, вызванных внешними потоками N_j), что, в свою очередь, определяет низкое значение кибернетической мощности $P_{ЦРС}$. Таким образом, в данной модели ЦРС недостаточно используется свойство хранения информации, несмотря на большое количество длинных путей. Выходной поток

²⁵ T_{puti} – условное обозначение тензора путевых задержек в алгоритме модели, а $T_{\delta\delta}$ – его тензорное обозначение с использованием скользящих индексов.

$\gamma^{j, \text{вых}}$, ограниченный пропускной способностью выходных каналов $C_{\text{вых}}[i]$, также невысок. Большое число ОС подразделенной примитивной сети, но достаточно низкое ограничение по временной задержке, равное $T_{\text{доп}} = 2,3$ с (вследствие невысокого N_{summar}), в общем определяют довольно высокое значение полной кибернетической мощности $P_{\text{полн}}$. Учитывая вышесказанное, величина КПД в смысле передачи информации для ЦРС с элементами ячеистой и древовидной структур составляет всего лишь $\eta_{\text{ЦРС}} = 11,1$ %.

На рис. 5.5 представлены данные расчета информационной эффективности для ортогональной модели ЦРС топологии «звезда» с использованием первого подхода к нахождению $T_{\text{доп}}$.

Анализ полученных результатов показывает, что допустимое время нахождения инфцугов в ЦРС составляет $T_{\text{доп}} = 4,59$ с. Это в 2 раза превышает его значение для смешанной ортогональной модели. Увеличение $T_{\text{доп}}$ объясняется возрастающими накоплениями в УН входных УК вследствие меньшей распределенности внешнего трафика. Очередь в центральном (выходном) отсутствует, так как пять узлов коммутации, где передача инфцугов происходит с временным хранением в УН, обеспечивают ограничение входного потока по пропускной способности КС. Это, в свою очередь, ведет к убыванию потока $\gamma^{j, \text{вых}}$, который даже ниже значения для первой модели. Общее число инфцугов чуть больше, чем в сети с элементами ячеистой и древовидной структур, и составляет 1322 инфцуга.

Рис. 5.4

Рис. 5.5

В результате значение кибернетической мощности $P_{\text{ЦРС}}$ также несущественно превышает соответствующий показатель, представленный на рис. 5.4. Значение полной кибернетической мощности $P_{\text{полн}}$ совпадает с полученным для смешанной топологии. Это объясняется тем, что резкое увеличение $T_{\text{доп}}$ компенсируется уменьшением числа ОС в примитивной сети для рассматриваемой ортогональной модели. Кпд в смысле передачи информации для структуры «звезда» составляет 13,6 % и незначительно все же превосходит $\eta_{\text{ЦРС}}$ для сети смешанного типа.

Таким образом, можно сделать вывод, что представленные значения внешних потоков γ^b хотя и

обеспечивают выполнение условия непрерывности в процессе работы ЦРС, но не позволяют сети в достаточной степени проявить свойство хранения информации, что в первую очередь показывает отсутствие накоплений транзитного и выходного трафика. Поэтому в данных условиях обе модели ЦРС работают одинаково малоэффективно.

Вместе с тем можно заметить, что важную роль в определении значения $\eta_{\text{ЦРС}}$ играет значение N_{summar} , так как даже в случае меньшего значения γ^j при равенстве $P_{\text{полн}}$ для сети звездообразной структуры значение КПД оказывается выше. Для того чтобы оценить работу ЦРС, когда свойство хранения информации проявляется в полной мере, необходимо либо ввести искусственные накопления в УК заданием ограничения по временной задержке для каждой ОС примитивной сети, либо увеличивать значение интенсивности входного потока с учетом роста возникающих вследствие этого потерь.

Итак, для нахождения ограничения по временной задержке $T_{\text{доп}}$ использовался тензор путевых задержек $T_{\delta\delta}$ (5.6), компоненты которого определяются задержками в КЭ примитивной сети $T'_{\alpha\alpha}$ с учетом накоплений внешнего трафика, при помощи тензора преобразования длинных путей C_{δ}^{α} (5.5). В результате проведенных расчетов на разработанной аналитической модели в системе Maple V R5 модель ЦРС со структурой «звезда» оказалась более эффективной, хотя для обеих структур свойство хранения информации используется недостаточно.

При использовании второго подхода к определению допустимого времени нахождения инфцугов в исследуемой сети $T_{\text{доп}}$ в качестве исходных данных для расчета задается ограничение по задержке $T_{\text{доп1}}$ для каждой ОС (КЭ-УН) примитивной подразделенной сети [148]. Поэтому значения тензора n_b вычисляются не на основании величины транзитного и выходного трафика, а исходя из заданного $T_{\text{доп1}}$ и для транзитных УК составляют

$$n_b[i_{tr}] = (T_{\text{доп1}} - 1) C_{\text{sum_kan}}[i]; \quad (5.7)$$

для выходных узлов

$$n_b[i_{vix}] = (T_{\text{доп1}} - 1) C_{\text{vix_norm}}[i], \quad (5.8)$$

где $C_{\text{sum_kan}}[i]$ – суммарная пропускная способность КС (инфцуг/с), выходящих из каждого i -го УК; $C_{\text{vix_norm}}[i]$ – нормированная пропускная способность выходного канала (в направлении адресата), выраженная в единицах инфцуг/с. При этом учитывается, что для входных (не являющихся транзитными и имеющих внешний поток на передачу) УК $n_b = 1$, так как накопления, вызванные внешним потоком, учитываются в модели компонентами тензора кибернетических напряжений N_j . Число инфцугов в КС примитивной сети n_c задается также единичным набором, показывающим постоянную загруженность системы. Остальные данные для расчета остаются прежними.

Методика нахождения основных параметров сети аналогична первому подходу. Они определяются либо с использованием формул преобразования, либо из решения ортогональных уравнений (4.38), (4.39) и (4.36). При этом процедура нахождения расчетного ограничения по временной задержке $T_{\text{доп}}$ осуществляется на основе заданного значения $T_{\text{доп1}}$. С учетом значений n_b , определяемых выражениями (5.7) и (5.8), находятся компоненты тензора кибернетических проводимостей примитивной сети (производительности КС) $R^{\alpha\alpha}$, а его обращением – тензор временных задержек $T_{\alpha\alpha}$. Далее с использованием тензора n_{b1} , элементы которого $n_{b1}[i_{vix}] = N_b[i]$ позволяют учитывать задержки, вызванные накоплениями внешнего трафика в КЭ-УН, осуществляется модификация блока T_{bb} изменением первоначально заданных для входных УК значений $n_b = 1$ на реальные значения очередей входного потока. В результате получаем специальный составной тензор $T'_{\alpha\alpha}$ временных задержек в примитивной сети, который используется для вычисления тензора путевых задержек $T_{\delta\delta}$ по формуле преобразования (5.6). После этого методика определения допустимого времени нахождения сообщений в ЦРС $T_{\text{доп}}$ аналогична представленной выше для первого подхода. Как видно, значение $T_{\text{доп}}$ для исследуемой модели ЦРС зависит от компонентов тензора задержек примитивной сети $T'_{\alpha\alpha}$, т.е. определяется введенным ограничением по временной задержке для ОС. Следовательно, существенным отличием второго подхода к нахождению $T_{\text{доп}}$ является расчет его на основе требований к системе (в данном случае к задержкам в ОС примитивной сети), с использованием заданной структуры и формул преобразования. По-прежнему расчетное значение допустимого времени пребывания инфцугов в ЦРС используется только для нахождения полной кибернетической мощности (с учетом принятых условий функционирования ОС примитивной сети) и не обеспечивает ограничения числа инфцугов N_{summar} , когда задержка становится слишком высокой.

Для реализации расчета, в соответствии с выражениями (5.7) и (5.8), были внесены дополнения в

алгоритм на рис. 5.3 и разработана новая аналитическая модель. Ядро модели не меняется и основано на тензорной методологии. Блок-схема алгоритма оценки эффективности информационного обмена в ортогональных моделях ЦРС с заданными структурами при использовании второго подхода к расчету $T_{доп}$ представлена на рис. 5.6.

Принимая в качестве ограничения по задержке для каждого КЭ-УН ОС примитивной сети значение $T_{доп1} = 2$ с, с использованием разработанной модели осуществлен расчет ортогональных моделей ЦРС со структурой смешанного типа и топологией «звезда».

Для ортогональной модели ЦРС с элементами ячеистой и древовидной структур в результате расчета эффективности функционирования на основе тензорной методологии с использованием второго подхода к определению $T_{доп}$ были получены следующие показатели:

$$T_{доп} = 6,3 \text{ с}; \quad N_{summar} = 13\,807 \text{ инфцугов};$$

$$P_{ЦРС} = 0,72 \cdot 10^8 \text{ инфцуг}^2/\text{с};$$

$$P_{полн} = 0,13 \cdot 10^9 \text{ инфцуг}^2/\text{с};$$

$$\eta_{ЦРС} = 0,555 = 55,5 \text{ \%} .$$

На примере данной модели видно, что накопления, появившиеся в двух транзитных и двух выходных УК, приводят к резкому возрастанию кпд сети (в пять раз по сравнению с представленным на рис. 5.4).

Система в большей мере начинает использовать свойство хранения информации, выражающееся в значительном увеличении общего числа инфцугов и кибернетической мощности $P_{ЦРС}$ (более чем на порядок). Повышение значения $T_{доп}$ точно отражает введенное в качестве исходных данных $T_{доп1} = 2$ с. Действительно, для данной сети самые длинные маршруты передачи инфцугов содержат только один транзитный УК, поэтому общая путевая задержка складывается: из времени ожидания в очереди УН входного УК составляющей 2,3 с (именно это значение, определяемое наибольшей очередью в узле B (рис. 5.1), получено при использовании первого подхода, когда накопления в транзитных и выходных УК отсутствовали), а также суммы задержек транзитного и выходного узлов, равной 4 с в соответствии с исходными данными. Величина полной кибернетической мощности $P_{полн}$ при этом увеличивается незначительно. Таким образом, увеличение накоплений в транзитных и выходных УК для ортогональной модели ЦРС со смешанной структурой приводит к значительному скачку эффективности работы сети, поскольку она начинает проявлять свойства не только передачи, но и хранения информации.

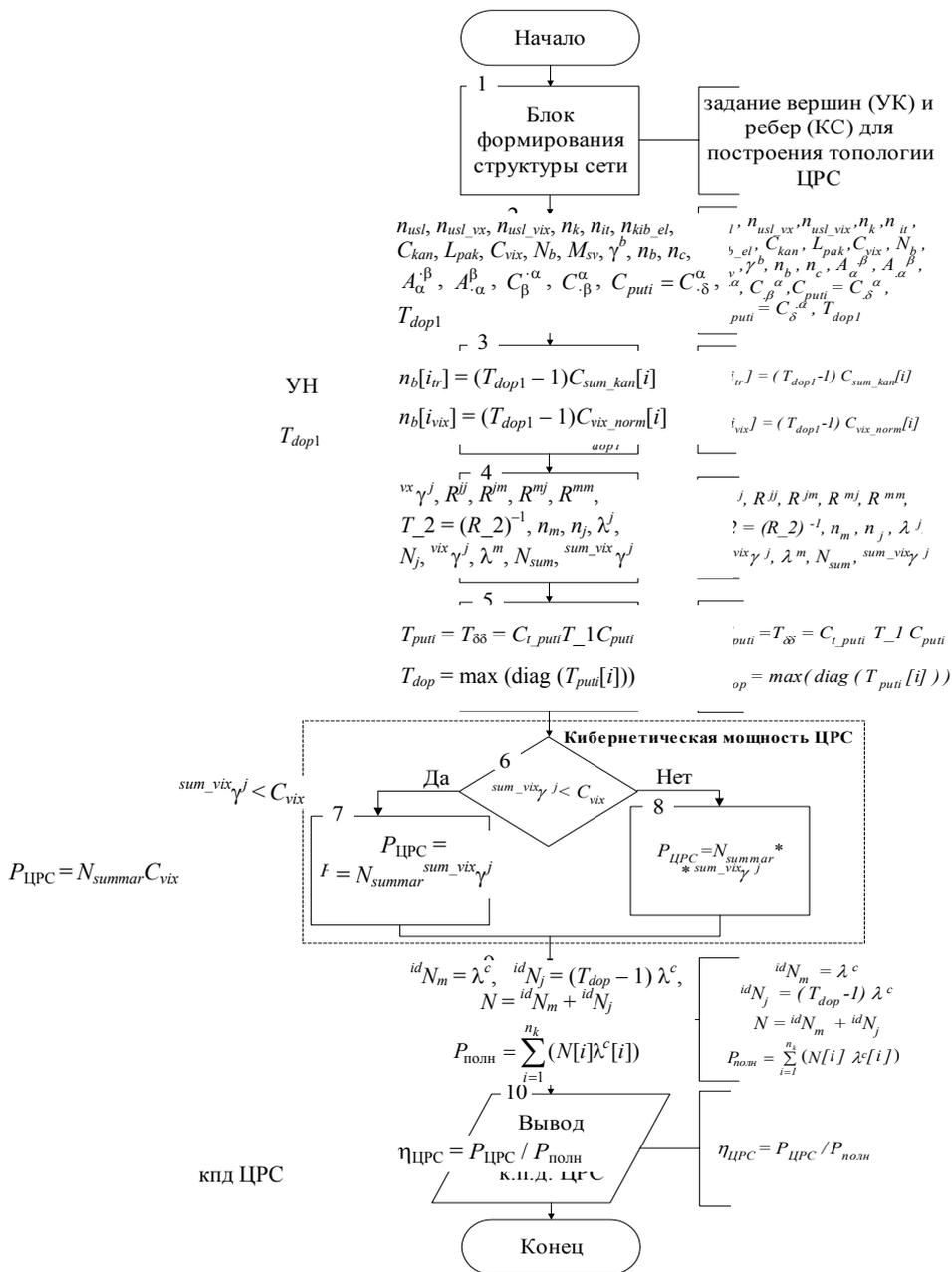


Рис. 5.6

Для обобщенной ортогональной модели ЦРС с топологией «звезда» в результате расчета ее с применением второго метода определения $T_{доп}$ получены следующие результаты:

$$T_{доп} = 6,59 \text{ с}; \quad N_{summar} = 7721 \text{ инфцуг};$$

$$P_{ЦРС} = 0,37 \cdot 10^8 \text{ инфцуг}^2/\text{с};$$

$$P_{полн} = 0,68 \cdot 10^8 \text{ инфцуг}^2/\text{с};$$

$$\eta_{ЦРС} = 0,556 = 55,6\% .$$

Так как транзитные УК для модели с данной структурой отсутствуют, то свойство хранения информации определяется очередью в выходном узле K (рис. 5.2). При введении в качестве дополнительного условия $T_{доп1} = 2$ с ее величина составляет $n_b = 12\,800$ инфцуг, что, естественно, сказывается на увеличении кибернетической мощности сети $P_{ЦРС}$ (общее число инфцугов в сети увеличивается почти в шесть раз и система работает в режиме хранения информации). При этом расчетное значение $T_{доп}$ при первом методе

(рис. 5.5), увеличивается только на 2 с, так как введенное условие для данной структуры затрагивает накопления только центрального УК.

В данном случае оно лишь на 0,3 с превышает значение, найденное для модели со смешанной топологией, поэтому при меньшем числе ОС примитивной сети гораздо ниже полная кибернетическая мощность сети $P_{\text{полн}}$, в результате чего значение $\eta_{\text{ЦРС}}$ для «звезды» увеличивается до 55,6 % по сравнению с данными, полученными при первом методе. Это еще раз подтверждает, что введенный обобщенный показатель эффективности информационного обмена ЦРС – кпд в смысле передачи информации характеризует информационную систему не только в процессе передачи, но и во время хранения инфцугов в очередях УН. Именно поэтому его значение одинаково чувствительно реагирует как на изменение производительности сети, так и на вариацию показателей, характеризующих свойство системы хранить информацию.

Проводя сравнение с данными, полученными при расчете ортогональной модели ЦРС смешанного типа, можно сделать следующие выводы:

1. Введение дополнительных накоплений в УК за счет ограничения по временной задержке для ОС $T_{\text{доп1}} = 2$ с показывает, что только при использовании второго метода расчета представленные ЦРС начинают в полной мере использовать свойство хранения информации ($\eta_{\text{ЦРС}} \uparrow$). При этом для смешанной сети накопления распределяются между четырьмя УК, тогда как в звездообразной структуре они сосредоточены в центральном УК.

2. Общее число инфцугов N_{summar} для сети смешанного типа почти в два раза больше, чем в топологии «звезда». Это объясняется тем (в соответствии с выражениями (5.7) и (5.8)), что суммарная пропускная способность каналов, выходящих из транзитных и выходных УК, в смешанной структуре в 2 раза превышает $C_{\text{вих}}$ для узла K в звездообразной сети (рис. 5.2). Однако кпд в смысле передачи информации для обеих моделей имеет примерно одинаковое значение (разница в 0,1 %) за счет величины $T_{\text{доп}}$, которая регулирует величину полной кибернетической мощности $P_{\text{полн}}$.

Итак, заданное $T_{\text{доп1}}$ оказывает существенное влияние на характеристики исследуемых ортогональных моделей ЦРС. В частности, необходимо отметить, что ограничение по задержке в ОС устанавливает возможные значения накоплений транзитного и выходного трафика n_b для каждого УН. Его введение в качестве исходных данных соответствует рассмотрению ЦРС в искусственно нагруженном состоянии ее работы, когда в очередях УН находится большое число инфцугов согласно значению $T_{\text{доп1}}$. В этом случае происходит отрыв от реальных показателей системы, когда очереди, вызванные движением транзитного трафика, определяются непосредственно величиной этого трафика и пропускными способностями КС. Однако рассмотрение загруженного состояния ЦРС является крайне важной задачей и представляет большой интерес для исследования. Кроме того, необходимо отметить, что, задавая различные значения $T_{\text{доп1}}$ в качестве ограничения для ОС примитивной сети, в результате расчетов с использованием тензоров преобразования путевых потоков $C_{\text{с}}^{\alpha}$ и $C_{\text{с}}^{\alpha}$ можно найти необходимое значение ограничения по задержке $T_{\text{доп}}$ для связной модели и провести оценку ее эффективности с использованием последней.

Однако ни первый, ни второй методы расчета информационной эффективности ЦРС не учитывают потери инфцугов, которые неизбежно возникают в процессе функционирования сети. Расчетные значения $T_{\text{доп}}$ используются только для нахождения полной кибернетической мощности и не обеспечивают ограничения по числу инфцугов в системе. Таким образом, представленные подходы моделируют работу ЦРС в идеальных условиях при бесконечно большом времени нахождения инфцугов в сети. В реальных условиях эксплуатации, вследствие значительных задержек инфцугов в УН УК и при отсутствии процедуры управления входным потоком, старение информации происходит очень быстро. Поэтому при расчете эффективности информационного обмена в ЦРС необходимо учитывать время жизни инфцугов, т.е. время, в течение которого информация еще не потеряла своего значения.

5.2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИФРОВОЙ РАДИОСЕТИ, ПРОВЕРКА ДАННЫМИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Модель ЦРС, позволяющая определять значения кпд в условиях высокого входного трафика представлена в работе [153]. Ее отличительной чертой является наличие процедуры, которая учитывает изменения накоплений инфцугов в УН. Полученные в результате моделирования характеристики приведены для звездообразной структуры на рис. 5.8, а, для смешанной топологии – на рис. 5.8, б. Как видно, зависимости имеют одномодальный характер с ярко выраженным максимумом, соответствующим набору входных потоков $\max \gamma^b[i_{vx}]$. При слабой входной нагрузке (начальном значении тензора ${}^0\gamma^b[i_{vx}]$) обе

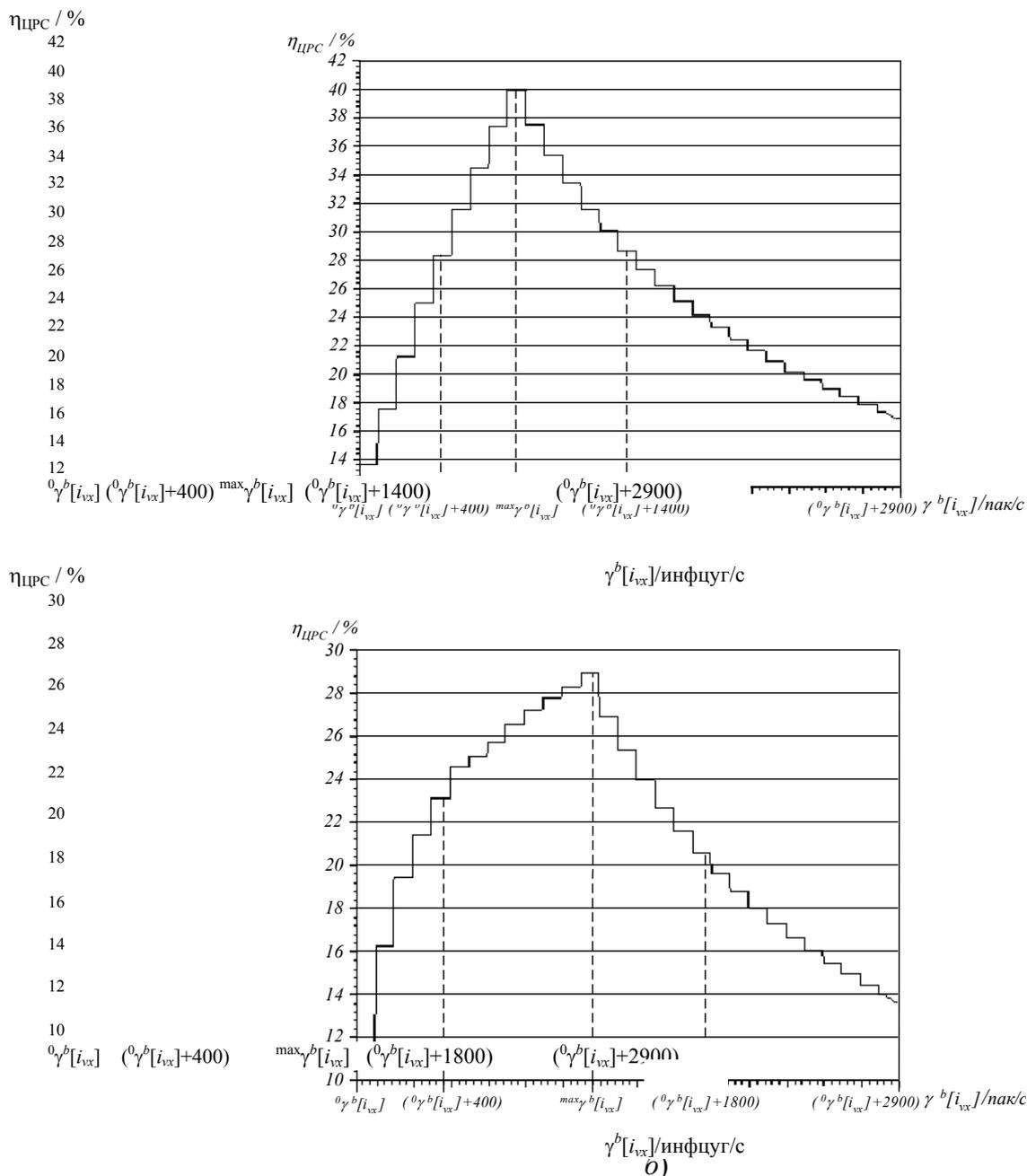


Рис. 5.8

сети работают малоэффективно. Это объясняется небольшим числом инфцугов в ЦРС $N_{\text{summar}}[t]$ и, как следствие, недостаточным использованием свойства хранения информации. Увеличение значения входного трафика ведет к повышению эффективности работы сети, выраженному в значении $\eta_{\text{ЦРС}}$, что соот-

ветствует участку возрастания функций на рис. 5.8, *a* и *б*. Когда значения компонент тензора внешней нагрузки достигают величин $\max \gamma^b[i_{vx}]$, накопления инфцугов в УН УК вызывают начало работы процедуры ограничения по временной задержке. При этом значении входного потока наибольшая задержка на длинном пути для исследуемых ЦРС, выраженная в расчетном времени $T_{\text{доп}}[t]$, становится практически равна введенному ограничению $T_{\text{доп}2} = 10$ с. В таких условиях системы продолжают работать без потерь и обеспечивают максимум кпд в смысле передачи информации. Однако уже на следующей итерации $\gamma^b[i_{vx}]$ начинает действовать ограничение по числу инфцугов ($T_{\text{доп}}[t] > T_{\text{доп}2}$) и эффективность работы с ростом потерь постепенно падает.

С целью проверки результатов расчетов аналитических моделей на основе тензорной методологии проведено имитационное моделирование ЦРС [149]. Учитывая простоту структур представленных выше ЦРС (рис. 5.1, 5.2) и алгоритмов их функционирования, для имитационного моделирования работы сетей применен специальный пакет моделирования дискретных систем GPSS/PC. Основная задача моделирования состояла в определении для ЦРС с заданными топологиями производительности сети, числа инфцугов и их времени нахождения в системе. Затем с использованием полученных статистических данных осуществлен аналитический расчет эффективности исследуемых сетей. Имитационные модели отражали работу ЦРС при следующих значениях входного потока:

- для топологии «звезда» использованы наборы: начальный ${}^0\gamma^b[i_{vx}]$ (рис. 5.5), $({}^0\gamma^b[i_{vx}] + 400)$, $({}^0\gamma^b[i_{vx}] + 800)$, $({}^0\gamma^b[i_{vx}] + 400)$, $({}^0\gamma^b[i_{vx}] + 2900)$;
- для смешанной структуры: начальный ${}^0\gamma^b[i_{vx}]$ (рис. 5.4), $({}^0\gamma^b[i_{vx}] + 400)$, $({}^0\gamma^b[i_{vx}] + 1200)$, $({}^0\gamma^b[i_{vx}] + 1800)$, $({}^0\gamma^b[i_{vx}] + 2900)$.

Если расположить эти величины на оси $\gamma^b[i_{vx}]$ зависимостей (рис. 5.8, *a* и *б*), полученных в результате аналитического моделирования на основе тензорной методологии, то видно, что они соответствуют точкам, которые определяют характер кривых эффективности. Так, первые наборы, используемые в имитационных моделях, соответствуют начальным точкам ${}^0\gamma^b[i_{vx}]$; вторые наборы определяют средние точки промежутков возрастания функции $\eta_{\text{ЦРС}}$; третьи – максимумы $\max \gamma^b[i_{vx}]$; четвертые – среднее значение кпд для промежутков убывания; пятые – крайние точки хвостов зависимостей. Имея значения $\eta_{\text{ЦРС}}$ в этих пяти точках можно легко построить кривые эффективности по данным имитационного моделирования. Сравнив результаты аналитических моделей с использованием тензорной методологии в характерных точках зависимостей $\eta_{\text{ЦРС}}(\gamma^b[i_{vx}])$ с параметрами, полученными при имитационном моделировании, можно судить в целом о корректности проведенных расчетов.

