

**П.С. Грунтов**

# **ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ СТАНЦИЙ**



МОСКВА «ТРАНСПОРТ» 1986

УДК 656.21 : 656.222.4.021.8

Грунтов П. С. Эксплуатационная надежность станций. — М.: Транспорт, 1986. 247 с.

В книге дано систематизированное изложение теоретических основ и методов расчета эксплуатационной надежности транспортных систем на примере сортировочных, участковых, грузовых и пассажирских станций, графика движения поездов. Рассмотрены вопросы влияния надежности комплекса технических средств железнодорожного транспорта и подвижного состава на надежность и показатели перевозочного процесса, изложены методы и примеры расчета путевого развития станций, прогнозирования показателей надежности и простоя вагонов на станциях. Приведены методика и расчеты оптимальной этапности повышения эксплуатационной надежности станций.

Книга предназначена для инженерно-технических работников железнодорожного транспорта и специалистов проектно-изыскательских институтов МПС и Минтрансстроя СССР.

Рекомендована Главным управлением учебными заведениями МПС в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений железнодорожного транспорта.

Ил. 47, табл. 30, библиогр. 44 назв.

Рецензенты: начальник отдела организации работы станций Главного управления движения МПС В. А. Король, канд. техн. наук Ю. А. Муха

Заведующий редакцией В. С. Калининков

Редактор В. Д. Лерман

Г 3602050000-076  
019(01)-86 40-86

© Издательство «Транспорт», 1986

## ОТ АВТОРА

Интенсификация развития народного хозяйства СССР требует повышения эффективности