В табл. 5.1 представлены результаты расчета на основе тензорного подхода для ортогональных моделей ЦРС с заданными структурами и данных статистического исследования по пяти указанным выше характерным точкам.

ТАБЛИЦА 5.1

Тип структуры сети	Набор входных потоков	Результаты расчета аналитической модели, %	Результаты имитационного моделирования, %
«Звезда»	${}^0\gamma^b[i_{vx}]$	$\eta_{\text{ЦРС}1} = 13,6$	$\eta_{\text{ЦРС}1} = 14,4$
	${}^0\gamma^b[i_{vx}] + 400$	$\eta_{\text{ЦРС}2} = 28,4$	$\eta_{\text{ЦРС}2} = 28$
	${}^0\gamma^b[i_{vx}] + 800$	$\eta_{\text{ЦРС}3} = 40$	$\eta_{\text{ЦРС}3} = 40$
	${}^0\gamma^b[i_{vx}] + 1400$	$\eta_{\text{ЦРС}4} = 28,7$	$\eta_{\text{ЦРС}4} = 28,7$
	${}^0\gamma^b[i_{vx}] + 2900$	$\eta_{\text{ЦРС}5} = 16,9$	$\eta_{\text{ЦРС}5} = 16,9$

Смешанная	${}^0\gamma^b[i_{vx}]$	$\eta_{ЦРС1} = 11,1$	$\eta_{ЦРС1} = 10,3$
	${}^0\gamma^b[i_{vx}] + 400$	$\eta_{ЦРС2} = 23,1$	$\eta_{ЦРС2} = 22,8$
	${}^0\gamma^b[i_{vx}] + 800$	$\eta_{ЦРС3} = 29$	$\eta_{ЦРС3} = 30,4$
	${}^0\gamma^b[i_{vx}] + 1400$	$\eta_{ЦРС4} = 20,6$	$\eta_{ЦРС4} = 21,5$
	${}^0\gamma^b[i_{vx}] + 2900$	$\eta_{ЦРС5} = 13,6$	$\eta_{ЦРС5} = 14$

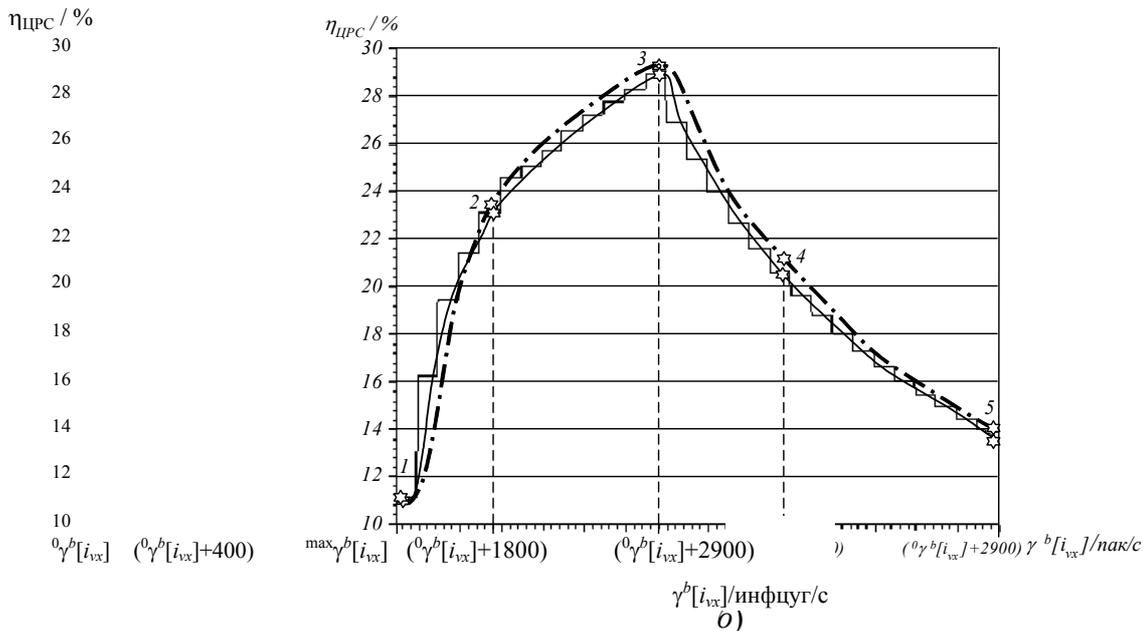
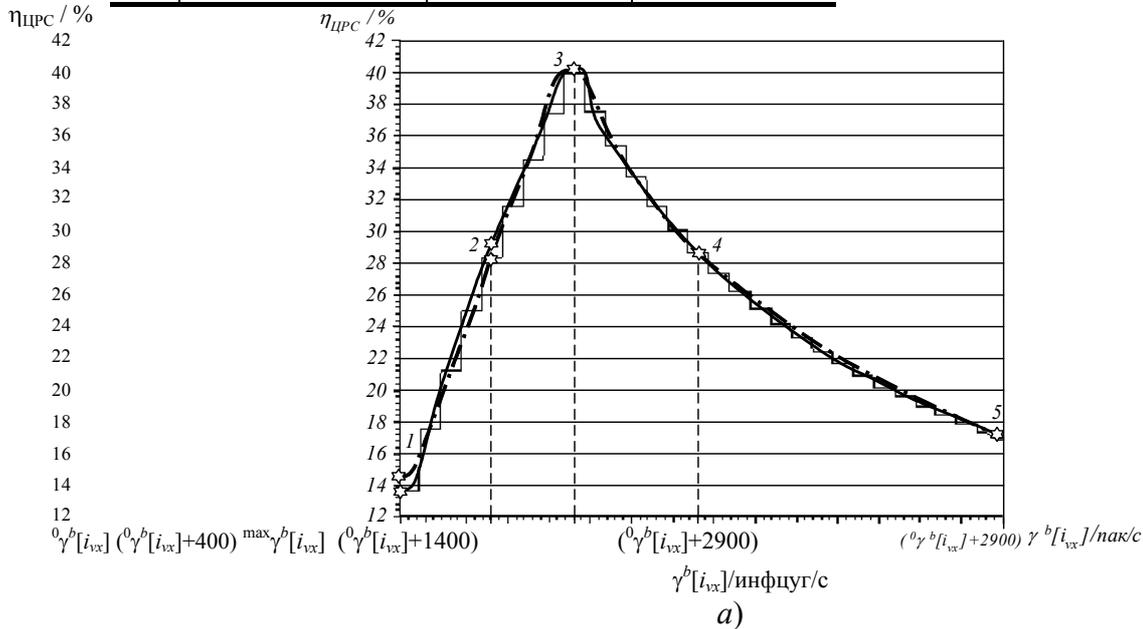


Рис. 5.9

На рис. 5.9, а и б (для ЦРС со структурой «звезда» и смешанного типа, соответственно) представлены графики зависимости КПД в смысле передачи информации от значений компонент тензора входных потоков $\gamma^b[i_{vx}]$ по данным имитационного моделирования (штрихпунктирные линии) и аппроксимированные по средним точкам итерационных интервалов кривые эффективности аналитических моделей, построенных на основе тензорной методологии (сплошные линии).

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что эффективность ЦРС в смысле передачи информации будет максимальной, когда исходя из загрузки сети, существует компромисс между скоростями передачи по КС и возможностью хранения информации в УН на основе требований

к временной задержке сообщений инфцугов. Поэтому подтвержденные данными имитационного моделирования кривые эффективности позволяют выбрать для каждой из исследуемых структур оптимальное значение входного трафика, при котором ЦРС будет обеспечивать наилучшее качество информационного обмена (например, для «звезды» $\max \gamma^b[i_{vx}] = \gamma^b[i_{vx}] + 800$ инфцуг/с, а для смешанной структуры $\max \gamma^b[i_{vx}] = \gamma^b[i_{vx}] + 1200$ инфцуг/с). Кроме того, на основании полученных результатов для обеспечения информационной эффективности ЦРС могут быть даны рекомендации по использованию той или иной топологии в зависимости от значения внешней нагрузки.

6. Геометрическое представление процессов в информационных сетях

Исследование окрестности точки состояния предельно нагруженной ИС предлагается проводить на основе тензорного анализа [133, 150, 151]. Так как он описывается при помощи математического аппарата дифференциальной геометрии (реализуется математической системой Maple V [152]), то очевидным является проведение геометризации информационных процессов в ИС. Это означает определение для сети пространств состояний КС и путей [153], систем координат в них, преобразования координат, выделение ко- и контравариантных геометрических объектов, построение формул их преобразования [133].

Представленные геометрические модели отображают информационные процессы канального и сетевого уровней ИС. Для случая, когда в системе имеет место взаимная энтропия КС (в реальных условиях она существует всегда), выявлен обобщенный параметр сети, определяемый квадратичной формой, – кибернетическая мощность. Представление информационного пространства КС сети в виде евклидова пространства и вложение в него криволинейных подпространств путей дает возможность описывать поведение нагруженной информационной сети переменными путевых потоков. Они позволяют проводить исследование окрестности точки состояния нагруженной сети, а следовательно, и динамики ее поведения. Дифференциальная зависимость состояний КС от количества информации в путях позволяет ввести понятие локальной маршрутизации на основе многомерной касательной плоскости в окрестности точки сопредельного состояния ИС. Ее «движение» (изменение) в путевом пространстве положено в основу тензорного анализа сетей в нагруженном состоянии.

6.1. Геометризация взаимного информационного влияния каналов связи

Представим информационные процессы модели ИС с последовательным ее усложнением. В настоящем параграфе будем использовать упрощенную модель многоканальной системы с взаимным информационным влиянием КС, в последующих – упрощенную модель ИС. Понятие «упрощенная модель» означает геометрическое отображение результатов взаимодействия информационных процессов без детализации вида их функций и протоколов реализации.

А. ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ ОТОБРАЖЕНИЕ ИДЕАЛИЗИРОВАННОЙ МОДЕЛИ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

Рассмотрим систему m стационарных, в смысле информационной загрузки, КС, которые в процессе передачи не оказывают взаимного влияния, т.е. привносимая ими взаимная энтропия отсутствует. Этим подразумевается возможность одновременной бесконфликтной передачи двух и более источников одному и тому же получателю. Кроме того, предположим, что любой объем информации, поступающий в каналы, переносится по ним с требуемой скоростью без интервала простоя, т.е. ожидания в УН (рассматриваются КС без памяти). Количество информации, которое передается в каждом i -м канале будем отображать соответствующими контравариантными компонентами x^i некоторой обобщенной величины, характеризующей суммарное количество передаваемой информации в системе. Полученную таким об-

разом модель многоканальной идеализированной системы без памяти можно представить в виде совокупности m независимых КС (рис. 6.1, а) с заданными значениями количества передаваемой информации x^i в единицу времени. Приведенная идеализация позволяет геометрически представить модель системы связи m -мерным собственно евклидовым пространством E_m (т.е. с индексом 0, так как инерционность передачи сигнала в канале не учитывается, а значит, отсутствует необходимость введения мнимой оси в пространстве) с прямоугольной и прямолинейной системой координат с центром O (рис. 6.1, б).

Введенная система координат отображает m -мерное информационное поле, где каждая его точка, с одной стороны, соответствует конкретному состоянию системы, с другой – характеризуясь координатами x^i , $i = 1, \dots, m$, определяет информационную загрузку каждого из m КС. Прямолинейность обусловлена линейным характером изменения количества информации в системе при изменении состояний каналов. Наличие центра O введенной системы координат характеризует начальную загрузку всех КС²⁵. Каждая i -я ось системы координат отождествляется с i -м КС, где градуированное с информационной дискретностью в один инфцуг значение – координата x^i – характеризует количество передаваемых инфцугов в канале. Орты e_i длиной в 1 инфцуг (единицей длины может служить общепринятая количественная мера информации – 1 бит или 1 байт, если обмен данными в системе осуществляется с указанной дискретностью), образуя ортонормированный репер в пространстве E_m , задают систему координат с фиксированным количеством КС, которая отображает пространство их состояний.

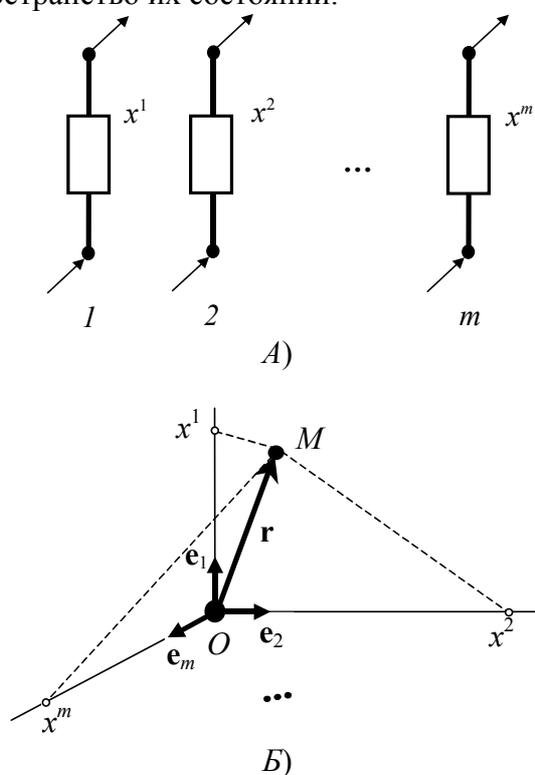


РИС. 6.1

Точка M_0 с координатами x^i в пространстве E_m соответствует определенному состоянию системы. Она отождествляется с концом абстрактного²⁶ радиуса-вектора $\mathbf{r} = \overline{OM_0}$. Проекции вектора \mathbf{r} на независимые оси системы координат в E_m отражают реальные физические величины, а именно количество передаваемых инфцугов в соответствующих каналах. Вектор \mathbf{r} в рассматриваемой системе координат определяется очевидным образом:

²⁵ В случае, если часть ресурса КС учитывается на служебную информацию, то центр – точка O этого пространства – будет располагаться не в нуле.

²⁶ Абстрактность радиуса-вектора легко поясняется на проведении аналогии передаваемых инфцугов по различным маршрутам и движущихся автомобилей по различным путям городского цикла. Векторы скоростей потоков автомобилей на различных дорогах (например, у перекрестков) являются реальными величинами, а результирующий вектор скоростей – абстрактная величина.

$$\mathbf{r} = \sum_{i=1}^m x^i \mathbf{e}_i \equiv x^i \mathbf{e}_i. \quad (6.1)$$

Увеличения количества информации в КС, при отсутствующем ограничении к их пропускным способностям, в общем случае, будут соответствовать новой условной точке M_1 в пространстве E_m с декартовыми координатами y^1, \dots, y^m . Расстояние между точками M_0 и M_1 , очевидно, определится изменением количества передаваемой информации во всех m КС и может быть выражено для модели с ортогональными векторами через величину:

$$\Delta r = |M_0 M_1| = \sqrt{\sum_{i=1}^m (x^i - y^i)^2}, \quad i = 1, \dots, m. \quad (6.2)$$

Наличие расстояния между точками состояния системы, определяемого с помощью (6.2), для предварительно рассмотренной модели идеализированной системы связи позволяет в геометрическом смысле отметить следующие аспекты:

1. Возможность определения в информационной системе характеристики изменения ее состояния в виде длин (6.2) означает наличие в отображаемом сетью m -мерном центроаффинном пространстве метрики с единицей дискретизации, равной одному инфцугу. В частности, идеализированная модель с ортогональными КС и передачами без задержек отображается m -мерным евклидовым пространством с прямоугольной системой координат.

2. В основе метрики любого линейного пространства лежит понятие скалярного произведения векторов. Это означает, что определение расстояния между точками состояния системы можно производить не только в прямоугольной, но и в любой косоугольной системе координат, которая характеризует уже неортогональные КС. В последнем случае билинейная функция – скалярное произведение векторов – составляет основу геометрического представления процессов информационного взаимодействия любой системы, в которой каналы обладают взаимной энтропией.

Б. МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ СВЯЗИ С МЕЖКАНАЛЬНОЙ ЭНТРОПИЕЙ

ПУСТЬ В РАССМАТРИВАЕМОЙ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ СВЯЗИ СУЩЕСТВУЕТ МЕЖКАНАЛЬНАЯ ЭНТРОПИЯ. В ЭТОМ СЛУЧАЕ ЧАСТЬ РЕСУРСА КАЖДОГО КС ИСПОЛЬЗУЕТСЯ НА ВЗАИМНУЮ ИНФОРМАЦИЮ И ПОЭТОМУ ПЕРЕДАЧА СОБСТВЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ В КАНАЛАХ ОГРАНИЧИВАЕТСЯ. В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗНИКАЕТ НЕОБХОДИМОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КС С ПАМЯТЬЮ. МОДЕЛЬ ТАКОЙ СИСТЕМЫ ПОКАЗАНА НА РИС. 6.2, А.

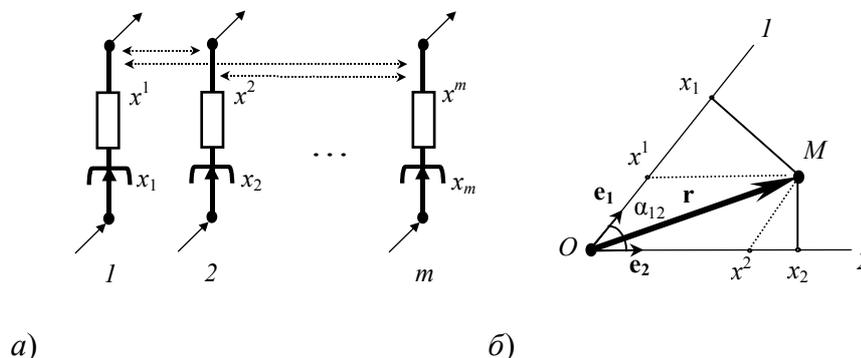


РИС. 6.2

Наличие памяти приводит к необходимости использования для системы обобщенной характеристики (в отличие от параметра пропускной способности, или производительности), которая должна отображать дополнительное свойство системы – хранение информации. Для ее определения проведем геометрическую интерпретацию информационного взаимного влияния КС. Аналогично понятию корреля-

ции КС, представим взаимное информационное влияние каналов в виде обычного коэффициента – скалярной величины. Если они в процессе передачи информации абсолютно не мешают друг другу, т.е. являются ортогональными, то взаимное влияние (как и корреляция) равно нулю. В противоположном случае, когда КС используют единый ресурс одновременно, оказывая таким образом взаимоисключающее воздействие, коэффициент взаимного информационного влияния, очевидно, равен единице.

Исходя из этого, взаимное информационное влияние определим в виде результата скалярного произведения векторов (КС). В этом случае коэффициент взаимного влияния каналов непосредственно определяется косинусом угла между единичными векторами (ортами) с общим началом, который соответствует взаимному влиянию инфцуга (информационного дискрета) одного канала на инфцуг другого канала.

РАССМОТРИМ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДВУХКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ С ВЗАИМНОЙ ЭНТРОПИЕЙ. КАНАЛЫ СВЯЗИ, ЯВЛЯЯСЬ НЕОРТОГОНАЛЬНЫМИ, ОБРАЗУЮТ КОСОУГОЛЬНУЮ СИСТЕМУ КООРДИНАТ. КАК ВИДНО (РИС. 6.2, Б), ПОМИМО КОНТРАВАРИАНТНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ КОЛИЧЕСТВА ИНФОРМАЦИИ X^I – ЕЕ ПЕРЕДАВАЕМОЙ ЧАСТИ, ИМЕЮТ МЕСТО КОВАРИАНТНЫЕ X_i , КОТОРЫЕ, ЯВЛЯЯСЬ ОРТОГОНАЛЬНЫМИ КОМПОНЕНТАМИ R, ХАРАКТЕРИЗУЮТ ОБЩЕЕ КОЛИЧЕСТВО ИНФОРМАЦИИ В КС, В ТОМ ЧИСЛЕ ОЖИДАЮЩЕЕ ПЕРЕДАЧИ ИЗ-ЗА СУЩЕСТВУЮЩИХ ОГРАНИЧЕНИЙ. СВЯЗЬ КО- И КОНТРАВАРИАНТНЫХ КОМПОНЕНТ В ДВУМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ МОЖНО ОПРЕДЕЛИТЬ, ИСПОЛЬЗУЯ ПОНЯТИЕ СКАЛЯРНОГО ПРОИЗВЕДЕНИЯ²⁷:

$$\begin{aligned} x_1 &= \mathbf{e}_1 \mathbf{e}_1 x^1 + \mathbf{e}_1 \mathbf{e}_2 x^2 = x^1 + x^2 \cos \alpha_{12}; \\ x_2 &= \mathbf{e}_2 \mathbf{e}_1 x^1 + \mathbf{e}_2 \mathbf{e}_2 x^2 = x^1 \cos \alpha_{21} + x^2 \end{aligned} \quad (6.3')$$

ИЛИ В ТЕНЗОРНОЙ ФОРМЕ

$$x_i = \mathbf{e}_i \mathbf{e}_j x^j = g_{ij} x^j, \quad i, j = 1, 2, \quad (6.3)$$

ГДЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРИ КОНТРАВАРИАНТНЫХ КОМПОНЕНТАХ ОБРАЗУЮТ ТАК НАЗЫВАЕМУЮ ФУНДАМЕНТАЛЬНУЮ МАТРИЦУ С КОМПОНЕНТАМИ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИМИ ВЗАИМНОЕ ИНФОРМАЦИОННОЕ ВЛИЯНИЕ КС.

В. МЕТРИЧЕСКИЙ ТЕНЗОР ПРОСТРАНСТВА СОСТОЯНИЙ КАНАЛОВ СВЯЗИ

ВСЕВОЗМОЖНАЯ СОВОКУПНОСТЬ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ МАТРИЦ G_{IJ} СИСТЕМЫ СВЯЗИ С ФИКСИРОВАННЫМ ЧИСЛОМ КС ($I, J = 1, \dots, M$) ОБРАЗУЕТ МЕТРИЧЕСКИЙ ТЕНЗОР ПРОСТРАНСТВА СОСТОЯНИЙ КС СООТВЕТСТВУЮЩЕЙ РАЗМЕРНОСТИ:

$$g_{\alpha}^{ij} = \begin{pmatrix} 1 & \cos \alpha_{12} & \dots & \cos \alpha_{1m} \\ \cos \alpha_{21} & 1 & \dots & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \cos \alpha_{m1} & \cos \alpha_{m2} & \dots & 1 \end{pmatrix}, \quad (6.4)$$

ГДЕ ИНДЕКС α ВНИЗУ ХАРАКТЕРИЗУЕТ ПРИНАДЛЕЖНОСТЬ МАТРИЦЫ К ПРОСТРАНСТВУ СОСТОЯНИЙ КС.

ЗАМЕТИМ (ДЛЯ ДВУХКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ), В ПЕРВОМ КАНАЛЕ, СОГЛАСНО (6.3'), К ПЕРЕДАВАЕМОМУ КОЛИЧЕСТВУ ИНФОРМАЦИИ X^1 ИЗ-ЗА ОДНОВРЕМЕННОЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ВО ВТОРОМ КАНАЛЕ ДОБАВЛЯЕТСЯ КОЛИЧЕСТВО ИНФОРМАЦИИ $X^2 \cos \alpha_{12}$. ЭТА СОСТАВЛЯЮЩАЯ ОБУСЛОВЛЕНА «КОНФЛИКТНОСТЬЮ» КАНАЛОВ ИЛИ ВЗАИМНЫМ ИНФОРМАЦИОННЫМ ВЛИЯНИЕМ И МОЖЕТ БЫТЬ ОХА-

²⁷Индексы при α указывают номера информационно влияющих друг на друга КС.

РАКТЕРИЗОВАНА ВЕЛИЧИНОЙ – ПРИВНОСИМОЙ ВЗАИМНОЙ ЭНТРОПИЕЙ. ЧЕМ ВЫШЕ ТАКОЕ ВЛИЯНИЕ СО СТОРОНЫ ВТОРОГО КС, ТЕМ БОЛЬШЕ НЕОБХОДИМ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ РЕСУРС ПЕРВОМУ КАНАЛУ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ. ЕСЛИ ТАКОЙ ВОЗМОЖНОСТИ НЕТ, Т.Е. КС ИМЕЮТ ОГРАНИЧЕННУЮ ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ, ТО, ОЧЕВИДНО, НЕОБХОДИМО ИСПОЛЬЗОВАТЬ УН ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ. АНАЛОГИЧНО, ВО ВТОРОМ КАНАЛЕ, ПОМИМО КОЛИЧЕСТВА ИНФЦУГОВ X^2 , ИЗ-ЗА «МЕШАЮЩЕЙ» ПЕРЕДАЧИ В ПЕРВОМ КС ИМЕЕТ МЕСТО ВЗАИМНАЯ ЭНТРОПИЯ В ВИДЕ ДОБАВКИ $X^1 \cos \alpha_{21}$. В ОТЛИЧИЕ ОТ КОНТРАВАРИАНТНЫХ КОМПОНЕНТ, КОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИЗУЮТ КОЛИЧЕСТВО ПЕРЕДАВАЕМОЙ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМЕ, КОВАРИАНТНЫЕ КОМПОНЕНТЫ, КАК ВИДНО ИЗ (6.3), ХАРАКТЕРИЗУЮТ ВСЕ КОЛИЧЕСТВО ИНФОРМАЦИИ, НАХОДЯЩЕЕСЯ В КАНАЛАХ, В ТОМ ЧИСЛЕ ТО, КОТОРОЕ ВЫНУЖДЕННО ОЖИДАЕТ В УН ДАЛЬНЕЙШЕЙ ПЕРЕДАЧИ.

ИТАК, ВСЕ КС, ИНФОРМАЦИОННО ВОЗДЕЙСТВУЮЩИЕ НА НЕКОТОРЫЙ l -Й КАНАЛ, ВНОСЯТ ЧЕРЕЗ КОЭФФИЦИЕНТЫ ДОПОЛНИТЕЛЬНУЮ ИНФОРМАЦИЮ (ВЗАИМНУЮ ЭНТРОПИЮ), В РЕЗУЛЬТАТЕ ЧЕГО ИЗ-ЗА ОГРАНИЧЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ l -ГО КАНАЛА ЧАСТЬ ИНФОРМАЦИИ ВЫНУЖДЕНА ОЖИДАТЬ В УН. ТАК КАК КОВАРИАНТНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ХАРАКТЕРИЗУЮТ ВСЕ КОЛИЧЕСТВО ИНФОРМАЦИИ В СООТВЕТСТВУЮЩИХ КАНАЛАХ, ИХ МОЖНО ПОЯСНИТЬ, ВЫРАЗИВ РАДИУС-ВЕКТОР R ЧЕРЕЗ ВЕКТОРЫ РЕПЕРА СИСТЕМЫ КООРДИНАТ ПРОСТРАНСТВА КС:

$$x_i = re_i . \quad (6.5)$$

Невырожденность пространства состояний КС для системы связи очевидна, так как, во-первых, приращение количества информации в любом КС приведет к изменению состояния системы в целом; во-вторых, любые два неортогональных КС системы оказывают взаимное информационное влияние друг на друга, что может быть отражено ненулевым результатом скалярного произведения соответствующих векторов. Исходя из этого, можно записать

$$\det g_{ij} \neq 0 . \quad (6.6)$$

Наряду с основным репером рассматриваемого информационного пространства, имеет место ортогональный ему репер $\{e^1, \dots, e^m\}$, который в общем случае также имеет косоугольный характер. В отличие от единичных векторов e_i , «построение» которых зависит от информационного влияния КС, орты e^i в ортогональной системе координат могут быть получены из ковариантного метрического тензора g_{ij} путем его обращения (транспонирование из-за симметричности последнего не влияет на результат).

Наличие ко- и контравариантных метрических тензоров позволяет изменять верхние индексы на нижние. Другими словами, имеется возможность производить расчеты передаваемой и хранимой информации. Например, при наличии количества передаваемой информации в КС и степени информационного влияния передающейся информации можно определить накопления в УН:

$$x_i = g_{ij} x^j, \quad i, j = 1, \dots, m . \quad (6.7)$$

Выражение (6.7) легко поясняет, например, что количество инфцугов в УН i -го узла коммутации зависит от скоростей передачи информации во входящих и выходящих из него КС.

С другой стороны, используя выражение

$$x^i = g^{ij} x_j, \quad (6.8)$$

можно определить суммарное количество передаваемой информации в i -м КС, поступающей из всех УН (КС), подключенных к его входу и воздействующих взаимной информацией других КС. При этом дози-

рование информации из каждого УН определяется компонентами контравариантного метрического тензора g_{ij} , который может быть получен (исходя из условия (6.6)) путем обращения ковариантного тензора (транспонирование не требуется, так как он является симметричным).

Известно, что аффинные координаты в линейном пространстве могут быть представлены относительно различных систем координат. Это означает, что одно и то же состояние системы может соответствовать различным взаимным влияниям КС и, следовательно, перераспределенной загрузке. Итак, представим другую информационную зависимость КС новым репером $e_{i'}, \dots, e_{m'}$, введя в нумерации штриховые индексы. Так как каждый вектор-орт нового репера может быть разложен по векторам с использованием различных коэффициентов: $e_{i'} = A_{i'}^1 e_1 + \dots + A_{i'}^m e_m$, то компоненты метрического тензора в старой и новой системах координат будут связаны соотношением

$$g_{i'j'} = e_{i'} \cdot e_{j'} = A_{i'}^i A_{j'}^j e_i \cdot e_j = A_{i'}^i A_{j'}^j g_{ij}. \quad (6.9)$$

Из-за взаимного отображения реперов имеет место обратное преобразование

$$g_{ij} = A_i^{i'} A_j^{j'} g_{i'j'}. \quad (6.10)$$

Приведенные выражения (6.9) и (6.10) для цифровой многоканальной системы связи означают следующее: на основе определенных компонент метрических ко- и контравариантных тензоров решение задачи передачи информации, ее распределение по каналам автоматически предполагает решение задачи множественного доступа. При этом вычисляются накопления в УН и загрузка КС.

Косоугольная система координат имеет место также, если отсутствует взаимная энтропия в каналах, но вместе с этим существуют ограничения на пропускные способности и поэтому часть инфцугов вынуждена ожидать в УН. Косинусы углов будут существовать между входящими в узел коммутации КС и выходящими, которые оказываются перегруженными в результате чрезмерной нагрузки со стороны первых.

Метрический тензор имеет место и для ортогональной модели системы связи, однако, в этом случае его координаты отображаются единичной матрицей.

Г. Определение обобщенной характеристики системы связи с межканальной энтропией

ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБОБЩЕННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С ПАМЯТЬЮ ВОСПОЛЬЗУЕМСЯ ВЫРАЖЕНИЕМ (6.3). УМНОЖИМ ЕГО ПРАВУЮ И ЛЕВУЮ ЧАСТИ НА КОНТРАВАРИАНТНЫЕ КОМПОНЕНТЫ:

$$x_i x^i = g_{ij} x^j x^i, \quad i, j = 1, 2. \quad (6.11)$$

В результате свертывания по общему индексу в левой части получим скаляр, а в правой – квадратичную форму. Так как ковариантная компонента соответствует всему количеству находящейся в канале информации, а контравариантная – только той ее части, которая находится в режиме передачи, то, с учетом рассмотрения последней в единицу времени, полученный скаляр будет характеризовать кибернетическую мощность системы [55]. Одновременно с этим известно [48], что квадрат длины вектора \mathbf{r} (в нашем случае он характеризует состояние системы) в m -мерном евклидовом пространстве определяется квадратичной формой:

$$r^2 = g_{ij} x^i x^j, \quad i, j = 1, \dots, m. \quad (6.12)$$

В связи с этим можно сделать следующий вывод: информационная модель системы связи с памятью геометрически может быть представлена в общем случае косоугольной системой координат, в которой ее обобщенная характеристика – кибернетическая мощность – определяется аналитически квадратичной формой и геометрически – длиной радиуса-вектора \mathbf{r} :

$$P_{\text{ИС}} \equiv x_i x^i = g_{ij} x^i x^j = r^2. \quad (6.13)$$

ЗНАЧЕНИЕ ОБОБЩЕННОГО ПАРАМЕТРА, СОГЛАСНО (6.13), ПОЛУЧАЕТСЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ СУММИРОВАНИЯ ПО ВСЕМ КАНАЛАМ ПРОИЗВЕДЕНИЙ КОЛИЧЕСТВА ИНФОРМАЦИИ, НАХОДЯЩЕЙСЯ В КС С ПАМЯТЬЮ, В ТОМ ЧИСЛЕ В РЕЖИМЕ ОЖИДАНИЯ, НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ КАНАЛА. ТАК КАК КОЭФФИЦИЕНТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ МАТРИЦЫ (6.4) ЕСТЬ КОСИНУСЫ УГЛОВ, ТО ПРАВАЯ ЧАСТЬ (6.12) ЕСТЬ СУММА ВСЕВОЗМОЖНЫХ СКАЛЯРНЫХ ПРОИЗВЕДЕНИЙ ВЕКТОРОВ. ЭТО ОЗНАЧАЕТ, ЧТО ВЕЛИЧИНА r^2 , СООТВЕТСТВУЮЩАЯ КИБЕРНЕТИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ СИСТЕМЫ, ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ СКАЛЯРНЫМ ПРОИЗВЕДЕНИЕМ I -Х ВЕКТОРОВ, ОТОЖДЕСТВЛЯЕМЫХ С КС:

$$\mathbf{x}^i = x^i \mathbf{e}_i,$$

где суммирование по индексам i в правой части, в отличие от (6.1), не производится.

Когда состояния КС меняются и одновременно с этим имеет место межканальная энтропия, необходимо в каждом КС учитывать дополнительное количество информации в виде приращения кибернетической мощности:

$$dr^2 = g_{ij} dx^i dx^j. \quad (6.14)$$

ДЛЯ СИСТЕМЫ СВЯЗИ, В КОТОРОЙ ОТСУТСТВУЕТ МЕЖКАНАЛЬНАЯ ЭНТРОПИЯ, ОБОБЩЕННЫЙ ПАРАМЕТР ТАКЖЕ ПРИМЕНИМ. В ЭТОМ СЛУЧАЕ ЧИСЛО НАХОДЯЩИХСЯ В КС ИНФЦУГОВ РАВНО ЧИСЛУ ПЕРЕДАВАЕМЫХ. ТО ЖЕ БУДЕТ И ДЛЯ ПРИРАЩЕНИЯ КИБЕРНЕТИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ:

$$dr^2 = \sum_{i=1}^m (dx^i)^2. \quad (6.15)$$

ПОДВОДЯ ИТОГИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ МОДЕЛИ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ С ПАМЯТЬЮ, ВЫДЕЛИМ СЛЕДУЮЩИЕ ЕЕ ОСОБЕННОСТИ:

1. ВЗАИМНАЯ ЭНТРОПИЯ КАНАЛОВ, ПЕРЕДАЮЩИХ ИНФЦУГИ, ПРЕДПОЛАГАЕТ ДОПОЛНИТЕЛЬНУЮ ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ. В СИЛУ ЕЕ ОГРАНИЧЕННОГО ЗНАЧЕНИЯ ЧАСТЬ КОЛИЧЕСТВА ИНФОРМАЦИИ ВЫНУЖДЕННО ОЖИДАЕТ СВОЕЙ ПЕРЕДАЧИ В УН. ЭТО ОЗНАЧАЕТ, ЧТО КОЛИЧЕСТВО ИНФОРМАЦИИ ИЗ-ЗА РАЗЛИЧНЫХ СОСТОЯНИЙ НАХОЖДЕНИЯ – В РЕЖИМЕ ПЕРЕДАЧИ ИЛИ В РЕЖИМЕ ХРАНЕНИЯ – РАЗДЕЛЯЕТСЯ НА КОНТРАВариАНТНЫЕ И КОВАРИАНТНЫЕ КОМПОНЕНТЫ СООТВЕТСТВЕННО.

2. Обобщенной характеристикой многоканальной системы с памятью является кибернетическая мощность. Она, обладая квадратичной формой, есть реальная и измеримая величина, зависящая от скорости передачи информации по КС и межканальной энтропии. Ее обобщенный характер отображает основные свойства системы – передачу и хранение информации.

3. В основу определения обобщенного параметра положено скалярное произведение векторов – передаваемой информации в каналах. Метрический тензор пространства КС позволяет вычислить возможные значения кибернетической мощности системы связи. Его компоненты – косинусы углов между единичными векторами (ортами системы координат) – характеризуют взаимную энтропию на один инфцуг передаваемой каналами информации.

Ненулевые значения угловых коэффициентов соответствуют существующей степени взаимного влияния КС, и поэтому они отображают необходимую степень увеличения ресурса системы, причем не только ресурса КС для передачи трафика, но и ресурса УН для количества задержанных инфцугов в системе.

Выполнение условия невырожденности метрики в косоугольном пространстве для ИС является очевидным, так как невырожденность пространства означает информационную зависимость ненулевых, неортогональных i -го и j -го КС, что в геометрических терминах соответствует неравенству нулю ска-

6.2. УСЛОВИЯ ДИФФЕРЕНЦИРУЕМОСТИ В ОКРЕСТНОСТИ ТОЧКИ СОСТОЯНИЯ ПРЕДЕЛЬНО НАГРУЖЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СЕТИ

Усложним модель системы связи – соединим m каналов с памятью в коммуникационную сеть, т.е. представим таким образом модель ИС. Примем в ней режим передачи с промежуточным хранением инфцугов.

В геометрической модели ИС для рассмотрения процессов передачи информации в дальнейшем в ранее рассмотренное пространство E_m будет вложено подпространство с криволинейными системами координат. Это позволит перейти от переменных состояний КС и УН к переменным путевых потоков и, как следствие, проводить с помощью последних исследования предельно нагруженной ИС в окрестности точки ее состояния. Такое состояние сети, характеризующееся значениями количества инфцугов в КС и УН (в нашем случае соответствующее конкретной точке M_0), должно быть дифференцируемым. Выполнение условия дифференцируемости функции состояний сети позволит на основе использования тензорного анализа определить динамику поведения сети в окрестности точки M_0 , взаимное информационное влияние путей в условиях высокой загрузки сети.

Остановимся на условиях функционирования информационной сети, обеспечивающих указанное требование:

1. Сопредельная загруженность ИС.

Необходимость исследования в окрестности точки M_0 вызвана следующим обстоятельством. Известная [2] двухпараметрическая модель зависимости средней временной задержки \bar{T} от входного трафика $\gamma_{\text{вх}}$ указывает на наличие в ней порогового значения $\gamma_{\text{вх}}^*$. Если входная нагрузка слабая, т.е. $\gamma_{\text{вх}} < \gamma_{\text{вх}}^*$, значение временной задержки \bar{T} минимально и практически не меняется. В этом случае сетевые задачи могут быть сведены к задачам на графе, в частности к определению кратчайших путей на нем, например методом минимальных сечений [2]. При $\gamma_{\text{вх}} > \gamma_{\text{вх}}^*$, т.е. чрезмерно высоком входном трафике, временная задержка неограниченно растет из-за перегрузки одного или нескольких КС. Это условие соответствует нежелательной устойчивой точке (сбою) функционирования сети²⁸. В связи с этим представляет интерес область значений трафика, когда $\gamma_{\text{вх}} \approx \gamma_{\text{вх}}^*$. В этом случае состояние нагруженной сети будем называть сопредельным, т.е. условно близким к предельному значению, после которого наступает область перегрузки сети. Очевидно, при этом информация по КС передается непрерывно с коэффициентом использования $\rho = 1$, а УН узлов коммутации заполнены ожидающими передачи инфцугами. Такая ситуация в сети из-за особого значения процедур распределения потоков по КС и управления входным трафиком является принципиально важной для определения ее возможностей по передаче пользовательской информации. В связи с этим именно такое состояние сети является объектом дальнейшего исследования.

2. Невырожденность пространства для ИС.

Это условие означает, во-первых, выполнение требования к связности сети, т.е. все КС должны быть соединены в единую структуру; во-вторых, каждый элемент этой структуры должен находиться в загруженном состоянии. Если последнее вытекает из условия сопредельной загруженности сети связи, то первое требование означает рассмотрение единого и полномерного пространства, в котором рассматривается состояние ИС. Невыполнение условия связности приводит к вырождению пространства в совокупность не связанных между собой подпространств, где понятие «состояние» для сети в целом не имеет смысла.

3. Линейная аппроксимация функции изменения состояния КС.

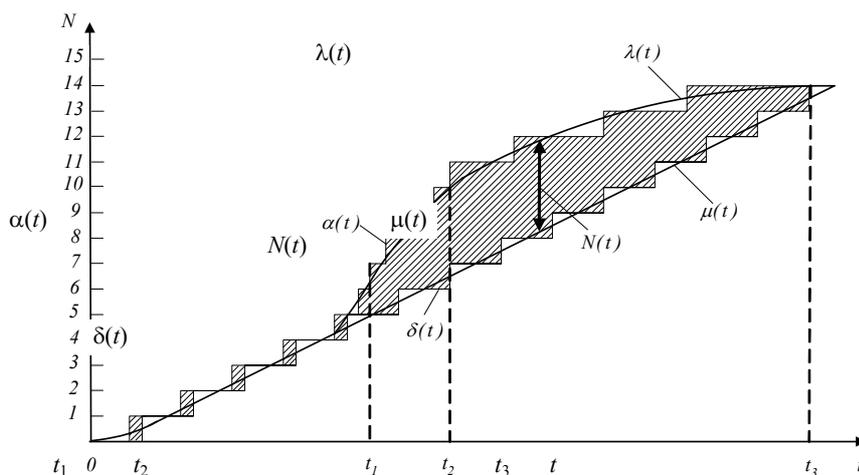
При рассмотрении пространства состояний идеализированной модели указывалось, что его дискретность составляет один инфцуг. Исходя из этого изменение состояния в интервале рассмотрения, большем длительности одного инфцуга, в любом КС с памятью представляется ступенчатой функцией (рис. 6.3).

²⁸ Для недопущения такого состояния используются алгоритмы управления входным трафиком.

Предположим, с одной стороны, условие сопредельной загруженности сети инфцугами, с другой – конечное время обслуживания ОС каждого инфцуга. Опираясь на свойство инертности самой системы в процессе обработки, можно утверждать, что кривая, аппроксимирующая изменения состояния в окрестности точки M_0 , не может носить

▲

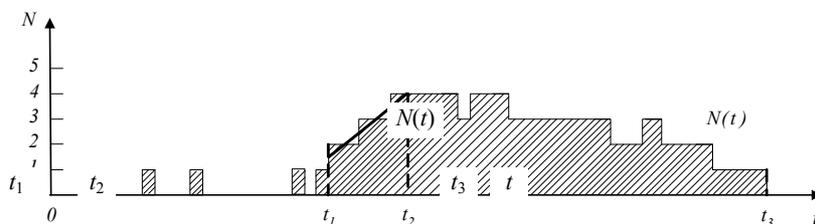
15
14
13
12
11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0



а)

▲

5
4
3
2
1
0



б)

Рис. 6.3

разрывный характер. Это показано на рис. 6.3 на временном интервале $[t_1, t_3]$. Число поступающих $\alpha(t)$ инфцугов и уходящих $\delta(t)$ из одноканальной системы на интервале $(0, t)$ дискретно. Как видно, наряду с неменяющейся производительностью $\mu(t) = \mu$ интенсивность входного потока на участке $[t_1, t_2]$ также можно предположить постоянной $\lambda(t) \approx \lambda$. Если принять, что состояние одноканальной системы к моменту времени t_1 равно n , то новое состояние системы n' – в момент t_2 – можно определить:

$$n' = n + (\lambda - \mu)\Delta t, \quad \Delta t = [t_1, t_2].$$

Следовательно, непрерывность функции состояния сети имеет место в интервале Δt , если выполняется условие: $n' > 0$. Это соответствует нагруженному состоянию ИС, когда все КС заняты непрерывной передачей инфцугов и каждое УН ими загружено. Из рис. 6.3, б видно: в рассматриваемом интервале Δt изменение состояния сети можно аппроксимировать линейной функцией.

Обобщая рассуждения, сформулируем утверждение: любая аппроксимирующая функция в окрестности точки сопредельного состояния ИС имеет линейный участок. Математически это объясняется следующим образом. Пусть геометрическое место точек в m -мерном пространстве возможных сопредельных состояний сети на интервале рассмотрения представляется аппроксимирующей кривой $f(x^1, \dots, x^m) = 0$. Тогда вблизи точки M_0 она будет иметь вид простого отрезка, т.е. точка M_0 , обозначающая состояние нагруженной ИС, будет являться обыкновенной (неособой).

Докажем это методом от противного: предположим точку M_0 особой. В связи с этим необходимо потребовать, чтобы все частные производные состояния системы $f(x^1, \dots, x^m)$ по x^1, \dots, x^m в точке $M_0(x^1, \dots, x^m)$ одновременно обращались в нуль. Это означает, что для связной сети следует предположить возможность ситуации, когда изменение состояний всех КС не влияет на состояние ИС, чего в принципе не может быть (то же относится и к путевым потокам). Следовательно, точка $M_0(x^1, \dots, x^m)$ является обыкновенной. Понятие частной производной здесь использовано для определения изменения состояния системы на единицу состояния канала, т.е. той переменной, по которой берется частная производная.

В нагруженной ИС, в том числе находящейся в состоянии, близком к предельному, линейные изменения состояний КС на крайне малом, но допустимом (для использования аппроксимации) интервале рассмотрения не приводят к взрывному, т.е. скачкообразному, изменению состояния сети в целом. Поэтому можно утверждать, что в этом интервале существует возможное состояние ИС (характеризуемое точкой M_1), которое является достаточно близким к исходному состоянию (соответствующему точке M_0), причем настолько, что позволяет заменить непрерывную функцию состояния ИС в этом интервале ее линейным участком. В связи с этим для анализа ИС применим аппарат дифференциальной геометрии.

6.3. СИСТЕМА ЛИНЕЙНО НЕЗАВИСИМЫХ ПУТЕВЫХ ПОТОКОВ – КРИВОЛИНЕЙНАЯ СИСТЕМА КООРДИНАТ

Пространство состояний ИС выше представлено в «координатах» каналов связи. Рассмотрим это пространство с другой точки зрения: отнесем его к «координатам» состояний путей [133].

В связной многоскачковой ИС множество узлов коммутации образуют несколько зон непосредственной связи, при этом узлы коммутации одной и той же зоны соединены между собой непосредственно, а разных зон – только через граничные узлы, которые для соседних зон являются общими. Геометрически модель такой сети можно представить также евклидовым E_m пространством, составленным из s (число зон) невырожденных евклидовых подпространств, «склеенных» между собой. Склейки также являются невырожденными евклидовыми подпространствами. Так как расстояния между КС разных зон этого пространства ненулевые, что обусловлено зависимостью их состояний от инфцугов, следующих по путям, соединяющим эти каналы, то в этом невырожденном пространстве существует метрика, а значит, его можно считать евклидовым E_m пространством размерности m .

Наряду с представленным выше необходимо заметить: в невырожденном E_m пространстве состояний КС могут иметь место вырожденные подпространства меньшей размерности. Они соответствуют выборкам подмножеств КС, в которых, как минимум, один из них не имеет какой-либо информационной связи со всеми остальными.

Исследование многоскачковой ИС, в общем случае, предполагает использование понятия путей в сети. Поэтому введем в пространство состояний КС E_m новую систему координат, в которой каждая ее ось соответствует новой переменной – количество информации в путевом потоке. В качестве таковых рассматриваются не только транзитные, но и внешние потоки. Последнее физически обусловлено тем, что в случае сопредельной загрузки состояние сети зависит не только от функции распределения информации (маршрутизации), но и от функции управления доступом к сети, а следовательно, от внешней нагрузки. Выберем в качестве новых координатных осей совокупность криволинейных осей, k из которых соответствуют линейно независимым внешним (входным и выходным) потокам, а n – линейно независимым путевым потокам, причем $k + n = m$, где m – число кибернетических элементов (КС и УН) в модели ИС. Приведенное равенство оставляет неизменной полную размерность пространства состояний сети и соответствует при этом ортогональной модели, рассмотренной в п. 4.5.

Для понятия криволинейного пространства ИС произведем арифметизацию, например, n -мерного подпространства, характеризующего количество информации, передаваемой по n линейно независимым путям. Будем представлять его в виде множества всевозможных последовательностей вида (q^1, \dots, q^n) , где каждая отдельная последовательность (q^1, \dots, q^n) есть точка криволинейного пространства, а числа q^1, \dots, q^n – координаты точек, значения которых количественно определяют загрузку соответственно 1,

..., n путей инфцугами. Важно отметить, что каждая точка $q^i, i=1, \dots, n$ как бы погружена в охватывающую ее область, которая характеризуется условием дифференцируемости в окрестности точки.

Как отмечено выше, одновременно с n транзитными путевыми потоками существуют внешние потоки, которые изменяют значения состояний КС x^i . Их число, очевидно, не превышает числа узлов коммутации и в предельном случае равно: $\text{card} \{n+1, \dots, m\} = k$. Исходя из этого, положение точки M_0 на кривой состояния ИС формально является функцией от информационной загрузки путей $q^1, \dots, q^n, q^{n+1}, \dots, q^m$, т.е. $\mathbf{r}(q^1, \dots, q^n, q^{n+1}, \dots, q^m)$. Другими словами, координаты M_0 могут быть определены в m -мерном аффинном пространстве посредством криволинейных координат $q^1, \dots, q^n, q^{n+1}, \dots, q^m$, соответствующих вложенным в него n -мерному подпространству путевых потоков и k -мерному подпространству внешних потоков:

$$\begin{cases} x^1(\mathbf{r}) = x^1(q^1, \dots, q^n, q^{n+1}, \dots, q^m); \\ \vdots \\ x^m(\mathbf{r}) = x^m(q^1, \dots, q^n, q^{n+1}, \dots, q^m). \end{cases} \quad (6.16)$$

Например, состояние условно первого КС может быть определено как сумма количества информации путевых потоков, использующих его на интервале рассмотрения:

$$x^1 = k_1^1 q^1 + k_2^1 q^2 + \dots + k_n^1 q^n, \quad (6.17)$$

где коэффициенты при потоках представлены компонентами смешанного тензора ввиду того, что они, по существу, связывают пространство путей и подпространство КС и УН (по сути, коэффициенты соответствуют элементам матрицы преобразования C_{β}^{α} (см. п. 4.5)).

Обратно, $n+k$ координаты криволинейного пространства $q^1, \dots, q^n, q^{n+1}, \dots, q^m$ – суть значения количества инфцугов в путевых и выходных потоках, характеризуются совокупностью состояний УН и КС:

– для n путевых (транзитных) потоков

$$\begin{cases} q^1(\mathbf{r}) = q^1(x^1, \dots, x^m); \\ \vdots \\ q^n(\mathbf{r}) = q^n(x^1, \dots, x^m); \end{cases}$$

– для k внешних потоков

$$\begin{cases} q^{n+1}(\mathbf{r}) = q^{n+1}(x^1, \dots, x^m); \\ \vdots \\ q^m(\mathbf{r}) = q^m(x^1, \dots, x^m). \end{cases} \quad (6.18)$$

Это означает, что существует функциональный переход от пространства, выраженного координатами КС и УН, к пространству путевых и внешних потоков (6.18) и обратно (6.16), что позволяет говорить о существовании однозначного взаимно обратного функционального преобразования. Так как \mathbf{r} является вектор-функцией путевых переменных: $\mathbf{r} = \mathbf{r}(q^1, \dots, q^n, q^{n+1}, \dots, q^m)$, то изменение \mathbf{r} относительно аргументов q^i будет характеризоваться частными производными:

$$\left(\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial q^1}, \dots, \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial q^n}, \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial q^{n+1}}, \dots, \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial q^m} \right) \neq 0. \quad (6.19)$$

Функциональная зависимость (6.19) позволяет изменение количества информации в пространстве состояний КС отобразить отличным от нуля в каждой точке якобианом преобразования:

$$\det H_{\beta}^{\alpha} = \det \left| \frac{\partial x^i}{\partial q^j} \right| = \det \begin{vmatrix} \frac{\partial x^1}{\partial q^1} & \dots & \frac{\partial x^1}{\partial q^n} & \frac{\partial x^1}{\partial q^{n+1}} & \dots & \frac{\partial x^1}{\partial q^m} \\ \frac{\partial x^2}{\partial q^1} & \dots & \frac{\partial x^2}{\partial q^n} & \frac{\partial x^2}{\partial q^{n+1}} & \dots & \frac{\partial x^2}{\partial q^m} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial x^m}{\partial q^1} & \dots & \frac{\partial x^m}{\partial q^n} & \frac{\partial x^m}{\partial q^{n+1}} & \dots & \frac{\partial x^m}{\partial q^m} \end{vmatrix} \neq 0. \quad (6.20)$$

В смешанном тензоре преобразования H_{β}^{α} скользящие контравариантные индексы α (строки) характеризуют оси системы координат КС и УН, а β (столбцы) – оси системы координат путей. Условие (6.20) означает невырожденность матрицы преобразования. Отсутствие хотя бы одного нулевого столбца или строки обосновывается тем, что изменение состояния каждого КС вызвано, как минимум, приращением информации в одном путевом потоке. В противном случае сеть несвязна, что противоречит условию ее рассмотрения.

Неравенство нулю (6.20) означает существование матрицы обратного преобразования F_{α}^{β} . При этом имеет место неравенство:

$$\det F_{\alpha}^{\beta} = \det \left| \frac{\partial q^i}{\partial x^j} \right| = \det \begin{vmatrix} \frac{\partial q^1}{\partial x^1} & \dots & \frac{\partial q^1}{\partial x^m} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial q^n}{\partial x^1} & \dots & \frac{\partial q^n}{\partial x^m} \\ \frac{\partial q^{n+1}}{\partial x^1} & \dots & \frac{\partial q^{n+1}}{\partial x^m} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial q^m}{\partial x^1} & \dots & \frac{\partial q^m}{\partial x^m} \end{vmatrix} \neq 0, \quad (6.21)$$

которое также просто обосновывается: приращение количества информации в любом пути для связной сети не может не зависеть от приращения информации хотя бы в одном КС (узловой паре).

Из (6.20) видно, что если путевые потоки полностью и бесконфликтно распределяются по разным каналам и УН, то вместо частных производных в матрице преобразования H_{β}^{α} будут единичные и нулевые коэффициенты. Это означает тождественность перехода в другую систему координат с помощью ранее рассмотренных матриц преобразования \mathbf{C} и \mathbf{A} , $\mathbf{C} = (\mathbf{A}^T)^{-1}$ (см. п. 4.5).

Итак, задавая для многоскачковой ИС геометрически криволинейное пространство, мы осуществляем переход к пространству линейно независимых путевых потоков в ней. Взаимно однозначное соответствие состояний КС и путевых потоков позволяет перейти к исследованию сети с учетом взаимного информационного влияния потоков в КС и их динамики.

6.4. МЕТРИЧЕСКИЙ ТЕНЗОР В ПУТЕВОМ ПРОСТРАНСТВЕ

В ортогональной модели ИС (см. п. 4.5) одновременно рассматривались разомкнутые пути и замкнутые контура. Согласно комбинаторике, в связной структуре сети сумма числа линейно независимых контуров и путей равна количеству элементов в ней. В нашем случае сеть состоит из m одноканальных систем, которые в связной сети определяют n линейно независимых путей и k замкнутых потоковых контуров ($m = n + k$).

Рассмотрим криволинейное n -мерное подпространство путевых потоков. В таком пространстве метрику, подобно евклидовому пространству, построить невозможно. Однако при условии непрерывности функции состояния ИС, можно исследовать окрестность конкретной точки $M_0(q^1, \dots, q^n)$ с помощью таких же аффинных координат. Исследование окрестности точки означает рассмотрение сетевых процессов в касательной n -мерной плоскости, которая, в отличие от подлежащего пространства, обладает метрикой.

Функциональная связь координат точки M_0 в пространстве состояний КС с координатами этого же состояния в криволинейном подпространстве состояний путей, очевидно, соответствует функциональной зависимости состояний каналов от количества информации в путях (6.16). Если зафиксировать состояния всех путей, кроме условно первого, значениями q^2, \dots, q^n , то через точку M_0 пройдет только одна координатная линия q^1 , характеризующая эту точку координатой q^1 . Ее значение, как и в случае рассмотрения каналов связи, определяется числом инфцугов в условно принятом первом пути. Если предположить, что первый путь проходит через какой-либо тандем КС, то изменение количества информации вызовет приращение состояний КС и УН, а следовательно, и смещение состояния сети от точки M_0 . Изменение величины \mathbf{r} – приращение кибернетической мощности – относительно первого пути будет определяться частной производной вдоль пути q^1 :

$$\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial q^1} \equiv \lim_{\Delta q^1 \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta q^1}, \quad (6.22)$$

где $\mathbf{r} = \mathbf{r}(x^1, x^2, \dots, x^m)$, а $\Delta \mathbf{r}$ – соответствующее ему приращение.

Частная производная является касательным вектором к координатной линии q^1 и через совокупность состояний КС и УН характеризует изменения состояния сети, обусловленные на интервале рассмотрения приращениями количества инфцугов в первом пути. Это же справедливо и для других координатных линий, характеризующих оставшиеся путевые потоки, которые имеют свои касательные векторы:

$$\mathbf{r}_i = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial q^i}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (6.23)$$

В силу линейной независимости количества информации в путях, векторы \mathbf{r}_i образуют касательную n -мерную евклидову плоскость в точке M_0 с репером $\{M_0, \mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_n\}$. В другой точке n -мерного пространства, которая соответствует новому состоянию сети связи, значения координат q^1, \dots, q^n будут другие, а значит, репер из-за другого перераспределения путевых потоков по КС, в общем случае, также будет другим. Поэтому репер, рассматриваемый в окрестности точки состояния ИС, является локальным.

Пример двумерного криволинейного пространства, соответствующего сети с двумя линейно независимыми путями и с касательными плоскостями в разных точках, показан на рис. 6.4. Как видно, изменения состояний ИС относительно приращения количества информации в путях могут быть представлены n -мерными касательными пространствами.

Согласно (6.16), определение касательной n -мерной плоскости в геометрической модели ИС можно отождествить с решением в ней задачи маршрутизации, исходя из приращения путевой информации. Так как частные производные (6.23) характеризуют долевое распределение трафика по КС на единицу приращения путевой информации, то касательную n -мерную плоскость назовем локальным (в окрестности точки состояния M_0) пространством T_n маршрутизации.

Касательная плоскость T_n в путевом – криволинейном – пространстве от точки к точке сопредельных состояний ИС меняется. Это означает, что изменение сопредельного состояния сети должно сопровождаться коррекцией пространства маршрутизации. Такая коррекция тождественна (как видно из рис. 6.4) описанию движения касательной плоскости по пути, который получается из возможных точек сопредельных состояний.

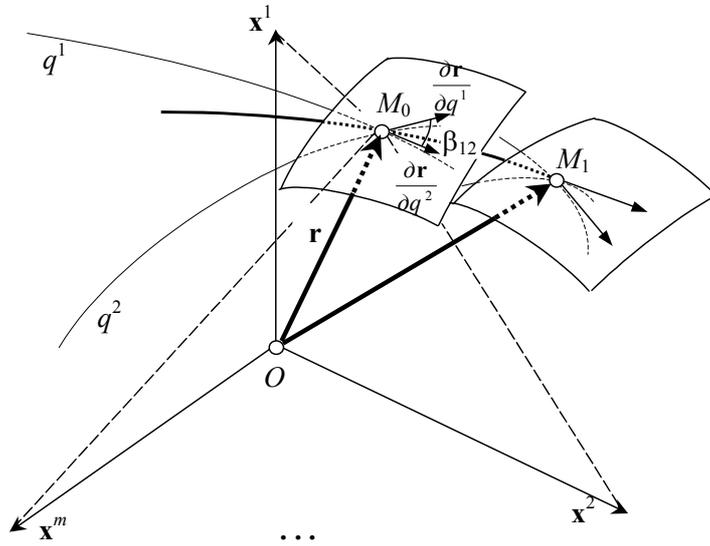


Рис. 6.4

Локальный репер в криволинейном пространстве имеет основополагающее значение для определения квадрата приращения радиуса-вектора \mathbf{r} . Применительно к информационной сети это относится к приращению кибернетической мощности. Смещаясь из точки $M_0(q^i, i=1, \dots, n)$ в бесконечно близкую точку $M_1(q^i + \Delta q^i, i=1, \dots, n)$, вектор смещения $\overline{M_0M_1}$ можно определить как приращение \mathbf{r} в окрестности точки M_0 :

$$\overline{M_0M_1} = \overline{OM_1} - \overline{OM_0} = \mathbf{r}(q^i + \Delta q^i) - \mathbf{r}(q^i), \quad i=1, \dots, n.$$

Заменяв приращение полным дифференциалом, получим

$$\overline{M_0M_1} \approx \mathbf{r}_1 \Delta q^1 + \dots + \mathbf{r}_n \Delta q^n. \quad (6.24)$$

Из (6.24) видно, что при условно бесконечно малых смещениях из состояния сети связи в точке M_0 приращения криволинейных координат Δq^i , так же как и в евклидовом пространстве, выражают координаты вектора смещения $\overline{M_0M_1}$, являясь при этом реальными величинами, отождествленными с приращением количества информации в различных путях. Таким образом, благодаря локальному реперу в точке M_0 , криволинейные координаты в окрестности рассматриваемой точки с точностью до бесконечно малых высших порядков обладают свойством аффинных координат.

Так как криволинейное пространство вложено в m -мерное евклидово пространство, квадрат расстояния между двумя бесконечно близкими точками M_0 и M_1 n -мерного путевого (криволинейного) пространства можно представить через приращения декартовых координат:

$$dr^2 = dx^1{}^2 + dx^2{}^2 + \dots + dx^m{}^2. \quad (6.25)$$

Выражение (6.25) справедливо для сети, в которой КС не оказывают взаимного мешающего влияния.

Выразим линейные приращения (с точностью до бесконечно малых величин высших порядков) состояний КС dx^i ($i=1, \dots, m$) через количество информации в путях q^1, \dots, q^n . Для условно первого канала дифференциал его состояния (результатирующее линейное приращение числа инфцугов на интервале рассмотрения) можно записать:

$$dx^1 = \frac{\partial x^1}{\partial q^1} dq^1 + \frac{\partial x^1}{\partial q^2} dq^2 + \dots + \frac{\partial x^1}{\partial q^n} dq^n = \sum_{i=1}^n \frac{\partial x^1}{\partial q^i} dq^i, \quad (6.26)$$

т.е. дифференциал состояния КС определяется суммой линейных приращений количества инфцугов различных путей, проходящих через него. Коэффициенты пространства маршрутизации $\left(\frac{\partial x^1}{\partial q^i}\right)$, определяющие степень использования путей рассматриваемым КС, умножаются на приращение количества информации в соответствующем пути. В случае, когда используется понятие путевого потока, т.е. количество путевой информации в единицу времени, линейные приращения состояний КС будут являться также функцией времени. Линейную скорость изменения количества информации в КС или УН можно представить в следующем виде:

$$\frac{dx^1}{dt} = \frac{\partial x^1}{\partial q^1} \frac{dq^1}{dt} + \frac{\partial x^1}{\partial q^2} \frac{dq^2}{dt} + \dots + \frac{\partial x^1}{\partial q^n} \frac{dq^n}{dt} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial x^1}{\partial q^i} \frac{dq^i}{dt}. \quad (6.27)$$

Из выражения (6.27) видно: изменения интенсивностей поступления инфцугов в конкретные каналы с памятью определяются приращением путевых потоков, которые проходят через рассматриваемый КС (что очевидно). Частные производные в (6.26), (6.27) характеризуют долю путевого трафика, направляемого в рассматриваемый канал.

Итак, в окрестности точки M_0 имеет место линейное пространство, описываемое локальным репером $\{M_0, r_1, \dots, r_n\}$. Аналогично рассмотренному пространству состояний КС, основываясь на скалярном произведении линейно независимых векторов r_1, \dots, r_n , ковариантный метрический тензор путевого пространства в окрестности точки сопредельного состояния сети можно представить:

$$g_{\beta ij} = r_i r_j = \sum_{v=1}^m \frac{\partial x^v}{\partial q^i} \frac{\partial x^v}{\partial q^j}. \quad (6.28)$$

Нижний индекс β характеризует пространство путей. Координаты метрического тензора $g_{\beta ij}$ представляют собой косинусы углов между векторами локального репера (угол β_{ij} на рис. 6.4) и влияют на значения взаимной энтропии путей i и j .

Таким образом, в окрестности точки состояния нагруженной сети информационное взаимное влияние изменения состояний путей, подобно взаимному влиянию КС в пространстве E_m , можно описать коэффициентами – скалярными величинами, отождествляемыми с косинусами углов между векторами, характеризующими изменения состояний КС относительно приращений на один информационный дискрет информации в путях (табл. 6.1).

ТАБЛИЦА 6.1

Аналитическое выражение	Характеристика кибернетических процессов, исходя из геометризации информационных процессов
$\frac{\partial x^v}{\partial q^i} = 0$	Изменение количества информации в пути не влияет на состояние v -го КС. Канал не включен в i -й путь
— $\frac{\partial x^v}{\partial q^i} = 1$	<i>УВЕЛИЧЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ИНФОРМАЦИИ В I-М ПУТИ НА 1 ИНФЦУГ ВЛЕЧЕТ УВЕЛИЧЕНИЕ СОСТОЯНИЯ v-ГО КС ТАКЖЕ НА 1 ИНФЦУГ, Т.Е. ЧЕРЕЗ КС В РАССМАТРИВАЕМЫЙ ИНТЕРВАЛ ВРЕМЕНИ ПРОХОДИТ ВСЕ КОЛИЧЕСТВО ИНФОРМАЦИИ I-ГО ПУТИ</i>

$\frac{\partial x^v}{\partial q^i} < 1$	<p>Увеличение количества информации в i-м пути на 1 инфцуг влечет увеличение состояния v-го КС меньше чем на 1 инфцуг. Это означает:</p> <p>а) i-й путь использует параллельно v-му каналу несколько других;</p> <p>б) в результате ярко выраженного распределенного характера путевой информации увеличение количества последней не приводит к такому же изменению состояния канала</p>
$\frac{\partial x^v}{\partial q^i} > 1$	<p>Увеличение количества информации в i-м пути на 1 инфцуг влечет увеличение состояния v-го КС более чем на 1 инфцуг, что соответствует дублированию путевой информации в КС</p>

Из (6.28) видно, что результирующий коэффициент взаимного информационного влияния двух путей равен сумме коэффициентов в каждом КС и УН. Поэтому чтобы определить матрицу метрического тензора пространства путей, необходимо вычислить коэффициенты взаимного влияния пар путей в каждом КС и УН с последующим суммированием полученных значений.

Локальный репер в общем случае имеет косоугольный характер. Поэтому метрический тензор имеет как ко-, так и контравариантные компоненты. Ковариантный метрический тензор может быть использован при определении приращения обобщенного параметра сети – кибернетической мощности. Заметим, речь идет о рассмотрении приращения кибернетической мощности в окрестности точки M_0 , привязываясь к координатным линиям – состояниям путей.

Формируемое метрическим тензором (6.28) пространство в окрестности точки определяется количеством линейно независимых путей и является невырожденным. Последнее объясняется наличием изменения состояния сети от приращения количества информации, как минимум, в одном из них. Поэтому можно записать:

$$\det \left| g_{ij} \right|_{\beta} \neq 0. \quad (6.29)$$

Условие (6.29) означает, что имеется возможность применения контравариантного метрического тензора:

$$g^{ij} = \mathbf{r}^i \mathbf{r}^j. \quad (6.30)$$

Он может быть получен путем обращения ковариантного метрического тензора и, в отличие от последнего, не имеет геометрического пояснения, так как не привязывается ни к каким координатным линиям (он соответствует неголономному реперу).

6.5. СОВМЕЩЕНИЕ ПРОСТРАНСТВ СОСТОЯНИЙ КАНАЛОВ СВЯЗИ И ПУТЕВЫХ ПОТОКОВ

Связь векторов локального репера метрического путевого пространства (т.е. в окрестности точки состояния сети) и векторов репера пространства КС можно определить, используя выражения (6.16), (6.17):

$$\mathbf{r}_{\beta} = \mathbf{e}_{\alpha} H_{\beta}^{\alpha}, \quad (6.31)$$

$$\mathbf{e}_\alpha = \mathbf{r}_\beta F_{\alpha}^{\beta}. \quad (6.32)$$

В развернутом виде, например, репер путевого пространства в окрестности точки состояния ИС можно определить следующим образом:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{r}_1 \\ \mathbf{r}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{r}_m \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} \mathbf{e}_1 & \mathbf{e}_2 & \dots & \mathbf{e}_m \end{vmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial x^1}{\partial q^1} & \frac{\partial x^1}{\partial q^2} & \dots & \frac{\partial x^1}{\partial q^m} \\ \frac{\partial x^2}{\partial q^1} & \frac{\partial x^2}{\partial q^2} & \dots & \frac{\partial x^2}{\partial q^m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial x^m}{\partial q^1} & \frac{\partial x^m}{\partial q^2} & \dots & \frac{\partial x^m}{\partial q^m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{v=1}^m \frac{\partial x^v \mathbf{e}_v}{\partial q^1} \\ \sum_{v=1}^m \frac{\partial x^v \mathbf{e}_v}{\partial q^2} \\ \vdots \\ \sum_{v=1}^m \frac{\partial x^v \mathbf{e}_v}{\partial q^m} \end{pmatrix}, \quad \left(\begin{array}{l} \text{суммирование} \\ \text{по } v \text{ не} \\ \text{производится} \end{array} \right)$$

где учтено, что путевое пространство включает как линейно независимые пути разомкнутого типа, так и замкнутого.

Записанное выше в развернутом виде выражение дополнительно поясняет метрический тензор путевого пространства (6.28).

Возможность использования метрики в криволинейном пространстве, а точнее в окрестности точки состояния ИС позволяет представить путевое пространство n -мерным римановым пространством (R_n). Одновременно с этим состояние сети можно выразить через координаты m -мерного пространства состояний КС E_m . Ввиду того, что в сети n линейно независимые пути состоят из m КС (где $m > n$), наложение n путевых потоков на связную сеть с m соединенных между собой КС можно геометрически отождествить с вложением пространства R_n в m -мерное пространство состояний КС E_m .

Возможная неоднозначность такого вложения объясняется различными вариантами размещения R_n в E_m (это возможно в случае $m \gg n$). В частности, известно [48], что для реализации всех случаев размещения соотношение размерностей евклидова и риманова пространств имеет вид

$$m = \frac{n(n+1)}{2}. \quad (6.33)$$

В случае, когда число линейно независимых путей в сети с заданной структурой превышает значение, определенное в (6.33), размещение путевого пространства будет иметь ограничение относительно пространства состояний КС. Чем больше нарушается это соотношение, тем существенней это ограничение.

Ранее показано, что изменение состояния сети в окрестности точки M_0 характеризуется приращением кибернетической мощности (6.14). Так как состояние каждого из КС полностью определяется функциональной зависимостью от путевых потоков, то ее приращение кибернетической мощности в окрестности точки состояния сети может быть выражено координатами путевого пространства. При этом оно представляется квадратичной формой Римана

$$dP_{\text{ИС}} \equiv d\mathbf{r}^2 = g_{ij}^{\xi^i \xi^j}, \quad (6.34)$$

где координаты ξ^i относятся к локальному реперу и характеризуют линейные изменения состояния сети (дифференциалы) относительно приращения информации в соответствующих i -х путях.

Итак, в любой точке сопредельного состояния сети M_0 , одновременно соответствующей двум пространствам – пространству состояний КС E_m и путевому пространству R_n , при изменениях количества информации в путях имеет место приращение кибернетической мощности. Оно не зависит от используемых систем координат и поэтому является инвариантом относительно рассматриваемых пространств.

Определим связь локальных координат путевого пространства с аффинными координатами пространства состояний КС. При этом не будем учитывать взаимное влияние путей в пространстве R_n .

Пусть в момент времени t_0 сеть находится в состоянии M_0 . Линейное приращение количества информации в этой точке обозначим вектором ξ , который лежит в локальной плоскости маршрутизации, определяемой репером $\{M_0, \mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_n\}$. Его координаты – ξ^i . Этот вектор с точностью до малых величин высшего порядка характеризует изменение радиуса-вектора \mathbf{r} , который своим концом в течение времени $[t_0, t)$ описывает путь, задаваемый в параметрическом виде:

$$q^i = q^i(t), \quad i = 1, \dots, n, \quad t_0 \leq t \leq t_1, \quad (6.35)$$

где $q^i(t)$ – непрерывно дифференцируемые функции, характеризующие динамику путевых потоков.

В пространстве состояний КС E_m расстояние как кратчайший путь между любыми двумя точками пути определяется по прямой и численно равно дифференциалу кибернетической мощности (6.14). В путевом пространстве R_n , во-первых, расстояние можно определить только в окрестности точки с использованием формы Римана:

$$ds = \sqrt{g_{ij} \frac{\xi^i(t)}{dt} \frac{\xi^j(t)}{dt}} dt; \quad (6.36)$$

во-вторых, путь, по которому определяется расстояние между бесконечно близкими точками, представляется не по прямой, а по кривой – геодезической линии.

В связи с этим вектор-функция приращения количества передаваемой информации $\xi(t)$ с компонентами $\xi^i(t)$, получающимися в результате разложения по векторам локального репера, на каждом участке ds направляется по геодезической, а точнее по касательной линии к ней.

Прохождение геодезической линии через любую точку (в нашем случае M_0) соответствует определению ее координат q^i и касательной плоскости T_n ($T_n \in E_n$) к пространству R_n в этой точке. Координаты точки в R_n , как правило, известны, так как они являются путевым трафиком в момент времени t_0 , а касательная плоскость определяется маршрутизацией и геометрически представляется векторами локального репера \mathbf{r}_i плоскости T_n . Двигаясь по пути изменения состояния сети (кибернетической мощности), координаты вектора $\xi^i(t)$ – линейные приращения количества информации относительно i -х путей – всегда будут относиться к локальному реперу в точке, которая соответствует рассматриваемому моменту времени.

Линейное приращение количества информации относительно всех путей в каждой точке состояния сети можно определить в виде следующей суммы компонент:

$$\xi = \xi^i \mathbf{r}_i = \xi^i \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial q^i}. \quad (6.37)$$

В выражении (6.37) учтено, что каждый касательный вектор \mathbf{r}_i к линии состояния i -го пути характеризуется изменениями состояний всех входящих в него КС, которые вызваны приращением в нем информации на один инфцуг. Из (6.37) выразим компоненты вектора ξ :

$$\xi^i = \xi \frac{\partial q^i}{\partial \mathbf{r}} = \xi \frac{\partial q^i}{\partial s}, \quad (6.38)$$

где учтено, что приращение радиуса-вектора \mathbf{r} и дифференциал дуги s (кусоч пути изменения состояния сети) на бесконечно малом участке пути, описываемом радиусом-вектором, совпадают.

Это утверждение обосновано определением как приращения вектора, так и дифференциала квадратичной формой Римана с одинаковыми компонентами. Величина $\frac{\partial q^i}{\partial s}$ характеризует бесконечно малое приращение координат вдоль геодезической линии и соответствует контравариантному вектору \mathbf{r}^i . Кон-

травариантные векторы \mathbf{r}^i образуют неголономный репер и, следовательно, координаты контравариантного метрического тензора g_{β}^{ij} .

Рассмотрим теперь в пространстве состояний КС E_m вектор \mathbf{x} , который имеет начало в точке M_0 и длину, равную длине вектора ξ . Кроме того, определим ему направление таким образом, чтобы он являлся касательным к геодезической линии в R_n . Как и в рассмотренном выше случае для R_n , длина вектора \mathbf{x} будет характеризовать приращение кибернетической мощности сети относительно КС. Очевидно, $\xi = \mathbf{x}$, так как приращение кибернетической мощности является инвариантом относительно пространств E_m и R_n .

Проекция вектора \mathbf{x} на оси координат пространства E_m соответствуют дополнениям (они могут быть и отрицательными) количества информации в КС:

$$X^v = \mathbf{x} \frac{dx^v}{ds}; \quad v = 1, \dots, m, \quad (6.39)$$

где dx^v – приращения состояний КС вдоль вектора приращения кибернетической мощности, которые соответствуют приращениям dq^i координат q^i .

Последнее поясняется тем, что для любого КС линейное приращение вызвано суммарным изменением количества информации в путях, проходящих через него:

$$dx^v = \frac{\partial x^v}{\partial q^i} dq^i. \quad (6.40)$$

Исходя из этого, компоненты вектора \mathbf{x} можно выразить через соответствующие изменения в путях и распределения информации по КС:

$$X^v = \mathbf{x} \frac{\partial x^v}{\partial q^i} \frac{dq^i}{ds} = \xi \frac{\partial x^v}{\partial q^i} \frac{dq^i}{ds} = \xi^i \frac{\partial x^v}{\partial q^i}, \quad (6.41)$$

а с учетом того, что изменение информации в путях является функцией времени

$$X^v(t) = \xi^i(t) \frac{\partial x^v}{\partial q^i} \frac{dq^i(t)}{dt}. \quad (6.42)$$

Таким образом, вектор линейного приращения количества передаваемой информации ξ , задаваемый в путевом пространстве в окрестности точки состояния ИС, может быть представлен в пространстве состояний КС E_m . Приращение количества информации в v -м КС определяется вкладом i -го пути в изменения состояния сети и коэффициентом использования этим путем v -го канала.

Краткая характеристика кибернетического представления основных величин в пространствах КС и путей дана в табл. 6.2.

Криволинейность путевого пространства геометрически характеризуется тем фактом, что при параллельном переносе вектора в ближайшее соседнее состояние он уже становится не параллельным самому себе, т.е. относительно евклидова пространства, в которое вложено данное риманово, он поворачивается на некоторый угол. Это означает,

Таблица 6.2

Аналитическое выражение	Характеристика кибернетического представления, исходя из геометризации информационных процессов
-------------------------	---

$x^i, i = 1, \dots, m$	Количество информации в i -м КС (m – число КС)
$q^i, i = 1, \dots, n$	Количество информации в i -м пути (n – число путей)
\mathbf{e}_i	Орг, определяющий единицу измерения информационного дискрета (инфцуг), передаваемого в КС
$\mathbf{e}_i \mathbf{e}_j = g_{ij}$	Метрический тензор, характеризующий взаимную корреляцию единиц информации различных КС
$x_i = g_{ij} x^j$	Общее количество информации в канале, находящееся как в режиме передачи, так и в режиме хранения
$\mathbf{r}^2 = x_i x^i = g_{ij} x^i x^j \equiv P_{\text{ИС}}$	Кибернетическая мощность ($P_{\text{ИС}}$). Значение $P_{\text{ИС}}$ равно квадрату длины радиуса-вектора \mathbf{r} , характеризующего в информационном пространстве КС состояние ИС
1) $dP_{\text{ИС}} \equiv d\mathbf{r}^2 = g_{ij} dx^i dx^j$	Линейное приращение $P_{\text{ИС}}$ в окрестности точки состояния ИС, определяемое в пространстве КС
2) $dP_{\text{ИС}} \equiv ds^2 = g_{\beta}^{\alpha} \xi^{\beta} \xi^{\alpha}$	Линейное приращение $P_{\text{ИС}}$ в окрестности точки сопредельного состояния сети, определяемое в пространстве линейно независимых путей
$\mathbf{r}_i \mathbf{r}_j = g_{ij}$	Метрический тензор, характеризующий взаимную корреляцию единиц информации в линейно независимых путях ИС
$\mathbf{r}_i = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial q^i} = \sum_{v=1}^m \frac{\partial \mathbf{x}^v}{\partial q^i}$	Касательный вектор к i -й координатной линии (она соответствует информационному заполнению i -го пути, при фиксированном состоянии всех остальных путей). Характеризует степень линейного изменения количества информации во всех КС, обусловленную приращением на единицу количества информации в i -м пути. Совокупность векторов $\mathbf{r}_i, i = 1, \dots, n$ образует репер системы координат путевого пространства в окрестности точки состояния сети

Продолжение табл. 6.2

Аналитическое выражение	Характеристика кибернетического представления, исходя из геометризации информационных процессов
$\mathbf{r}_{ij} = \sum_{v=1}^m \frac{\partial^2 \mathbf{x}^v}{\partial q^i \partial q^j}$	Вектор в точке сопредельного состояния ИС характеризует степень изменения состояний КС, которая обусловлена одновременным приращением единиц количества информации в двух и более ли-

	нейно независимых путях, проходящих через каждый выбранный КС
$X^v = \xi^i \frac{\partial x^v}{\partial q^i}$	Линейное приращение количества информации в КС, выраженное через состояние путей и долю их влияния на состояние КС

что в ИС при определении приращений состояний КС необходимо учитывать дополнительное количество информации в точке нового состояния сети, которое обусловлено взаимным влиянием путей. Поэтому при определении разности значений количества путевой информации в двух соседних точках сопредельных состояний ИС необходимо вносить поправку на изменение количества передаваемой информации в путях. Это учитывается введением символов Кристоффеля в тензорном анализе.

7. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕНЗОРНОГО АНАЛИЗА В ТЕОРИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

Применение тензорного анализа возможно на основе выполнения следующих основных условий. Во-первых, в нагруженной ИС процесс передачи информации в КС представляется непрерывным процессом. Во-вторых, все элементы сети идентичны в ИС, и поэтому процессы в них однородны. Формула поведения для сети в целом остается справедливой и для каждого ее элемента в отдельности. В-третьих, в ИС обобщенная характеристика – кибернетическая мощность [55] – является инвариантом, что позволяет производить необходимые расчеты сетевых характеристик относительно различных систем координат.

В результате, в-четвертых, имеется возможность использования группового свойства. Проведенная геометризация информационных процессов позволяет применить аппарат тензорного анализа [48], в основу которого положены понятия: параллельный перенос вектора, ковариантная (абсолютная) производная, ковариантный дифференциал. Важными компонентами в указанных понятиях являются символы Кристоффеля.

7.1. Символы Кристоффеля в терминах информационных процессов

Итак, связь состояний m КС и n путей (где $m > n$) в ИС, геометрически может быть представлена вложением криволинейного n -мерного пространства R_n линейно независимых путей в m -мерное евклидово пространство E_m состояний КС. Радиус-вектор \mathbf{r} в E_m , длина которого определяет кибернетическую мощность сети, является вектор-функцией состояний путей:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(q^1, \dots, q^n). \quad (7.1)$$

Приращение кибернетической мощности относительно i -го пути в окрестности точки состояния M_0 нагруженной ИС соответствует приращению \mathbf{r} и может быть представлено касательным вектором к координатной линии q^i в этой точке – \mathbf{r}_i . Так как пути в криволинейном пространстве линейно независимы, то n векторов \mathbf{r}_i формируют репер в касательной плоскости к M_0 . При этом для связной сети выполняется условие (6.19). Равносильно векторному представлению (7.1) в пространстве КС состояние сети можно описать m скалярными соотношениями:

$$x^v = x^v(q^1, \dots, q^n), \quad v = 1, \dots, m. \quad (7.2)$$

Исходя из (7.2), условие существования локального репера (6.19) можно задать, применив тензор преобразования H_{β}^{α} (6.20). Связь векторов локального репера в окрестности точки пространства путевых потоков с единичными векторами репера пространства состояний КС можно представить в тензорной форме $\mathbf{r}_{\beta} = H_{\beta}^{\alpha} \mathbf{e}_{\alpha}$. Исходя из этого, векторы локального репера путевого пространства в точке состояния сети M_0 (6.23) можно расписать в виде

$$\mathbf{r}_i = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial q^i} = \sum_{v=1}^m \frac{\partial \mathbf{x}^v}{\partial q^i}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (7.3)$$

где $\mathbf{x}^v = x^v \mathbf{e}_v$ (суммирование по мнимым индексам не производится) – контравариантный вектор, характеризующий передачу количества информации в v -м КС; q^i – значение в точке M_0 i -й координатной линии, которое соответствует количеству передаваемой информации в i -м пути.

Переход к другой, достаточно близкой к точке M_0 – точке состояния сети M_1 , в общем случае должен сопровождаться изменением этой плоскости относительно переменных путевых потоков. Это объясняется тем, что в новом состоянии сети из-за изменчивости путевых потоков взаимное влияние путей является другим, а, значит, необходима коррекция распределения трафика. Так как взаимное информационное влияние путей, имеющих общие КС, приводит к дополнительной энтропии, то имеет место изменение приращения состояния каждого КС именно из-за одновременного его использования двумя и более путями, например в виде изменения числа инфцугов в УН или энтропии помех в КС. В связи с этим, учитывая линейную независимость выбранных путей, в качестве переменных криволинейного пространства необходимо использовать вторые частные производные \mathbf{r} :

$$\frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial q^j} = \frac{\partial^2 \mathbf{r}}{\partial q^i \partial q^j} = \mathbf{r}_{ij}, \quad i, j = 1, \dots, n. \quad (7.4)$$

Величины \mathbf{r}_{ij} в любом рассматриваемом локальном пространстве могут быть разложены по компонентам, в частности определяющим влияние такого одновременного воздействия путей на каждый путь в отдельности через изменение количества передаваемой информации в его составляющих КС. Это означает разложение векторов \mathbf{r}_{ij} в n -мерном локальном пространстве маршрутизации T_n по векторам локального репера \mathbf{r}_k :

$$\mathbf{r}_{ij} = \Gamma_{ij}^k \mathbf{r}_k, \quad (7.5)$$

где Γ_{ij}^k – коэффициенты разложения, называемые в тензорном анализе коэффициентами связности.

Важность коэффициентов Γ_{ij}^k можно упрощенно пояснить следующим образом. Криволинейное n -мерное пространство путевых потоков представляется в каждой его точке локальным пространством маршрутизации T_n . Из-за пересеченности в узлах коммутации различного количества путевой информации, приращения путевого трафика, оптимальное распределение последнего по КС в соседних точках состояния ИС различно. Эти изменения в геометрической интерпретации соответствуют движению n -мерной плоскости T_n в криволинейном пространстве – пространстве путевых потоков, кривизна которого и описывается коэффициентами связности. В связи с этим коррекция задач сетевого уровня в промежутках между соседними состояниями ИС должна непосредственно определяться коэффициентами связности.

В разд. 6 показано, что взаимное влияние путей друг на друга по отдельности можно описывать проекциями одних векторов на направления других, которые зависят от компонентов метрического тензора: $g_{ij}(q^1, \dots, q^n) = \mathbf{r}_i \mathbf{r}_j$. Поэтому в связной сети, где в каждой точке путевого пространства имеет место метрика в касающейся ее n -мерной плоскости, коэффициенты разложения можно получить через компоненты метрического тензора [48]. В этом случае их называют символами Кристоффеля первого или второго рода (в последнем случае используется контравариантный метрический тензор). Используя

свойство симметрии метрического тензора, правило взятия производных сложных функций, символы Кристоффеля первого рода можно записать [47, 133, 154]:

$$\Gamma_{k,ij} = \sum_{v=1}^m \frac{\partial x^v}{\partial q^k} \frac{\partial^2 x^v}{\partial q^i \partial q^j} . \quad (7.6)$$

Как видно, полученные коэффициенты связности первого рода для модели ИС представляются в виде суммы компонент, каждая из которых соответствует отдельному КС. Они характеризуют взаимное влияние множественного доступа в ИС и маршрутизации, которое определяется скалярным произведением в (7.6) соответствующих векторов. Аналогично, используя выражение для символов Кристоффеля второго рода [48], соответствующие коэффициенты связности можем представить [133, 151, 154]:

$$\Gamma_{ij}^k = \sum_{v=1}^m \frac{\partial q^k}{\partial x^v} \frac{\partial^2 x^v}{\partial q^i \partial q^j} . \quad (7.7)$$

Они выявляют процессы взаимного влияния множественного доступа и протоколов передачи в ИС. Коэффициенты связности (7.6) и (7.7) показывают, что состояние ИС помимо непосредственно алгоритмов маршрутизации, протоколов множественного доступа, передачи по каналам, зависит от привносимой ими взаимной энтропии, т.е. дополнительно характеризуется процессами взаимного их влияния.

Символы Кристоффеля позволяют связать проблему множественного доступа с топологией сети, алгоритмом маршрутизации и, одновременно с этим, с протоколами передачи информации, с качеством каналов. Другими словами, если обычно [4 – 6] множественный доступ представлялся с позиции канального уровня, то тензорный анализ позволяет эту проблему рассматривать относительно путевого пространства с использованием пространства КС, т.е. с позиций сетевого уровня, с учетом нижестоящих уровней (важная особенность!). Структурно-логическая схема алгоритма получения коэффициентов Кристоффеля второго рода приведена на рис. 7.1.

Особенными в схеме являются блоки вычисления частных производных и определения скалярного произведения. Первая частная производная $\frac{\partial q^i}{\partial x^v}$ характеризует влияние качества КС (УН) на приращение количества информации в путях. Она характеризует количество информации, приращенной в пути, на один инфцуг информации в канале. Вторая частная производная может быть определена путем определения дополнительного количества информации в канале, обусловленного приращением на один инфцуг количества информации в двух и более путях одновременно. В случае, например, предположения идеального захвата на один инфцуг приращения информации в каждом пути вторая частная производная будет иметь значение 0,5.

Процедура скалярного произведения сводится к определению степени взаимного информационного влияния рассмотренных выше приращений. В ее основу положена метрика касательного пространства в окрестности точки сопредельного состояния, которая описывается метрическим тензором q_{ij} .

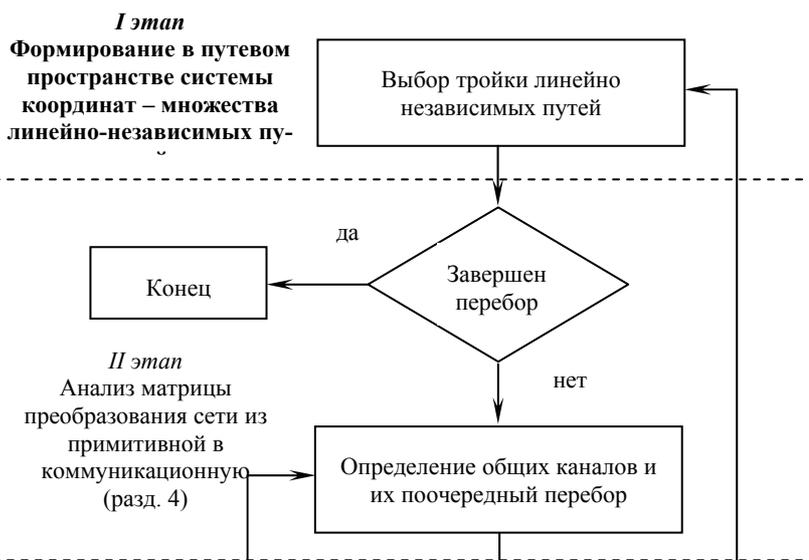


Рис. 7.1

**ЧАСТНЫЕ ПРОИЗВОДНЫЕ В ТЕРМИНАХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ
и влияние метрики на протоколы канального уровня**

Введенная в п. 4.5 ортогональная подразделенная модель ИС позволяет на основе определения метрического тензора путевого пространства

$$g_{ij} = \sum_{v=1}^m \frac{\partial x^v}{\partial q^i} \frac{\partial x^v}{\partial q^j}$$

представить метрику пространства КС (УН) в окрестности точки состояния нагруженной сети с помощью мультитензора вида:

$$g_{ij} = \begin{matrix} & \begin{matrix} A & B & \dots & a & b & \dots \end{matrix} \\ \begin{matrix} A \\ B \\ \vdots \\ a \\ b \\ \vdots \end{matrix} & \begin{matrix} \boxed{\begin{matrix} g_{AA} & g_{AB} & \dots & g_{Aa} & g_{Ab} & \dots \\ g_{BA} & g_{BB} & \dots & g_{Ba} & g_{Bb} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{aA} & g_{aB} & \dots & g_{aa} & g_{ab} & \dots \\ g_{bA} & g_{bB} & \dots & g_{ba} & g_{bb} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{matrix}} \end{matrix} \end{matrix} \quad (7.8)$$

где индексы A, B, \dots обозначают векторы, характеризующие приращения состояний соответствующих УН; индексы a, b, \dots – изменения количества передаваемой информации в соответствующих КС.

Каждый компонент метрического тензора может быть определен с использованием частных производных, рассмотренных в табл. 7.1. Скалярное произведение взятых из табл. 7.1 векторов будет характеризовать конкретный протокол. Его количественная характеристика – определяться непосредственно значениями косинусов углов, т.е. компонентами метрического тензора (7.8). Например, скалярным произведением векторов (с различными индексами) пункта 4 табл. 7.1 можно описать электромагнитную совместимость КС. При этом значения косинусов, используемые при скалярном произведении, будут соответствовать взаимному информационному влиянию каналов друг на друга через изменения количества передаваемой информации в рассматриваемом КС. Произведение векторов из пункта 8 табл. 7.1 будет характеризовать взаимное влияние входных (выходных) потоков на динамику состояния УН. Причем, если рассматривать только входные потоки, то косинус угла будет количественно характеризовать взаимное информационное влияние входящих в узел потоков, что соответствует проблеме множественного доступа. В случае, когда рассматриваются вектора с входящими и выходящими потоками проявляется протокол

ТАБЛИЦА 7.1

x^m – количество передаваемой информации (КПИ) в рассматриваемом КС		
1	$\frac{\partial x^m}{\partial \gamma^{ji}}$	Изменение КПИ в КС, вызванное приращением на единицу количества информации входного (внешнего) потока i -го УК
2	$\frac{\partial x^m}{\partial \lambda^{ji}}$	Изменение КПИ в КС, вызванное приращением на единицу количества информации внутриузлового потока (в том числе транзитного) i -го УК
3	$\frac{\partial x^m}{\partial \gamma^{mi}}$	Изменение КПИ в КС, вызванное приращением на единицу количества информации внешнего потока i -го КС (например, характеризующего внешние помехи)
4	$\frac{\partial x^m}{\partial \lambda^{mi}}$	Изменение КПИ в КС, вызванное приращением на единицу КПИ в i -м КС
x^j – количество уходящей (приходящей) информации рассматриваемого УН, т.е. количество информации, характеризующее динамику состояния УН		
5	$\frac{\partial x^j}{\partial \gamma^{ji}}$	Изменение динамики состояния УН, вызванное приращением на единицу количества информации во входном в i -й УК потоке
6	$\frac{\partial x^j}{\partial \lambda^{ji}}$	Изменение динамики состояния УН, вызванное приращением на единицу количества информации внутриузлового потока i -го УК (в том числе транзитного)
7	$\frac{\partial x^j}{\partial \gamma^{mi}}$	Изменение динамики состояния УН, вызванное приращением на единицу количества информации внешнего потока i -го КС (например, характеризующего внешние помехи)
8	$\frac{\partial x^j}{\partial \lambda^{mi}}$	Изменение динамики состояния УН, вызванное приращением на единицу КПИ в i -м КС

обслуживания, который также количественно может быть описан значениями косинусов углов. Следующим примером может служить скалярное произведение векторов из пунктов 5 и 6 табл. 7.1. Его результатом является взаимное информационное влияние транзитного трафика и входящего в узел внешнего потока.

Важно отметить, что во всех случаях количественная оценка взаимного информационного влияния определяется компонентами – значениями косинусов углов – метрического тензора. Используя табл. 7.1 и учитывая одновременное влияние потоков на состояние КС (УН), можно определить вторые частные производные. В этом случае в расчет берется количество информации, порождаемое в результате одновременного путевого воздействия.

Сетевой уровень предполагает рассмотрение криволинейного пространства меньшей размерности для всей системы. Рассмотрение линейно независимых путей (замкнутого и разомкнутого типов) позволяет указать степень влияния изменения количества информации в путях на количество передаваемой информации во всех КС и динамику состояния всех УН. В последнем случае проявляется проблема пересекающихся путей с позиции сетевого уровня. В этом случае, как отмечено ранее, важным является вычисление вторых частных производных, смысл которых рассмотрен в начале параграфа.

7.2. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ ПЕРЕНОС ВЕКТОРА ЛИНЕЙНОГО ПРИРАЩЕНИЯ СОСТОЯНИЯ СЕТИ

Предположим, в исходной точке M_0 линейное приращение состояния сети можно представить в виде вектора ξ . Рассмотрим условно «бесконечно близкое» состояние – точку M_1 , а точнее, определим, на сколько изменится вектор ξ , если мы будем его рассматривать в новой точке M_1 .

Так как состояния КС определяются путевыми потоками, проходящими через них, то для задания путевого информационного пространства в структуре ИС ограничимся транзитным трафиком²⁹. Связь m КС и n путей выразим параметрически:

$$x^v = x^v(q^1, \dots, q^n), \quad v = 1, \dots, m; \quad (7.8)$$

$$q^i = q^i(t), \quad i = 1, \dots, n.$$

Приращение кибернетической мощности $P_{ИС}$ сети определяется квадратичной формой Римана $dP_{ИС} = g_{ij} \xi^i \xi^j$. Значения координат ξ^i вектора линейного приращения состояния сети ξ вычисляются относительно локального репера в рассматриваемой точке M_0 :

$$\xi^i = \sum_{v=1}^m \frac{\partial x^v}{\partial q^i} dq^i. \quad (7.9)$$

Изменение состояния, т.е. переход в новую точку M_1 , зависит от двух составляющих: во-первых, от изменения во времени количества путевой информации; во-вторых, от «пересеченности» количества путевой информации, которая проявляется взаимозависимостью сетевых протоколов (в результате чего «бесполезно» расходуется часть системного ресурса сети).

Рассмотрим вторую составляющую, а именно: зафиксируем изменения количества информации в каналах относительно приращения количества путевой информации (т.е. представим эти изменения в виде сосредоточенных величин) и определим, насколько эти изменения будут соответствовать достаточно близкой точке состояния сети. Эта задача соответствует геометрической задаче параллельного переноса вектора в «бесконечно близкую» точку [155].

Задачу параллельного переноса вектора ξ представим следующим образом (рис. 7.2).

1. Рассмотрим вектор x в пространстве КС E_m , который приложен к точке M_0 и соответствует приращению количества информации в каналах. Очевидно, $x \equiv \xi$. Это объясняется простым фактом: в отдельно взятый момент времени независимо от геометрического представления

²⁹ В общем случае, согласно предложенной ортогональной модели, путевое пространство должно включать четыре подпространства.

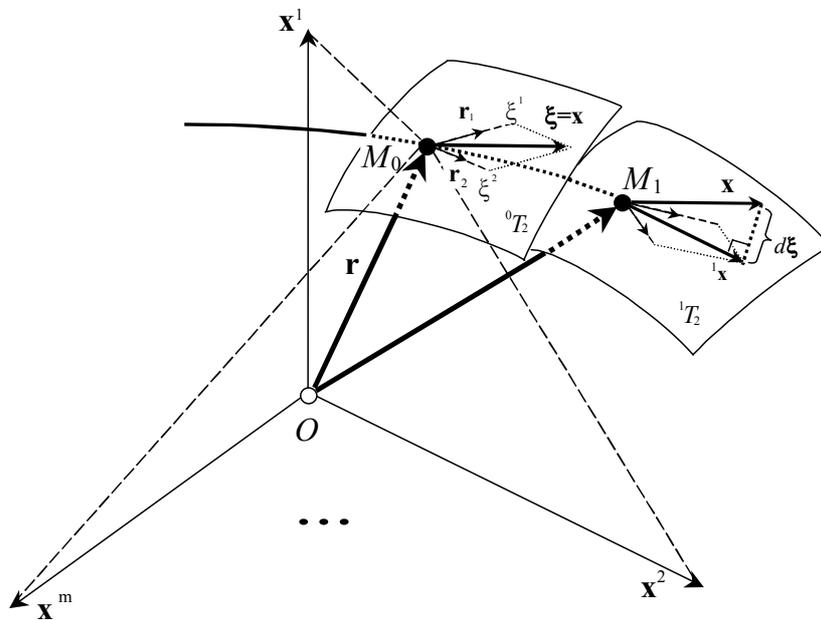


Рис. 7.2

приращение количества информации в КС по сети в целом и в путях этой же сети характеризуется одной и той же величиной – приращением кибернетической мощности.

2. Допустим ограничение, а именно: будем предполагать, что ИС находится в стационарном состоянии, но с постоянным коэффициентом «сноса» по каждому путевому потоку. Тогда в первом рассмотрении приращения кибернетической мощности в исходной точке состояния и в «бесконечно близко» можно считать примерно одинаковыми. В этом случае, если распределение потоков по КС в момент времени t_0 является оптимальным, то оно должно оставаться таковым и в момент времени t_1 , т.е. соответствующим условно бесконечно близкой точке M_1 . Геометрически такое предположение соответствует переносу вектора x из точки M_0 в новую точку M_1 .

Однако из дифференциальной геометрии и тензорного анализа известно [48], что «обычный» перенос вектора из одной точки в другую, из-за различия локальных реперов в них, в криволинейном пространстве неприменим.

3. В связи с указанным выше предположение об оптимальности распределения потоков в соседней точке не является справедливым и подлежит корректировке.

Любая нагруженная сеть связи обладает ограниченным ресурсом каналов. Из-за пересеченности путей в УК и КС приращение количества информации в путях при переходе в новое состояние сети вызовет дополнительное количество информации, а именно то, которое обусловлено взаимным влиянием сетевых процессов. Эта дополнительная информация потребует коррекции маршрутизации, т.е. частичного перераспределения трафика по КС. Такая ситуация соответствует геометрическому представлению в точке M_1 новой касательной плоскости, а значит, нового локального репера. В связи с этим оптимизация информационного распределения требует необходимой проекции рассматриваемого вектора x на новую n -мерную плоскость 1T_n .

Таким образом, следующим этапом является определение проекции перенесенного вектора x на касательную плоскость в бесконечно близкой точке M_1 , т.е. определение вектора 1x .

4. Так как векторы x и 1x имеют одну исходную точку состояния M_1 , то их можно сравнить относительно локального репера в этой точке. Эта разность, представленная в виде линейных приращений компонентов векторов состояний КС, выраженных через приращения информации в пересекающихся путях, и будет характеризовать дополнительное количество информации, обусловленное кривизной путевого пространства R_n .

Такая постановка задачи соответствует параллельному переносу в криволинейном пространстве вектора ξ и ранее геометрически решена Т. Леви-Чивита.

Представленная задача для ИС на геометрическом языке означает, что динамика загрузки КС, соответствующая путевому потоку в момент времени t_0 , оставаясь такой же до момента времени t_1 включительно, далее должна проектироваться на плоскость коррекции маршрутизации 1T_n . Это приведет к частичному перераспределению информации по КС с учетом кривизны путевого пространства. В результа-

те получается новый вектор потоковой ситуации, который в момент t_1 является касательным к линии изменения кибернетической мощности и соответствует оптимальной маршрутизации в этот момент времени. Вектор в пространстве состояний КС характеризует новые загрузки КС путевым трафиком в момент времени t_1 .

Согласно геометризации, приращение состояния каждого ν -го КС выражается через линейное приращение путевой информации следующим образом:

$$X^\alpha = \frac{\partial \mathbf{x}^\alpha}{\partial q^i} \xi^i. \quad (7.10)$$

С учетом (7.10), аналогично [47], определим разность векторов приращения количества передаваемой информации в канале, а именно, между параллельно перенесенным в новую точку и его же проекцией на плоскость маршрутизации 1T_n в пространстве состояний КС E_m через компоненты количества информации в путях в следующем виде:

$${}^1X^\nu - X^\nu = \left(\frac{\partial \mathbf{x}^\nu}{\partial q^i} \right) {}^1\xi^i - \frac{\partial \mathbf{x}^\nu}{\partial q^i} \xi^i, \quad (7.11)$$

где индексы слева означают величины, взятые в точке M_1 .

В новом состоянии сети необходимо использовать обновленное распределение потоков. Степень изменения состояния КС при приращении количества информации в i -м пути зависит от распределения трафика в предыдущий момент времени, которое считается оптимальным, и добавки, учитывающей дополнительную энтропию из-за пересеченности путевой информации (взаимного влияния сетевых процессов):

$$\left(\frac{\partial \mathbf{x}^\nu}{\partial q^i} \right) = \frac{\partial \mathbf{x}^\nu}{\partial q^i} + \frac{\partial^2 \mathbf{x}^\nu}{\partial q^i \partial q^j} dq^j, \quad j = 1, \dots, n. \quad (7.12)$$

Согласно (7.12), линейные приращения компонент переносимого контравариантного вектора обозначим дифференциалом $d\xi^i = {}^1\xi^i - \xi^i$. Учитывая (7.12), изменение распределения количества информации в каналах из-за корреляции путей, т.е. выражение (7.11), пренебрегая членом более высокого порядка малости, можно переписать в виде

$${}^1X^\alpha - X^\alpha = \frac{\partial \mathbf{x}^\alpha}{\partial q^i} d\xi^i + \frac{\partial^2 \mathbf{x}^\alpha}{\partial q^i \partial q^j} \xi^i dq^j. \quad (7.13)$$

Из (7.13) определяется квадрат вектора разности ${}^1\mathbf{x} - \mathbf{x}$:

$$({}^1\mathbf{x} - \mathbf{x})^2 = \sum_{\nu=1}^m \left(\frac{\partial \mathbf{x}^\nu}{\partial q^i} d\xi^i + \frac{\partial^2 \mathbf{x}^\nu}{\partial q^i \partial q^j} \xi^i dq^j \right)^2. \quad (7.14)$$

Для того чтобы вектор ${}^1\mathbf{x}$ являлся проекцией параллельно перенесенного вектора \mathbf{x} в точку M_1 необходимо, чтобы расстояние (7.14) было наименьшим. Для этого, как известно, необходимо произвести дифференцирование и результат приравнять к нулю. В частности, необходимо приравнять к нулю производные суммы (7.14) по всем величинам $d\xi^i, i = 1, \dots, n$. В результате относительно каждого пути i получим равенство

$$d\xi^i \sum_{\nu=1}^m \frac{\partial \mathbf{x}^\nu}{\partial q^i} \frac{\partial \mathbf{x}^\nu}{\partial q^k} + \xi^i dq^j \sum_{\alpha=1}^m \frac{\partial \mathbf{x}^\nu}{\partial q^k} \frac{\partial^2 \mathbf{x}^\nu}{\partial q^i \partial q^j} = 0. \quad (7.15)$$

Согласно определениям метрического тензора и символов Кристоффеля первого рода, из (7.15) следует

$$g_{ik}d\xi^i + \Gamma_{k,ij}\xi^i dq^j = 0. \quad (7.16)$$

С учетом $g^{kr}\Gamma_{k,ij} = \Gamma_{ij}^r$, имеет место выражение параллельного переноса [47] с использованием символов Кристоффеля второго рода:

$$d\xi^i = -\Gamma_{kj}^i \xi^j dq^k. \quad (7.17)$$

Как видно, линейные части приращения количества информации в точке M_1 , обусловленные, например, i -м путем, зависят от исходных данных ξ^j , т.е. изменений количества передаваемой информации в сети, вызванных i -м путем на момент t_0 , и от линейных приращений криволинейных координат точки, т.е. дифференциалов количества информации во всех выбранных линейно независимых путях dq^k . Коэффициентами пропорциональности являются коэффициенты связности Γ_{ij}^k , при помощи которых и осуществляется связь векторов приращения количества информации в точках сопредельных состояний, находящихся «бесконечно близко» друг от друга.

7.3. Ковариантный (абсолютный) дифференциал линейного приращения состояния сети. Ковариантная производная

Переход из точки M_0 в момент времени t_0 в бесконечно близкую точку M_1 нельзя осуществить заменой приращения дифференциалами. Это обусловлено тем, что дифференциалы не дадут правильного решения, так как $\xi^i(t)$ и $d\xi^i(t)$ являются тензорами в разных точках, а значит, отнесены к разным системам координат (локальным реперам). Чтобы их сравнить, необходимо совершить параллельный перенос одного тензора в точку, где определен другой, с целью использования одного репера. Таким образом, в тензорном исчислении приходят к понятию ковариантного (абсолютного) дифференциала $D\xi^i(t)$. Как известно [48], $D\xi^i(t)$ называют главную линейную часть разности между параллельно перенесенным тензором $\xi^i(t+dt)$ в точку M_0 и исходным тензором в этой точке $\xi^i(t)$:

$$D\xi^i(t) = d\xi^i(t) + \Gamma_{kp}^i \xi^p(t) dq^k. \quad (7.18)$$

Из (7.18) видно, что ковариантный дифференциал учитывает в качестве первой компоненты приращение информации, обусловленное динамикой потоков (первый член суммы), в качестве второй – добавку, определяемую при параллельном переносе, который, в свою очередь, зависит от кривизны путевого пространства.

Рассмотрим ситуацию, когда ИС находится в сопредельном (близком к предельному, после которого может наступить перегрузка сети) состоянии. В этом случае имеет место тензорное поле, заданное, как минимум, в некоторой n -мерной области информационного пространства. Координаты тензора в рассматриваемой точке являются функциями точки $\xi^i = \xi^i(q^1, \dots, q^n)$. Поэтому

$$d\xi^i = \frac{\partial \xi^i}{\partial q^k} dq^k. \quad (7.19)$$

С учетом (7.19) выражение (7.18) можно переписать в виде

$$D\xi^i = \nabla_k \xi^i dq^k, \quad (7.20)$$

где через $\nabla_k \xi^i$ обозначены коэффициенты при dq^k :

$$\nabla_k \xi^i = \frac{\partial \xi^i}{\partial q^k} + \Gamma_{kp}^i \xi^p. \quad (7.21)$$

Величина $\nabla_k \xi^i$ является ковариантной производной контравариантного тензора. Она имеет тензорный закон преобразования [48] и поэтому называется тензором.

Если рассматривать не передаваемое количество информации сетью, а находящееся в ней, т.е. ковариантную компоненту приращения количества информации, то можно использовать ковариантную производную ковариантного тензора [48]:

$$\nabla_k \xi_i = \frac{\partial \xi_i}{\partial q^k} - \Gamma_{ki}^p \xi_p. \quad (7.22)$$

Таким образом, исследование точки состояния нагруженной ИС сводится к определению ковариантной производной. При этом важнейшими задачами являются: во-первых, определение коэффициентов связности путевого пространства, характеризующих взаимную энтропию, привносимую системными характеристиками, т.е. взаимным влиянием маршрутизации, множественного доступа, протоколов передачи и др., и на их основе вычисление компонент, характеризующих параллельный перенос вектора линейного приращения количества информации в путевом пространстве; во-вторых, определение приращений количества информации в ИС, обусловленных изменениями путевых потоков, и их распределение по сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

-
-
1. **Клейнрок Л.** Коммуникационные сети (стохастические потоки и задержки сообщений): Пер. с англ. М.: Наука, 1970. 256 с.
 2. **Клейнрок Л.** Вычислительные системы с очередями: Пер. с англ. / Под ред. Б.С. Цыбакова. М.: Мир, 1979. 600 с.
 3. **Фрэнк Г., Фриш И.** Сети связи и потоки: Пер. с англ. М.: Связь, 1978. 448 с.
 4. **Шварц М.** Сети связи: протоколы, моделирование и анализ. В 2 ч.: Пер. с англ. М.: Наука; Гл. ред. физ-мат. лит., 1992. Ч. 1. 336 с.
 5. **Шварц М.** Сети ЭВМ. Анализ и проектирование: Пер. с англ. / Под ред. В.А. Жожикашвили. М.: Радио и связь, 1981. 336 с.
 6. **Бертсекас Д., Галлагер Р.** Сети передачи данных: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 544 с.
 7. **Советов Б.Я., Яковлев С.А.** Построение сетей интегрального обслуживания. Л.: Машиностроение, 1990. 332 с.
 8. **Мизин И.А., Богатырев В.А., Кулешов А.П.** Сети коммутации пакетов. М.: Радио и связь, 1986. 408 с.
 9. **Захаров Г.П.** Методы исследования сетей передачи данных. М.: Радио и связь, 1982. 208 с.
 10. **Протоколы** информационно-вычислительных сетей: Справочник / С.А. Аничкин, С.А. Белов, А.В. Бернштейн и др.; Под ред. И.А. Мизина, А.П. Кулешова. М.: Радио и связь, 1990. 504 с.
 11. **Информационные** сети и их анализ: Сборник / Под ред. А.Д. Харкевич, В.А. Гармаш. М.: Наука, 1972. 220 с.
 12. **Дэвис Д., Барбер Д., Прайс У.** Вычислительные сети и сетевые протоколы. М.: Мир, 1982.
 13. **Лазарев В.Г., Лазарев Ю.В.** Динамическое управление потоками информации в сетях связи. М.: Радио и связь, 1983. 216 с.
 14. **Пасечников И.И.** Информационные сети: Учеб. пособие. Тамбов: ТВАИИ, 2001. 64 с.

15. **Тарасик В.П.** Математическое моделирование технических систем: Учебник для вузов. М.: ДизайнПРО, 1997. 640 с.
16. **Гаранин М.В., Журавлев В.И., Кунегин С.В.** Системы и сети передачи информации: Учеб. пособие для вузов. М.: Радио и связь, 2001. 336 с.
17. **Берж К.** Теория графов и ее приложения. М.: Ин. лит., 1962. 319 с.
18. **Харари Ф.** Теория графов: Пер. с англ. М.: Мир, 1973. 386 с.
19. **Уилсон Р.** Введение в теорию графов: Пер. с англ. / Под ред. Г.П. Гаврилова. М.: Мир, 1977. 207с.
20. **Кристофидес Н.** Теория графов. Алгоритмический подход. М.: Мир, 1978. 432 с.
21. **Свами М., Тхуласираман К.** Графы, сети и алгоритмы: Пер. с англ. / Под ред. В.А. Горбатого. М.: Мир, 1984. 455 с.
22. **Татт У.Т.** Теория графов / Пер. с англ. Г.П. Гаврилова. М.: Мир, 1988. 424 с.
23. **Кофман А., Крюон Р.** Массовое обслуживание (теория и приложения) / Пер. с фр. под ред. И.Н. Коваленко. М.: Мир, 1965. 302 с.
24. **Клейнрок Л.** Теория массового обслуживания. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.
25. **Заде Л.А.** Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений // Математика сегодня / Сост. А.В. Шилейко. М.: Знания, 1974. С. 5 – 48.
26. **Белман Р., Заде Л.** Принятие решений в расплывчатых условиях // Вопросы анализа и процедуры принятия решений: Сб. переводов / Под ред. И.Ф. Шахнова. М.: Мир, 1976. С. 173 – 215.
27. **Заде Л.А.** Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 164 с.
28. **Кофман А.** Введение в теорию нечетких множеств / Пер. с фр. под ред. С.И. Травкина. М.: Радио и связь, 1982. 432 с.
29. **Кузьмин В.Б.** Построение групповых решений в пространствах четких и нечетких бинарных отношений. М.: Наука, 1982. 168 с.
30. **Кузьмин В.Б., Травкин С.И.** Теория нечетких множеств в задачах управления и принципах устройства нечетких процессоров // Обзор зарубежной литературы. Автоматика и телемеханика. 1992. № 11. С. 3 – 36.
31. **Нечеткие** множества в моделях управления и искусственного интеллекта / А.Н. Аверкин, И.З. Батыршин, А.Ф. Блишун и др.; Под ред. Д.А. Поспелова. М.: Наука, 1986. 316 с.
32. **Шапиро Д.И.** Принятие решений в системах организованного управления: использование расплывчатых категорий. М.: Энергоатомиздат, 1983. 184 с.
33. **Шапиро Д.И., Блищук А.Ф.** Выбор решений при нечетком описании системы // Алгоритмы и программы. 1978. № 1. 75 с.
34. **Нечеткие** множества и теория возможностей (последние достижения) / Под ред. Р. Ягер; Пер. с англ. под ред. С.И. Травкина. М.: Радио и связь, 1986. 406 с.
35. **Шер А.П.** Согласование нечетких экспертных оценок и функция принадлежности в методе размытых множеств // Моделирование и исследование систем автоматического управления. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1978. С. 111 – 118.
36. **Такеда Э.** Связность расплывчатых графов // Вопросы анализа и процедуры принятия решений: Сб. переводов / Под ред. И.Ф. Шахнова. М.: Мир, 1976. С. 173 – 215.
37. **Морозов А.Д.** Введение в теорию фракталов. М.: Институт компьютерных исследований, 2002. 159 с.
38. **Кроновер Р.М.** Фракталы и хаос в динамических системах. М.: Постмаркет, 2000. 352 с.
39. **Заборовский В.С.** Методы и средства исследований процессов в высокоскоростных компьютерных сетях: Дис. ... д-ра техн. наук. СПб.: СПбГТУ, 1999. 268 с.
40. **Шаров А.Н., Степанец В.А., Комашинский В.И.** Сети радиосвязи с пакетной передачей информации / Под ред. А.Н. Шарова. СПб.: ВАС им. С.М. Буденного, 1994. 216 с.
41. **Семисошенко М.А.** Управление автоматизированными сетями декаметрового диапазона в условиях сложной радиоэлектронной обстановки. СПб.: ВАС им. С.М. Буденного, 1997. 364 с.

42. **Мартынов В.И.** Синтез сети с коммутацией пакетов при нечетко заданных параметрах нагрузки // Электросвязь. 1999. № 5. С. 30 – 32.
43. **Крон Г.** Тензорный анализ сетей: Пер. с англ. / Под ред. Л.Т. Кузина, П. Г. Кузнецова. М.: Сов. радио, 1978. 719 с.
44. **Крон Г.** Исследование сложных систем по частям – диакоптика. М.: Наука, 1972. 542 с.
45. **Петров А.Е.** Тензорная методология в теории систем. М.: Радио и связь, 1985. 151 с.
46. **Хэпп Х.** Диакоптика и электрические цепи: Пер. с англ. / Под ред. В.Г. Миронова. М.: Мир, 1974. 342 с.
47. **Кочин Н.Е.** Векторное исчисление и начала тензорного исчисления. Л.–М.: ГОНТИ НКТП; Редакция техн.-теор. лит., 1938. 450 с.
48. **Рашевский П.К.** Риманова геометрия и тензорный анализ. М.: Наука, 1964. 664 с.
49. **Схоутен Я.А.** Тензорный анализ для физиков: Пер. с англ. / Под ред. И.В. Кеппена. М.: Наука, 1965. 456 с.
50. **Борисенко А.И., Тарапов И.Е.** Векторный анализ и начала тензорного исчисления. М.: Высшая школа, 1966. 252 с.
51. **Векуа И.Н.** Основы тензорного анализа и теория ковариантов. М.: Наука, 1978. 296 с.
52. **Победря Б.Е.** Лекции по тензорному анализу. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 214 с.
53. **Коренев Г.В.** Тензорное исчисление: Учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во МФТИ, 2000. 240 с.
54. **Димитриенко Ю.И.** Тензорное исчисление: Учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 2001. 575 с.
55. **Пат.** РФ № 2225074 МПК Н 04 L 29/02. Способ оценки информационных возможностей системы связи / Т.Я. Гораздовский, И.И. Пасечников. Заявл. 15.01.2002. Оpubл. 10.07.2003. Б.И. № 19.
56. **Арменский А.Е.** Тензорные методы построения информационных систем. М.: Наука, 1989. 148 с.
57. **Петров М.Н.** Исследование характеристик распределенных систем телекоммуникаций методом тензорного анализа и теории массового обслуживания: Дис. ... д-ра техн. наук. Красноярск: КрГУ, 1998. 240 с.
58. **Rubin J.** Distributed TDMA an approach to JTIDS Phase II. ITT Avionics Division. № 245, July 1979. P. 37.1 – 37.14.
59. **Джубин Дж., Торноу Дж. Д.** Протоколы пакетной радиосети DARPA // ТИИЭР. 1987. Т. 75, № 1. С. 26 – 41.
60. **Монзинго Р.А., Миллер Т.У.** Адаптивные антенные решетки: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1988. 448 с.
61. **Байндер Р., Хаффмен С.Д., Гуранц И., Вина П.А.** Архитектуры межспутниковых каналов для многоспутниковой системы связи // ТИИЭР. 1987. Т. 75, № 1. С. 90 – 99.
62. **Тихонов В.И., Харисов В.Н.** Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем: Учеб. пособие для вузов. М.: Радио и связь, 1991. 608 с.
63. **Зюко А.Г., Кловский Д.Д., Коржик В.И., Назаров М.В.** Теория электрической связи: Учебник для вузов / Под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь, 1998. 432 с.
64. **Прокис Дж.** Цифровая связь: Пер. с англ. / Под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.
65. **Хемминг Р.В.** Теория информации и теория кодирования. М.: Радио и связь, 1983. 174 с.
66. **Персли М.Б.** Расширение спектра сигналов в пакетных радиосетях // ТИИЭР. 1987. Т. 75, № 1. С. 140 – 162.
67. **Цыбаков Б.С., Бакиров В.Л.** Анализ устойчивости сети с коммутацией пакетов и его приложение к построению единого подхода к синхронным и асинхронным радиосетям с алгоритмом АЛОХА // Проблемы передачи информации. 1988. Т. XXIV. Вып. 2. С. 70 – 85.
68. **Хламтак И., Франта У.Р.** Высокоскоростные сети: Обоснование, направления развития, проблемы // Малый тем. выпуск «Скоростные сети связи». ТИИЭР. 1990. Т. 78. № 1. С. 63 – 90.

69. **Назаров С.В., Барсуков А.Г., Поляков В.П., Луговец А.В.** Локальные вычислительные сети: Принципы построения, архитектура, коммуникационные средства. М.: Финансы и статистика, 1994. 208 с.
70. **Дейвис Б.Х., Дейвис Т.Р.** Применение методов коммутации пакетов в тактических радиосетях // ТИИЭР. 1987. Т. 75, № 1. С. 53 – 68.
71. **Клейнрок Л., Сильвестр Дж.** Методы многократного использования пространства в многопролетных пакетных радиосетях // ТИИЭР. 1987. Т. 75, № 1. С. 187 – 200.
72. **Цыбаков, Б.С., Бакиров В.Л.** Передача пакетов в радиосетях // Проблемы передачи информации. 1985. Т. XXI. Вып. 1. С. 80 – 101.
73. **Трофимов А.Н., Таубин Ф.А.** Граница вероятности ошибки декодирования в канале с множественным доступом и помехами // Проблемы передачи информации. 1986. Т. XXII. Вып. 3. С. 3 – 15.
74. **Chlamtac I.** Distributed Nodes Organization Algorithm for Channel Access in a Multihop Dynamik Radio Network / I. Chlamtac, S. Pinter Shlomit. IEEE Trans. Commun. Vol. Com-36. 1987. P. 728 – 737.
75. **Маканси Т.** Transmitter-Oriented Code Assignment for Multihop Packet Radio. IEEE Trans. Commun. Vol. COM-35. December, 1987. P. 1379 – 1382.
76. **Дунчич Я.Г., Пасечников И.И.** Исследования характеристик потерь в радиосетях с ограниченной пропускной способностью канала множественного доступа // Научно-методические материалы по статистической радиотехнике / Под ред. В.Н. Харисова. М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1991.
77. **Смирнов В.А., Харисов В.Н., Эфендиев Р.Н., Дунчич Я.Г., Пасечников И.И. и др.** Научно-исследовательская работа на специальную тему // Отчет о НИР «Утес». № 190019. М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1991.
78. **Пасечников И.И.** На спец. тему: Дис. ... канд. техн. наук. ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1993. 156 с.
79. **Дунчич Я.Г., Пасечников И.И.** Научно-исследовательская работа на специальную тему // Отчет о НИР 33/НИО. М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1992. С. 37 – 44.
80. **Hauptschein A.** Recognition and Self-Organization of Nodes into DTDMA Nets.: IEEE Transactions on Aerospace and Electronic systems. July 1981. Vol. AES-17. P. 531 – 543.
81. **Дунчич Я.Г., Пасечников И.И.** Выбор структуры функционального канала в пакетной радиосети МИС СНО // Научно-методические материалы по статистической радиотехнике / Под ред. Л.А. Ершова. М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1992.
82. **Горев П.Г., Пасечников И.И.** Передача информации в подвижной пакетной радиосети с захватом // Журнал «Радиосистемы» совместно с журналом «Радиотехника». 1998. Вып. 28. № 1. С. 3 – 6.
83. **Пасечников И.И., Хоменко В.В.** Распространение маршрутной информации в пакетной радиосети с МДРВР // Российская научно-техническая конференция «Направления развития систем и средств радиосвязи». Воронеж: НИИС, 1996.
84. **Стюард Ян.** Число касания // В мире науки. 1992. № 4. Занимательная математика. С. 82 – 85.
85. **L. Ну.** Topology control for multihop packet radio networks // IEEE Trans. Commun. 1993. Vol. COM-41. № 10. P. 1474 – 1481.
86. **Бутрименко А.В.** О поиске кратчайших путей по графу при его изменениях // Техническая кибернетика. М.: Известия академии наук СССР, 1964. С. 55 – 58.
87. **Бель Р.К., Й.Х. ван Схуппен.** Распределенная маршрутизация для балансировки нагрузки // ТИИЭР. 1989. Т. 77, № 1. С. 185 – 199.
88. **Шаров А.Н.** Синтез алгоритмов адаптивной маршрутизации информационных потоков в многозональных сетях декаметрового диапазона // Радиотехника. 1996. № 10. С. 3 – 8.
89. **Пасечников И.И.** Анализ нагрузки в каналах ПРС АСОД с МДРВР при алгоритме маршрутизации, основанном на минимизации числа ретрансляций // Материалы межреспубликанской конференции

«Повышение эффективности средств обработки информации на базе математического и машинного моделирования». Тамбов: ТВВАИУ, 1995. С. 101 – 103.

90. **Смирнов В.А., Харисов В.Н., Эфендиев Р.Н., Дунчич Я.Г., Пасечников И.И. и др.** Научно-исследовательская работа на специальную тему // Отчет о НИР «Засечка» № 191210. М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1992.

91. **Пасечников И.И., Горев А.П., Киселев И.С.** Оценка эффективности информационного обмена в мобильной пакетной радиосети с использованием параметра «мощность» // Радиоэлектроника. 2002. № 3. С. 18 – 25.

92. **Пасечников И.И.** Передача информации в пакетной радиосети с захватом // Повышение эффективности методов и средств обработки информации на базе математического и машинного моделирования: Материалы V Всероссийской науч.-техн. конф. Тамбов: ТВАИИ, 1997. С. 175 – 176.

93. **Пасечников И.И.** Передача информации в пакетной радиосети с захватом и протоколом передачи с запросом // Радио и волоконно-оптическая связь, локация и навигация: Сб. тр. III Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж, 1997. С. 178 – 189.

94. **Егоров М.П., Пасечников И.И., Вотановский В.И. и др.** Научно-исследовательская работа на специальную тему // Отчет о НИР «Паланкин-96» № 29408. Тамбов: ВВАИУ, 1996.

95. **Пасечников И.И., Хоменко В.В.** Влияние интенсивности смены статуса линий связи на качество функционирования протокола обмена маршрутной информацией в пакетной радиосети МИС СНО // Повышение эффективности средств обработки информации на базе математического и машинного моделирования: Материалы IV Всерос. науч.-техн. конф. Тамбов: ТВВАИУ, 1995. С. 103 – 104.

96. **Пасечников И.И.** Связность воздушной ПРС АСОД с МДРВР при использовании служебного ФК с временным разделением по информационному признаку // Проблемы создания и испытаний авиационной техники, пути совершенствования подготовки кадров: Материалы науч.-практ. конф. ВВС. М.: ВВИА, 1996.

97. **Пасечников И.И., Горев А.П., Киселев И.С.** Модель пакетной радиосети УКВ диапазона с МДРВР // Повышение эффективности методов и средств обработки информации: Материалы VI Всерос. науч.-техн. конф. Тамбов: ТВАИИ, 2000. С. 124 – 126.

98. **Пасечников И.И., Горев А.П., Киселев И.С.** Передача пользовательской информации в ПРС АСОД с МДРВР // Повышение эффективности методов и средств обработки информации: Материалы VI Всерос. науч.-техн. конф. Тамбов: ТВАИИ, 2000. С. 128 – 130.

99. **Полак Э.** Численные методы оптимизации: Пер. с англ. / Под ред. И.А. Вателя. М.: Мир, 1974. 374 с.

100. **Брайсон А., Хо Ю-Ши.** Прикладная теория оптимального управления: оптимизация, оценка и управление: Пер. с англ. // Под ред. А.М. Летова. М.: Мир, 1972. 544 с.

101. **Веников В.А.** Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электродинамики): Учеб. пособие для вузов. Изд. 2-е, доп. и перераб. М.: Высшая школа, 1976. 479 с.

102. **Морозов В.И., Пономарев А.Т.** Математическое моделирование сложных аэродромных систем. М.: Физматлит, 1995. 736 с.

103. **Пасечников И.И., Войцеховский В.Ф., Гораздовский Т.Я.** О распространении строго детерминированного подхода на информационные сети // Математическое моделирование технологических систем: Сб. науч. тр. Воронеж: ВГТА, 1999. № 3. С. 36 – 43.

104. **А. с. СССР № 1107264 А МКИ 3 Н 03 В29.** Генератор случайной цифровой последовательности / В.А. Пулавский, А.В. Бессалов, И.И. Пасечников. Заявл. 7.08.84. Б.И. № 29.

105. **А. с. СССР № 1228234 А1 МКИ 3 Н 03 К3.** Генератор сигналов, кодированных по системе Морзе / И.И. Пасечников, А.А. Пулавский. Заявл. 30.04.86. Б.И. № 16.

106. **Кочегаров В.А., Фролов Г.А.** Проектирование систем распределения информации. Марковские и немарковские модели. М.: Радио и связь. 1991. 216 с.

107. **Игнатов В.А.** Теория информации и передачи сигналов: Учебник для вузов. М.: Сов. радио, 1979. 280 с.

108. **Гухман А.А.** Введение в теорию подобия: Учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1973. 296 с.

109. **Ольсон Г.** Динамические аналогии / Пер. с англ. Б.Л. Коробочкина; Под ред. М.А. Айзермана. М.: Государственное издательство иностранной литературы, 1947. 224 с.

110. **Сена Л.А.** Единицы физических величин и их размерности. М.: Наука, 1977. 336 с.

111. **Гораздовский Т.Я., Пасечников И.И., Киселев И.С.** О целесообразности использования в автоматических системах передачи информации кибернетических параметров «мощность» и кпд // Тр. Луганского отделения МАИ. Луганск, 2000. С. 17 – 34.
112. **Пасечников И.И., Гораздовский Т.Я.** О целесообразности использования в кибернетике информационных систем управления и автоматической связи параметра «Мощность» // Информация и технологии XXI века: Материалы I Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж: ВГУ, 2000.
113. **Гораздовский Т.Я.** Изложение ряда проблемных вопросов физики в процессе обучения и приятия навыков самостоятельного творчества обучающимся: Учеб. пособие. Тамбов: ТВВАИУ, 1998. 314 с.
114. **Янбых Г.Ф., Столяров Б.А.** Оптимизация информационно-вычислительных сетей. М.: Радио и связь, 1987. 232 с.
115. **Пасечников И.И., Гораздовский Т.Я., Горев А.П., Желонкин В.В.** Вариант построения структуры пакетной радиосети УКВ диапазона // Информационные технологии и системы: Материалы III Всерос. науч.-техн. конф. Воронеж: Гос. техн. академия, 1999.
116. **Пасечников И.И., Желонкин В.В.** Модель построения структур пакетных радиосетей // Перспективы развития средств и способов РЭБ: Материалы VI Межвузовской науч.-техн. конф. Воронеж, 2000.
117. **Пасечников И.И., Желонкин В.В.** К вопросу о структурном анализе пакетной радиосети // Повышение эффективности методов и средств обработки информации: Материалы VI Всерос. науч.-техн. конф. Тамбов: ВАИИ, 2000. С. 127 – 128.
118. **Пасечников И.И., Егоров М.П. и др.** Научно-исследовательская работа на специальную тему // Отчет о НИР «Безух-603Т», 2000. № 29831.
119. **Пасечников И.И., Желонкин В.В.** Способ построения ярусной пакетной радиосети // Перспективы развития средств, комплексов связи и особенности подготовки специалистов связи в современных условиях: Материалы Межвузовской науч.-техн. конф. Новочеркасск: НВИС, 2000.
120. **Желонкин В.В., Пасечников И.И.** Имитационная модель построения ярусных пакетных радиосетей // Перспективы развития средств, комплексов связи и особенности подготовки специалистов связи в современных условиях: Материалы Межвузовской науч.-техн. конф. Новочеркасск: НВИС, 2000.
121. **Горев П.Г., Гораздовский Т.Я., Пасечников И.И., Желонкин В.В.** Формирование структур пакетных радиосетей различной сложности // Радиотехника. 2001. № 4. С. 25 – 30.
122. **Горев П.Г., Гораздовский Т.Я., Пасечников И.И., Желонкин В.В.** Тороидальная структура пакетной радиосети с изменяемым циклом межсоединения // Радиотехника. 2002. № 5.
123. **Свид. 2002610052 РФ № 2001611597.** Модель формирования сложных структур пакетной радиосети (Сложная структура сети): Программа для ЭВМ / И.И. Пасечников, В.В. Желонкин, Ю.Ю. Громов и др. Заявл. 22.11.2001. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ Роспатента 21.01.2002.
124. **Свид. 2002610053 РФ № 2001611600.** Тороидальная структура информационной сети, адаптированная к уровню входной нагрузки: Программа для ЭВМ / И.И. Пасечников, В.В. Желонкин, Т.Я. Гораздовский и др. Заявл. 22.11.2001. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ Роспатента 21.01.2002.
125. **Свид. 2002610054 РФ № 2001611601.** Программная реализация алгоритма определения степени деформации детерминированной структуры мобильной радиосети: Программа для ЭВМ / И.И. Пасечников, В.В. Желонкин, В.А. Халин и др. Заявл. 22.11.2001. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ Роспатента 21.01.2002.
126. **Пасечников И.И., Желонкин В.В. и др.** Научно-исследовательская работа на специальную тему: Промежуточный отчет. Шифр «Меховщик». № 20037. Декабрь. 2000.
127. **Пасечников И.И., Желонкин В.В., Горев А.П. и др.** Научно-исследовательская работа на специальную тему: Промежуточный отчет. Шифр «Меховщик». № 20037. Декабрь. 2001.
128. **Шахам М., Уэсткотт Дж.** Тенденции развития архитектуры и протоколов систем пакетной радиосвязи // ТИИЭР. 1987. Т. 75, № 1. С. 100 – 119.
129. **Narraway J.J.** Shortest paths in regular grids // IEE Proc. Circuits Devices System. 1998. Vol. 145, № 10. P. 289 – 296.

130. **Максемчук Н.Ф., Эль Зарки М.** Маршрутизация и управление потоком передачи данных в высокоскоростных региональных сетях // ТИИЭР. 1990. Т. 78, № 1. С. 185 – 205.
131. **Видоменко В.П.** Состояние и перспективы развития теории сетевых топологий // Телекоммуникационные технологии. 1996. Вып. 1. С. 90 – 96.
132. **Паращук И.Б., Бобрик И.П.** Нечеткие множества в задачах анализа сетей связи. СПб.: ВУС, 2001. 80 с.
133. **Пасечников И.И.** Анализ и синтез цифровых сетей связи на основе тензорного модельного отображения. Тамбов: ТВАИИ, 2004. 179 с.
134. **Пасечников И.И.** Модельное отображение информационных сетей // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2002. Т. 45, № 4. С. 9 – 18.
135. **Пасечников И.И., Межуев А.М.** Синтез в модельном отображении сетей связи с использованием тензорной методологии // Радиолокация, навигация, связь: VIII Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж: ВГУ, 2002. 12 с.
136. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука: Гл. ред. физико-математической литературы, 1984. 831 с.
137. **Рашевский П.К.** Курс дифференциальной геометрии. М.: Гос. изд-во техн.-теор. лит., 1956. 420 с.
138. **Громов Ю.Ю., Пасечников И.И., Межуев А.М., Данилкин С.В., Иванова О.Г., Лагутин А.В., Тютюнник В.М.** Математическое моделирование информационных процессов сети заданной структуры // Инженерная физика. 2003. № 2. С. 35 – 42.
139. **Громов Ю.Ю., Пасечников И.И., Межуев А.М., Попов Н.С., Тютюнник В.М.** Ограничение на временную задержку при тензорной методологии анализа информационных сетей // Информационные системы и процессы: Сб. науч. тр. / Под ред. проф. В.М. Тютюнника. Тамбов: Изд-во «Нобелистика», 2003. Вып. 1. С. 72 – 84.
140. **Блэк Ю.** Сети ЭВМ: протоколы, стандарты, интерфейсы. М.: Мир, 1990. 506 с.
141. **Тобаги Ф.А.** Моделирование и анализ характеристик многопролетных пакетных радиосетей // ТИИЭР. 1978. Т. 75. № 1.
142. **Свидетельство** о регистрации программы для ЭВМ 2003610502 РФ. Оценка эффективности функционирования модели информационной сети заданной структуры с использованием параметров «кибернетическая мощность» и «коэффициент полезного действия» в смысле передачи информации (Эффективность модели информационной сети) / Ю.Ю. Громов, Н.А. Земской, О.Г. Иванова, А.В. Лагутин, А.М. Межуев, И.И. Пасечников (РФ). Заявл. 26.12.02; Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ Роспатента 25.02.03.
143. **Пасечников И.И.** К применению тензорного анализа в информационных сетях // Повышение эффективности методов и средств обработки информации: Материалы VI Всерос. науч.-техн. конф. Тамбов: ТВАИИ, 2000. С. 122 – 124.
144. **Пасечников И.И., Гораздовский Т.Я.** Использование тензорного подхода к расчету информационных сетей с очередями // Кибернетика и технологии XXI века: Материалы Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж: ВГТА, 2000.
145. **Гораздовский Т.Я., Пасечников И.И.** Использование тензорного анализа в сетях с автоматической передачей информации // Праці. 2000. № 2(3). С. 8 – 17.
146. **Гораздовский Т.Я., Горев П.Г., Пасечников И.И.** Понятие идеальности информационной сети // Радиотехника. 2000. Вып. 43. № 3. С. 39 – 44.
147. **Пасечников И.И., Межуев А.М.** Анализ модели сети связи в стационарном состоянии на основе тензорной методологии // Актуальные вопросы практической подготовки военных специалистов и пути повышения эффективности боевого применения средств связи, РТО и АСУ ВВС: Материалы ведомственной военно-науч. конф. (22 – 24 мая 2002 г.). Тамбов: ТВАИИ, 2002. С. 96 – 98.
148. **Пасечников И.И., Межуев А.М.** Способ оценки эффективности модели сети связи с заданной структурой в условиях высокой информационной нагрузки // Проблемы повышения боевой готовности,

боевого применения, технической эксплуатации и обеспечения безопасности полетов летательных аппаратов с учетом климатогеографических условий Сибири, Забайкалья и Дальнего Востока: Материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. (25 – 27 июня 2003 г.). Иркутск: ИВАИИ, 2003. Ч. 2. С. 85 – 88.

149. **Межуев А.М., Пасечников И.И.** Оценка эффективности модели сети связи с заданной структурой в условиях изменения входной информационной нагрузки // Проблемы повышения боевой готовности, боевого применения, технической эксплуатации и обеспечения безопасности полетов летательных аппаратов с учетом климатогеографических условий Сибири, Забайкалья и Дальнего Востока: Материалы

XIII Всерос. науч.-техн. конф. (25 – 27 июня 2003 г.). Иркутск: ИВАИИ, 2003. Ч. 2. С. 70 – 73.

150. **Пасечников И.И.** Методология тензорного анализа цифровых радиосетей // Радиотехника. 2004. № 3.

151. **Пасечников И.И.** Методология анализа нагруженных пакетных радиосетей // Перспективные методы обработки информации. Тамбов, 2004. С. 346 – 426.

152. **Дьяконов В.П.** Математическая система Maple V R3/R4/R5. М.: Солон, 1998. 400 с.

153. **Пасечников И.И.** Геометрическое совмещение пространств состояний каналов связи и путевых потоков в информационных сетях // Кибернетика и технологии XXI века: III Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж: ВГУ, 2002. С. 367 – 371.

154. **Пасечников И.И.** Коэффициенты связности в путевом информационном пространстве при тензорном анализе цифровых сетей связи. Тамбов: ТВАИИ, 2003. 15 с. Деп. В ЦСИФ МО РФ 1.10.03; Инв. № В5505.

155. **Пасечников И.И.** Параллельный перенос вектора количества информации в тензорном анализе информационных сетей // Кибернетика и технологии XXI века: III Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж: ВГУ, 2002. С. 372 – 379.

приложения

Приложение 1

ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫЙ АЛГОРИТМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСА КАНАЛА

В сети из 20 абонентов ($ABON = 20$) распределяется фиксированное количество временных окон. В матрице SVAS с вероятностью $P_{св}$ для каждого абонента определяется наличие связи со всеми остальными абонентами. После определения связности для каждого абонента определяется число его соседей и, таким образом, заполняется матрица соседей – SOSED. Если множество абонентов, которым распределены временные окна (на блок-схеме множество Z), является пустым, то на основании матрицы SOSED алгоритм выбирает абонента с наибольшим числом соседей (если таких несколько, то выбирается любой из них) и присваивает ему любой номер окна с соответствующим его занесением в матрицу распределенных временных окон – RASM. В противном случае он выбирает i -го абонента с наибольшим числом соседей и проводит анализ незанятых окон абонентами множеств C_i и C_i^* (на блок-схеме множество Y_i). Если это множество не пустое, то за абонентом i закрепляется любое временное окно из этого множества, в противном случае – окно из общего временного ресурса со случайным номером. Параллельно с распределением окон между

пространственно разделенными абонентами производится заполнение матрицы-вектора RASOK, которая отражает число абонентов, использующих одинаковые номера окон. Это позволяет определить количественный показатель K_n , характеризующий данный алгоритм.

Рассмотренный алгоритм близок к описанному в работах [74, 75]. Очевидно, реализация его возможна только при централизованном распределении окон в сети.

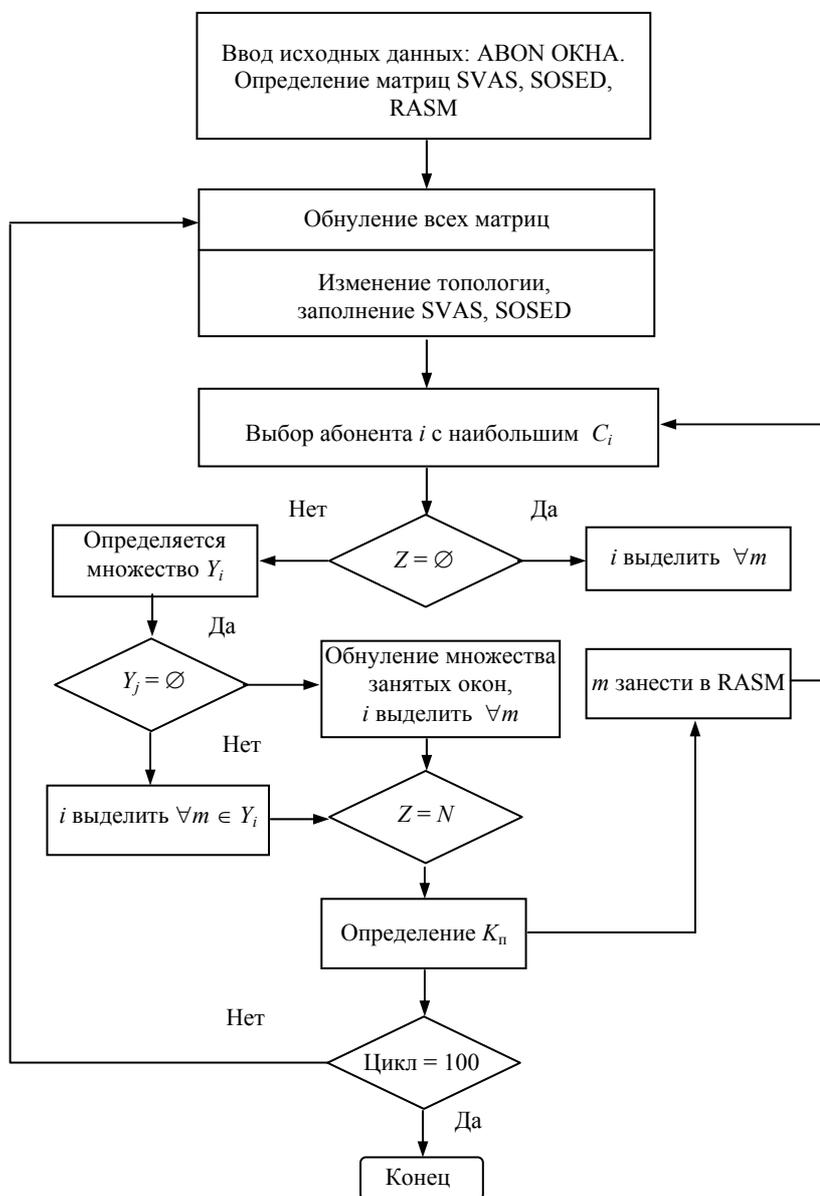
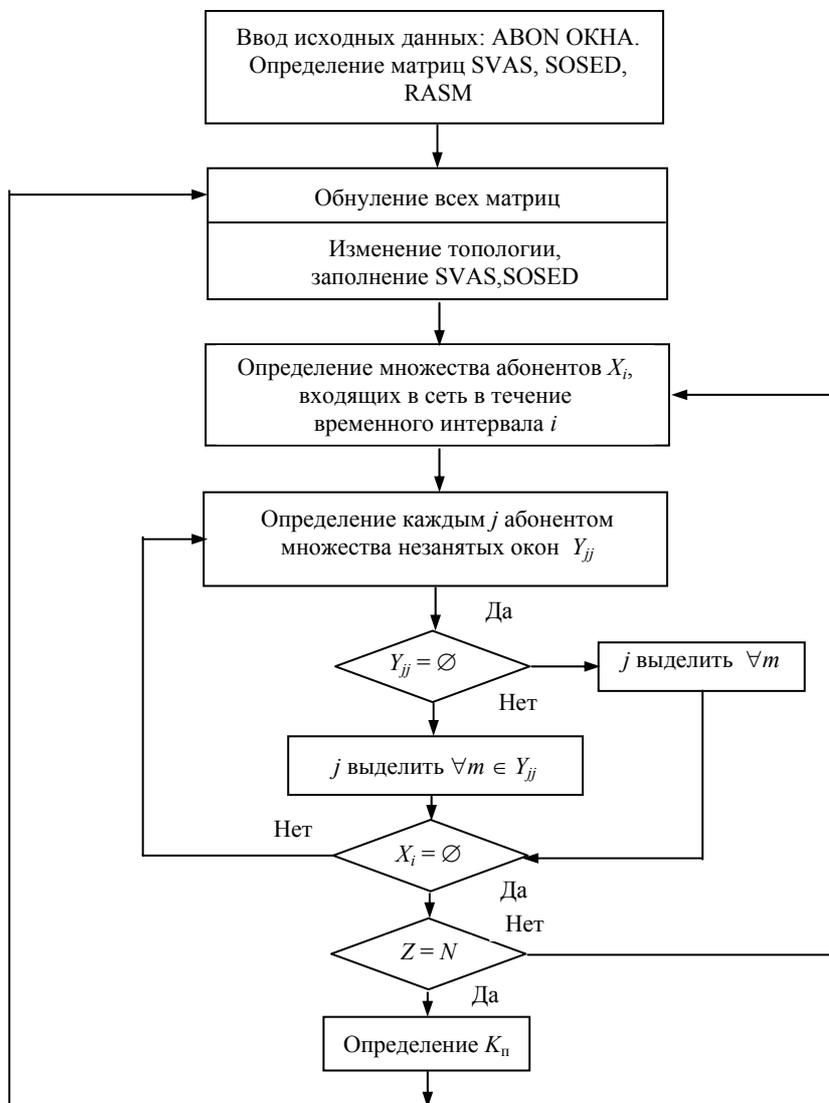


Рис. П1

В отличие от централизованного алгоритма, где распределение окон производилось последовательно с учетом анализа связности пространственно разделенных абонентов, при децентрализованном, распределенном алгоритме процедура выбора временного окна проводилась одновременно, независимо друг от друга абонентами, входящими в сеть в один интервал времени τ_i . При этом предполагалось, что такие абоненты независимо от того, когда начали процесс входа в сеть – в начале τ_i или в конце, успевают закрепить за собой окна на основе анализа занятых в предыдущие временные интервалы. Число абонентов в интервале τ_i определялось следующим образом. Моменты входа в сеть представлялись в виде пуассоновского потока с $\lambda = 1/\tau_i$. Затем весь временной интервал, в течение которого производилось разыгрывание моментов входа в сеть для всех абонентов, начиная с его начала, разбивался на последовательность подынтервалов τ_i . Число входов в сеть в течение τ_i , таким образом, определяло число одновременно входящих в нее абонентов в данном интервале.

Каждый j -й абонент, входящий в сеть в τ_i -й интервал времени, как и при централизованном алгоритме, определяет множество незанятых окон Y_{ij} абонентами множеств C_j, C_j^* и на основе анализа закрепляет за собой номер окна по рассмотренному выше принципу.

Конкретизация подобного алгоритма для случая ПРС с МДРВР с распределенным временным разделением каналов дана в работе [78]. Очевидно, характеристики данного алгоритма существенно зависят от порядка вхождения абонентов в сеть. Если абоненты входят в сеть по одному, то алгоритм 2, в сущности, мало отличается от централизованного алгоритма. С другой стороны, если все абоненты входят в сеть одновременно, то распределение окон в итоге окажется неконтролируемым.



ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНО НЕОБХОДИМОГО ЧИСЛА ВРЕМЕННЫХ ОКОН

Матрицы, SVAS, RASM и множество Z имеют такой же физический смысл, что и в рассмотренных моделях п. 4.1. Алгоритм работает следующим образом. Вначале выбирается любой абонент сети и закрепляется за ним первое окно. После чего абонент включается в множество абонентов Z , за которыми закреплены временные окна. Затем выбирается таким же образом следующий i -й абонент и делается попытка закрепления за ним первого окна. Для этого производится анализ абонентов множеств C_i и C_i^* . Если среди них нет абонента с закрепленным первым окном, то абоненту i распределяется первое окно. В противном случае рассматривается номер окна, на единицу больший, т.е. 2, и производится попытка его распределения данному абоненту. Процесс попыток закрепления временных окон с возрастанием их номеров продолжается до тех пор, пока не найдется такой номер, который не распределен ни за одним из абонентов множеств C_i и C_i^* . По окончании данной процедуры выбирается следующий $(i + 1)$ -й абонент и процесс повторяется, начиная с первого номера окна. После того как за всеми абонентами закреплены временные окна, определяется наибольший номер окна из распределенных и считается, что число окон, соответствующее ему, является минимально необходимым при рассмотренной топологической ситуации.

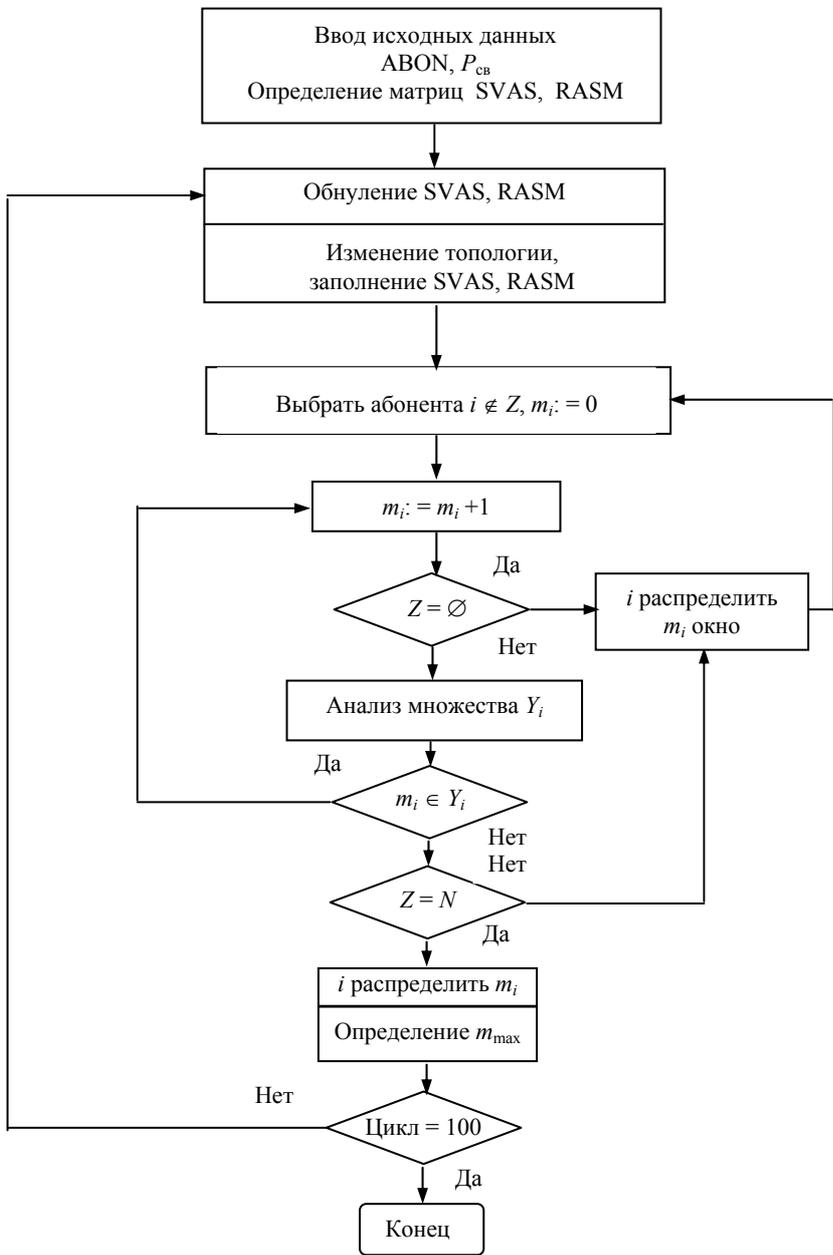


Рис. ПЗ

Формирование сложной логической структуры для ЦРС

$E = \{A, B\}, L = \{0, \alpha, \beta, \gamma, 1\}$, L – структура булевой решетки (т.е. дистрибутивная с дополнением)

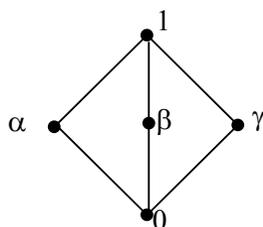


РИС. П4.1

Результаты выполнения операций Δ, ∇ на L :

ТАБЛИЦА П4.1

Δ	0	α	β	γ	1
0	0	0	0	0	0
α	0	α	0	0	α
β	0	0	β	0	β
γ	0	0	0	γ	γ
1	0	α	β	γ	1

ТАБЛИЦА П4.2

∇	0	α	β	γ	1
0	0	α	β	γ	1
α	α	α	1	1	1
β	β	1	β	1	1
γ	γ	1	1	γ	γ
1	1	1	1	1	1

Множество отображений E в $L (L^E)$ представим в виде совокупности:

$$\begin{aligned}
 L^E = & \{ (A/0), (B/0) \} = X_1 & \{ (A/\beta), (B/\gamma) \} = X_{14} \\
 & \{ (A/0), (B/\alpha) \} = X_2 & \{ (A/\beta), (B/1) \} = X_{15} \\
 & \{ (A/0), (B/\beta) \} = X_3 & \{ (A/\gamma), (B/0) \} = X_{16} \\
 & \{ (A/0), (B/\gamma) \} = X_4 & \{ (A/\gamma), (B/\alpha) \} = X_{17} \\
 & \{ (A/0), (B/1) \} = X_5 & \{ (A/\gamma), (B/\beta) \} = X_{18} \\
 & \{ (A/\alpha), (B/0) \} = X_6 & \{ (A/\gamma), (B/\gamma) \} = X_{19} \\
 & \{ (A/\alpha), (B/\alpha) \} = X_7 & \{ (A/\gamma), (B/1) \} = X_{20} \\
 & \{ (A/\alpha), (B/\beta) \} = X_8 & \{ (A/1), (B/0) \} = X_{21} \\
 & \{ (A/\alpha), (B/\gamma) \} = X_9 & \{ (A/1), (B/\alpha) \} = X_{22} \\
 & \{ (A/\alpha), (B/1) \} = X_{10} & \{ (A/1), (B/\beta) \} = X_{23} \\
 & \{ (A/\beta), (B/0) \} = X_{11} & \{ (A/1), (B/\gamma) \} = X_{24} \\
 & \{ (A/\beta), (B/\alpha) \} = X_{12} & \{ (A/1), (B/1) \} = X_{25} \\
 & \{ (A/\beta), (B/\gamma) \} = X_{13} &
 \end{aligned}
 \tag{П4.1}$$

Определение пересечения нечетких подмножеств для построения структуры:

$$\begin{aligned}
 X_1 \sqcap X_1 &= X_1 \sqcap X_6 = X_1 \sqcap X_{11} = X_1 \sqcap X_{16} = X_1 \sqcap X_{21} = \\
 X_1 & \quad X_1 \quad X_1 \quad X_1 \quad X_1
 \end{aligned}$$

$$\begin{array}{l}
X_6 \sqcap X_1 = X_6 \sqcap X_6 = X_6 \sqcap X_{11} = X_6 \sqcap X_{16} = X_6 \sqcap X_{21} = \\
X_1 \quad \quad X_6 \quad \quad X_1 \quad \quad X_1 \quad \quad X_6 \\
X_6 \sqcap X_2 = X_6 \sqcap X_7 = X_6 \sqcap X_{12} = X_6 \sqcap X_{17} = X_6 \sqcap X_{22} = \\
X_1 \quad \quad X_6 \quad \quad X_1 \quad \quad X_1 \quad \quad X_6 \\
X_6 \sqcap X_3 = X_6 \sqcap X_8 = X_6 \sqcap X_{13} = X_6 \sqcap X_{18} = X_6 \sqcap X_{23} = \\
X_1 \quad \quad X_6 \quad \quad X_1 \quad \quad X_1 \quad \quad X_6 \\
X_6 \sqcap X_4 = X_6 \sqcap X_9 = X_6 \sqcap X_{14} = X_6 \sqcap X_{19} = X_6 \sqcap X_{24} = \\
X_1 \quad \quad X_6 \quad \quad X_1 \quad \quad X_1 \quad \quad X_6 \\
X_6 \sqcap X_5 = X_6 \sqcap X_{10} = X_6 \sqcap X_{15} = X_6 \sqcap X_{20} = X_6 \sqcap X_{25} = \\
X_1 \quad \quad X_6 \quad \quad X_1 \quad \quad X_1 \quad \quad X_6 \\
X_7 \sqcap X_1 = X_7 \sqcap X_6 = X_7 \sqcap X_{11} = X_7 \sqcap X_{16} = X_7 \sqcap X_{21} = \\
X_1 \quad \quad X_6 \quad \quad X_1 \quad \quad X_1 \quad \quad X_6 \\
X_7 \sqcap X_2 = X_7 \sqcap X_7 = X_7 \sqcap X_{12} = X_7 \sqcap X_{17} = X_7 \sqcap X_{22} = \\
X_2 \quad \quad X_7 \quad \quad X_2 \quad \quad X_2 \quad \quad X_7 \\
X_7 \sqcap X_3 = X_7 \sqcap X_8 = X_7 \sqcap X_{13} = X_7 \sqcap X_{18} = X_7 \sqcap X_{23} = \\
X_1 \quad \quad X_6 \quad \quad X_1 \quad \quad X_1 \quad \quad X_6 \\
X_7 \sqcap X_4 = X_7 \sqcap X_9 = X_7 \sqcap X_{14} = X_7 \sqcap X_{19} = X_7 \sqcap X_{24} = \\
X_1 \quad \quad X_6 \quad \quad X_1 \quad \quad X_1 \quad \quad X_6 \\
X_7 \sqcap X_5 = X_7 \sqcap X_{10} = X_7 \sqcap X_{15} = X_7 \sqcap X_{20} = X_7 \sqcap X_{25} = \\
X_2 \quad \quad X_7 \quad \quad X_2 \quad \quad X_2 \quad \quad X_7 \\
X_8 \sqcap X_1 = X_8 \sqcap X_6 = X_8 \sqcap X_{11} = X_8 \sqcap X_{16} = X_8 \sqcap X_{21} = \\
X_1 \quad \quad X_6 \quad \quad X_1 \quad \quad X_1 \quad \quad X_6 \\
X_8 \sqcap X_2 = X_8 \sqcap X_7 = X_8 \sqcap X_{12} = X_8 \sqcap X_{17} = X_8 \sqcap X_{22} = \\
X_1 \quad \quad X_6 \quad \quad X_1 \quad \quad X_1 \quad \quad X_6 \\
X_8 \sqcap X_3 = X_8 \sqcap X_8 = X_8 \sqcap X_{13} = X_8 \sqcap X_{18} = X_8 \sqcap X_{23} = \\
X_3 \quad \quad X_8 \quad \quad X_3 \quad \quad X_3 \quad \quad X_8 \\
X_8 \sqcap X_4 = X_8 \sqcap X_9 = X_8 \sqcap X_{14} = X_8 \sqcap X_{19} = X_8 \sqcap X_{24} = \\
X_1 \quad \quad X_6 \quad \quad X_1 \quad \quad X_1 \quad \quad X_6 \\
X_8 \sqcap X_5 = X_8 \sqcap X_{10} = X_8 \sqcap X_{15} = X_8 \sqcap X_{20} = X_8 \sqcap X_{25} = \\
X_3 \quad \quad X_8 \quad \quad X_3 \quad \quad X_3 \quad \quad X_8 \\
X_9 \sqcap X_1 = X_9 \sqcap X_6 = X_9 \sqcap X_{11} = X_9 \sqcap X_{16} = X_9 \sqcap X_{21} = \\
X_1 \quad \quad X_6 \quad \quad X_1 \quad \quad X_1 \quad \quad X_6 \\
X_9 \sqcap X_2 = X_9 \sqcap X_7 = X_9 \sqcap X_{12} = X_9 \sqcap X_{17} = X_9 \sqcap X_{22} = \\
X_1 \quad \quad X_6 \quad \quad X_1 \quad \quad X_1 \quad \quad X_6 \\
X_9 \sqcap X_3 = X_9 \sqcap X_8 = X_9 \sqcap X_{13} = X_9 \sqcap X_{18} = X_9 \sqcap X_{23} = \\
X_1 \quad \quad X_6 \quad \quad X_1 \quad \quad X_1 \quad \quad X_6 \\
X_9 \sqcap X_4 = X_9 \sqcap X_9 = X_9 \sqcap X_{14} = X_9 \sqcap X_{19} = X_9 \sqcap X_{24} = \\
X_4 \quad \quad X_9 \quad \quad X_4 \quad \quad X_4 \quad \quad X_9 \\
X_9 \sqcap X_5 = X_9 \sqcap X_{10} = X_9 \sqcap X_{15} = X_9 \sqcap X_{20} = X_9 \sqcap X_{25} = \\
X_4 \quad \quad X_9 \quad \quad X_4 \quad \quad X_4 \quad \quad X_9 \\
X_{10} \sqcap X_1 = X_{10} \sqcap X_6 = X_{10} \sqcap X_{11} = X_{10} \sqcap X_{16} = X_{10} \sqcap X_{21} = \\
X_1 \quad \quad X_6 \quad \quad X_1 \quad \quad X_1 \quad \quad X_6 \\
X_{10} \sqcap X_2 = X_{10} \sqcap X_7 = X_{10} \sqcap X_{12} = X_{10} \sqcap X_{17} = X_{10} \sqcap X_{22} = \\
X_2 \quad \quad X_7 \quad \quad X_2 \quad \quad X_2 \quad \quad X_7 \\
X_{10} \sqcap X_3 = X_{10} \sqcap X_8 = X_{10} \sqcap X_{13} = X_{10} \sqcap X_{18} = X_{10} \sqcap X_{23} = \\
X_3 \quad \quad X_8 \quad \quad X_3 \quad \quad X_3 \quad \quad X_8 \\
X_{10} \sqcap X_4 = X_{10} \sqcap X_9 = X_{10} \sqcap X_{14} = X_{10} \sqcap X_{19} = X_{10} \sqcap X_{24} = \\
X_4 \quad \quad X_9 \quad \quad X_4 \quad \quad X_4 \quad \quad X_9
\end{array}$$

$$\begin{array}{l}
X_{14} \sqcap X_4 = X_{14} \sqcap X_9 = X_{14} \sqcap X_{14} = X_{14} \sqcap X_{19} = X_{14} \sqcap X_{24} = \\
X_4 \quad X_4 \quad X_{14} \quad X_4 \quad X_{14} \\
X_{14} \sqcap X_5 = X_{14} \sqcap X_{10} = X_{14} \sqcap X_{15} = X_{14} \sqcap X_{20} = X_{14} \sqcap X_{25} = \\
X_4 \quad X_4 \quad X_{14} \quad X_4 \quad X_{14} \\
X_{15} \sqcap X_1 = X_{15} \sqcap X_6 = X_{15} \sqcap X_{11} = X_{15} \sqcap X_{16} = X_{15} \sqcap X_{21} = \\
X_1 \quad X_1 \quad X_{11} \quad X_1 \quad X_{11} \\
X_{15} \sqcap X_2 = X_{15} \sqcap X_7 = X_{15} \sqcap X_{12} = X_{15} \sqcap X_{17} = X_{15} \sqcap X_{22} = \\
X_2 \quad X_2 \quad X_{12} \quad X_2 \quad X_{12} \\
X_{15} \sqcap X_3 = X_{15} \sqcap X_8 = X_{15} \sqcap X_{13} = X_{15} \sqcap X_{18} = X_{15} \sqcap X_{23} = \\
X_3 \quad X_3 \quad X_{13} \quad X_3 \quad X_{13} \\
X_{15} \sqcap X_4 = X_{15} \sqcap X_9 = X_{15} \sqcap X_{14} = X_{15} \sqcap X_{19} = X_{15} \sqcap X_{24} = \\
X_4 \quad X_4 \quad X_{14} \quad X_4 \quad X_{14} \\
X_{15} \sqcap X_5 = X_{15} \sqcap X_{10} = X_{15} \sqcap X_{15} = X_{15} \sqcap X_{20} = X_{15} \sqcap X_{25} = \\
X_5 \quad X_5 \quad X_{15} \quad X_5 \quad X_{15} \\
X_{16} \sqcap X_1 = X_{16} \sqcap X_6 = X_{16} \sqcap X_{11} = X_{16} \sqcap X_{16} = X_{16} \sqcap X_{21} = \\
X_1 \quad X_1 \quad X_1 \quad X_{16} \quad X_{16} \\
X_{16} \sqcap X_2 = X_{16} \sqcap X_7 = X_{16} \sqcap X_{12} = X_{16} \sqcap X_{17} = X_{16} \sqcap X_{22} = \\
X_1 \quad X_1 \quad X_1 \quad X_{16} \quad X_{16} \\
X_{16} \sqcap X_3 = X_{16} \sqcap X_8 = X_{16} \sqcap X_{13} = X_{16} \sqcap X_{18} = X_{16} \sqcap X_{23} = \\
X_1 \quad X_1 \quad X_1 \quad X_{16} \quad X_{16} \\
X_{16} \sqcap X_4 = X_{16} \sqcap X_9 = X_{16} \sqcap X_{14} = X_{16} \sqcap X_{19} = X_{16} \sqcap X_{24} = \\
X_1 \quad X_1 \quad X_1 \quad X_{16} \quad X_{16} \\
X_{16} \sqcap X_5 = X_{16} \sqcap X_{10} = X_{16} \sqcap X_{15} = X_{16} \sqcap X_{20} = X_{16} \sqcap X_{25} = \\
X_1 \quad X_1 \quad X_1 \quad X_{16} \quad X_{16} \\
X_{17} \sqcap X_1 = X_{17} \sqcap X_6 = X_{17} \sqcap X_{11} = X_{17} \sqcap X_{16} = X_{17} \sqcap X_{21} = \\
X_1 \quad X_1 \quad X_1 \quad X_{16} \quad X_{16} \\
X_{17} \sqcap X_2 = X_{17} \sqcap X_7 = X_{17} \sqcap X_{12} = X_{17} \sqcap X_{17} = X_{17} \sqcap X_{22} = \\
X_2 \quad X_2 \quad X_2 \quad X_{17} \quad X_{17} \\
X_{17} \sqcap X_3 = X_{17} \sqcap X_8 = X_{17} \sqcap X_{13} = X_{17} \sqcap X_{18} = X_{17} \sqcap X_{23} = \\
X_1 \quad X_1 \quad X_1 \quad X_{16} \quad X_{16} \\
X_{17} \sqcap X_4 = X_{17} \sqcap X_9 = X_{17} \sqcap X_{14} = X_{17} \sqcap X_{19} = X_{17} \sqcap X_{24} = \\
X_1 \quad X_1 \quad X_1 \quad X_{16} \quad X_{16} \\
X_{17} \sqcap X_5 = X_{17} \sqcap X_{10} = X_{17} \sqcap X_{15} = X_{17} \sqcap X_{20} = X_{17} \sqcap X_{25} = \\
X_2 \quad X_2 \quad X_{12} \quad X_{17} \quad X_{17} \\
X_{18} \sqcap X_1 = X_{18} \sqcap X_6 = X_{18} \sqcap X_{11} = X_{18} \sqcap X_{16} = X_{18} \sqcap X_{21} = \\
X_1 \quad X_1 \quad X_1 \quad X_{16} \quad X_{16} \\
X_{18} \sqcap X_2 = X_{18} \sqcap X_7 = X_{18} \sqcap X_{12} = X_{18} \sqcap X_{17} = X_{18} \sqcap X_{22} = \\
X_1 \quad X_1 \quad X_1 \quad X_{16} \quad X_{16} \\
X_{18} \sqcap X_3 = X_{18} \sqcap X_8 = X_{18} \sqcap X_{13} = X_{18} \sqcap X_{18} = X_{18} \sqcap X_{23} = \\
X_3 \quad X_3 \quad X_3 \quad X_{18} \quad X_{18} \\
X_{18} \sqcap X_4 = X_{18} \sqcap X_9 = X_{18} \sqcap X_{14} = X_{18} \sqcap X_{19} = X_{18} \sqcap X_{24} = \\
X_1 \quad X_1 \quad X_1 \quad X_{16} \quad X_{16} \\
X_{18} \sqcap X_5 = X_{18} \sqcap X_{10} = X_{18} \sqcap X_{15} = X_{18} \sqcap X_{20} = X_{18} \sqcap X_{25} = \\
X_3 \quad X_3 \quad X_3 \quad X_{18} \quad X_{18} \\
X_{19} \sqcap X_1 = X_{19} \sqcap X_6 = X_{19} \sqcap X_{11} = X_{19} \sqcap X_{16} = X_{19} \sqcap X_{21} = \\
X_1 \quad X_1 \quad X_1 \quad X_{16} \quad X_{16} \\
X_{19} \sqcap X_2 = X_{19} \sqcap X_7 = X_{19} \sqcap X_{12} = X_{19} \sqcap X_{17} = X_{19} \sqcap X_{22} = \\
X_1 \quad X_1 \quad X_1 \quad X_{16} \quad X_{16}
\end{array}$$

$$\begin{array}{l}
X_{24} \sqcap X_2 = X_{24} \sqcap X_7 = X_{24} \sqcap X_{12} = X_{24} \sqcap X_{17} = X_{24} \sqcap X_{22} = \\
X_1 \quad X_6 \quad X_{11} \quad X_{16} \quad X_{21} \\
X_{24} \sqcap X_3 = X_{24} \sqcap X_8 = X_{24} \sqcap X_{13} = X_{24} \sqcap X_{18} = X_{24} \sqcap X_{23} = \\
X_1 \quad X_6 \quad X_{11} \quad X_{16} \quad X_{21} \\
X_{24} \sqcap X_4 = X_{24} \sqcap X_9 = X_{24} \sqcap X_{14} = X_{24} \sqcap X_{19} = X_{24} \sqcap X_{24} = \\
X_4 \quad X_9 \quad X_{14} \quad X_{19} \quad X_{24} \\
X_{24} \sqcap X_5 = X_{24} \sqcap X_{10} = X_{24} \sqcap X_{15} = X_{24} \sqcap X_{20} = X_{24} \sqcap X_{25} = \\
X_4 \quad X_9 \quad X_{14} \quad X_{19} \quad X_{24} \\
X_{25} \sqcap X_1 = X_{25} \sqcap X_6 = X_{25} \sqcap X_{11} = X_{25} \sqcap X_{16} = X_{25} \sqcap X_{21} = \\
X_1 \quad X_6 \quad X_{11} \quad X_{16} \quad X_{21} \\
X_{25} \sqcap X_2 = X_{25} \sqcap X_7 = X_{25} \sqcap X_{12} = X_{25} \sqcap X_{17} = X_{25} \sqcap X_{22} = \\
X_2 \quad X_7 \quad X_{12} \quad X_{17} \quad X_{22} \\
X_{25} \sqcap X_3 = X_{25} \sqcap X_8 = X_{25} \sqcap X_{13} = X_{25} \sqcap X_{18} = X_{25} \sqcap X_{23} = \\
X_3 \quad X_8 \quad X_{13} \quad X_{18} \quad X_{23} \\
X_{25} \sqcap X_4 = X_{25} \sqcap X_9 = X_{25} \sqcap X_{14} = X_{25} \sqcap X_{19} = X_{25} \sqcap X_{24} = \\
X_4 \quad X_9 \quad X_{14} \quad X_{19} \quad X_{24} \\
X_{25} \sqcap X_5 = X_{25} \sqcap X_{10} = X_{25} \sqcap X_{15} = X_{25} \sqcap X_{20} = X_{25} \sqcap X_{25} = \\
X_5 \quad X_{10} \quad X_{15} \quad X_{20} \quad X_{25}
\end{array}$$

Полученная логическая структура сети:

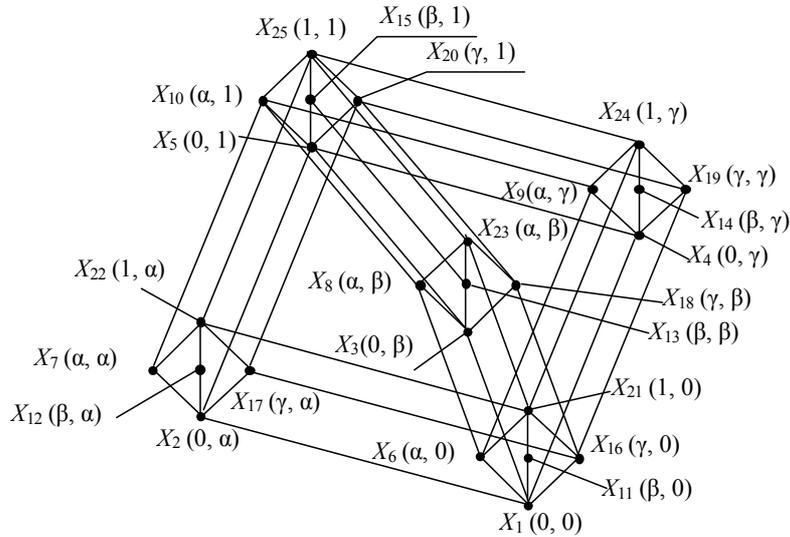


Рис. П4.2

Приложение 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОРОИДАЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Пусть \mathbf{L}_1 и \mathbf{L}_2 – кольца с числом вершин n и m соответственно, причем $n = m = 6$. Пронумеруем вершины структуры $\mathbf{L} = \mathbf{L}_1 \times \mathbf{L}_2$ последовательностью чисел от 1 до N . В силу полной симметрии регулярных решеток [129], матрица смежности не изменится. При этом структура \mathbf{L} примет вид, изображенный на рис. 3.6. Линии межсоединений формируют шесть не пересекающихся по вершинам ЦМС

$L_{C1} \dots L_{C6}$, каждый из которых соединяет вершины с разностью номеров, равной n . Из рис. 3.6 видно, что сеть межсоединений L_C содержит $w = 6$ циклов длиной $\Lambda = 6$.

Предположим, что узлы каждой элементарной структуры соединены не с одноименными, как в раннее рассматриваемой структуре, а со следующими по нумерации узлами, что эквивалентно циклическому сдвигу в сторону увеличения нумерации. При этом разность номеров между узлами, инцидентными любой линии межсоединения (линии структуры L_C), будет составлять величину $n + k$ ($k = 1, 2, \dots$). Назовем ее шагом ЦМС и обозначим St .

В работе [131] определена двудольная однородная сеть, отношение инцидентности в которой задано некоторой тасовкой ребер. Аналогично этому, в тороидальной сети значение шага определяет разбиение вершин по подмножествам, соответствующим различным ЦМС и тем самым задает правило соединения элементов топологии.

Определим тороидально-однородную сеть $\#(n, m, St)$ для любых натуральных St как множество из $N = m \cdot n$ вершин, группируемых в два множества циклов

$$V_1 \equiv v_1(p) + \tau \quad \text{и} \quad V_2 \equiv |v_2(p_C) + St\tau_c|_{\text{mod } N}, \quad (\text{П5.1})$$

которые определяют соответственно множества $L_3 \equiv L_1$ и L_C , где V_1 (V_2) – множество вершин в циклах структуры L_3 (L_C); $p = 1, \dots, m$; $\tau = 0, \dots, n-1$; $p_C = 1, \dots, w$; $\tau_c = 0, \dots, \Lambda-1$; $v_1(p)$ – номер исходной вершины в p -м цикле структуры L_3 ; $v_2(p_C)$ – номер исходной вершины в p_C -м цикле структуры L_C , при этом:

$$v_1(p) = 1 + n(p-1); \quad (\text{П5.2})$$

$$v_2(p_C) = v_2 + p_C - 1.$$

Из (П5.2) следует, что первый цикл множества L_3 принимает в качестве исходной вершину с номером 1, при формировании L_C любые w соседних вершин в элементарной структуре можно рассматривать как исходные для различных ЦМС.

Шаг St определим как разность номеров смежных вершин в множестве V_2 . В множестве V_1 шаг равен 1, длина цикла – n , а число циклов – m . Аналогично свойствам чередующихся арифметических последовательностей в двудольно-однородных сетях [129], для тороидальных структур можно сформулировать следующие утверждения:

1. При фиксированных числах τ , $\tau = 0, \dots, \Lambda-1$, и числах p , $1 \leq p \leq w$, множество вершин $V : V \equiv |v(p) + St \tau|_{\text{mod } N}$ является последовательностью вершин в цикле и образует простой цикл для каждого p , а объединение циклов по всем p покрывает сеть $\#(n, m, St)$. Это означает, что в множестве V при заданном p не существует более двух различных ребер, инцидентных одной и той же вершине в цикле, т.е. формируемый цикл является простым, а объединение циклов по всем p включает все множество вершин сети.

2. В сети $\#(n, m, St)$ существует w независимых (не пересекающихся по вершинам) циклов длиной Λ и m независимых циклов длиной n .

Основным свойством тороидальной сети с изменяемым шагом является формирование независимых циклов межсоединений L_{C_i} ($i = 1, \dots, w$), покрывающих все множество вершин N . Оно дает возможность утверждать, что связность C и число ребер M остаются неизменными для заданного числа структур L_C (за исключением случая при $St = 1$, оговариваемого особо). Определим зависимости средней длины пути \bar{L} и диаметра сети D от шага St . Примеры построения тороидальной однородной сети $\#(n, m, St)$ при $n = m = 6$, $M = 72$ для значений шага $St = 1$, $St = 8$, $St = 10$, $St = 15$ приведены на рис. П5.1, $a - z$ соответственно (в каждой структуре показан только один ЦМС), результаты расчета структурных параметров – связности C , диаметра D и средней длины пути \bar{L} – табл. П5.1

Зависимость структурных параметров от параметров сети $\#(n, m, St)$ имеет периодический характер. С изменением шага St длина цикла Λ принимает значения из ряда: 36; 18; 12; 9; 6; 3; 2. Увеличение шага в интервалах значений $St < n$, $2n < St < 3n$ приводит к монотонному снижению длины цикла Λ , средней длины маршрута \bar{L} и диаметра сети D . При шаге, соответствующем любому простому

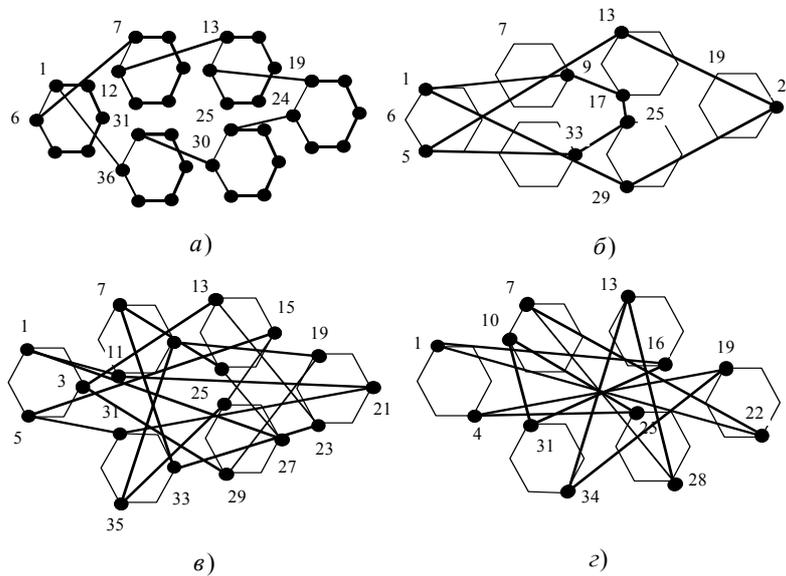


Рис. П5.1

числу (не имеющему общих делителей с другими натуральными числами), единственный цикл принимает максимально возможное значение $\Lambda = N$, поэтому \bar{L} также максимально. Определяющими при формировании тороидальной сети $\#(n, m, St)$ с заданными структурными параметрами являются соотношения числа вершин N с шагом цикла St . Например, сочетание $N = 36$, $St = 8$ и $\Lambda = 9$ дает максимальную структурную близость ($\bar{L} = 2,6$). Диапазон изменения значений \bar{L} составляет порядка 2,6 – 3,4.

Характерным примером неэффективного распределения ребер (каналов) в структуре (сети) является топология, представленная на рис. П5.1, а при $St = 1$, так как большая часть ребер цикла межсоединения дублирует ребра элементарной структуры. В результате каждый цикл структуры L , соединен с соседними только двумя ребрами, поэтому связность сети снижается до 2, т.е. имеет место кольцо с числом элементов, равным общему числу вершин N в структуре. Сеть $\#(n, m, St)$ распадается на m/Λ несвязных компонентов, если $St = \Lambda n$ и при этом Λ является делителем m . Из табл. П5.1 видно, что для рассматриваемой сети несвязные компоненты появляются при $\Lambda = 2; 3$, что соответствует значению шага $St = 2n; 3n$. Поэтому алгоритм формирования тороидальной сети должен предусматривать исключение значений St , допускающих распад структуры на несвязные компоненты.

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК ИСПОЛЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

.....

ПРЕДИСЛОВИЕ

.....

ВВЕДЕНИЕ

.....

1. ПРОБЛЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В НАГРУЖЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СЕТЯХ

.....

1.1. Проблема множественного доступа в информационных сетях

.....

.....

1.2. Влияние топологии на характеристики цифровых радиосетей

.....

.....

- 1.3. Маршрутизация в пакетных радиосетях
.....
- 1.4. Модельное отображение процессов в информационных сетях
.....
.....
- 1.5. Постановка задачи
.....
2. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА В МОБИЛЬНЫХ ЦИФРОВЫХ РАДИОСЕТЯХ
 - 2.1. Существующие подходы к оценке эффективности информационного обмена в цифровых радиосетях
 - 2.2. Аналогии физических и кибернетических систем
 - 2.3. Коэффициент полезного действия информационной сети
 - 2.4. Использование кибернетических параметров для оценки эффективности мобильной пакетной радиосети
3. СИНТЕЗ ИЗБЫТОЧНЫХ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ СТРУКТУР ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ ЦИФРОВЫХ РАДИОСЕТЕЙ
 - 3.1. Задача синтеза детерминированных структур цифровых радиосетей с мобильными объектами
 - 3.2. Поддержание необходимой структурной устойчивости мобильной цифровой радиосети
 - 3.3. Синтез сложных структур мобильных цифровых радиосетей
.....
.....
 - 3.4. Тороидальные структуры для цифровых радиосетей
4. ТЕНЗОРНАЯ МЕТОДОЛОГИЯ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА НАГРУЖЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СЕТЕЙ, НАХОДЯЩИХСЯ В СТАЦИОНАРНОМ СОСТОЯНИИ
- 4.1. Обоснование необходимости применения тензорной методологии в информационных сетях и ее особенности ...
- 4.2. Формула поведения информационной сети
.....
- 4.3. Инвариантность полной кибернетической мощности информационной сети
.....
- 4.4. Вывод уравнений информационной сети в соответствии с тензорной методологией
.....

- 4.5. Анализ информационной сети с использованием ортогональной подразделенной модели
.....
- 4.6. Методология синтеза информационных сетей
.....
- 4.7. Определение тензора синтеза
.....
- 5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕНЗОРНОЙ МЕТОДОЛОГИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИНФОРМАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИФРОВЫХ РАДИОСЕТЕЙ
.....
- 5.1. Оценка информационной эффективности цифровой радиосети с учетом ограничения на временную задержку инфцугов
.....
- 5.2. Анализ результатов оценки эффективности цифровой радиосети, проверка данными имитационного моделирования
.....
.....
- 6. ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОВ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СЕТЯХ
.....
- 6.1. Геометризация взаимного информационного влияния каналов связи
.....
- 6.2. Условия дифференцируемости в окрестности точки состояния предельно нагруженной информационной сети ..
- 6.3. Система линейно независимых путевых потоков – криволинейная система координат
.....
- 6.4. Метрический тензор в путевом пространстве
.....
- 6.5. Совмещение пространств состояний каналов связи и путевых потоков
.....
- 7. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕНЗОРНОГО АНАЛИЗА В ТЕОРИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СЕТЕЙ
.....
- 7.1. Символы Кристоффеля в терминах информационных процессов
.....
- 7.2. Параллельный перенос вектора линейного приращения состояния сети
.....
- 7.3. Ковариантный (абсолютный) дифференциал линейного приращения состояния сети. Ковариантная производная

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

.....
ПРИЛОЖЕНИЯ

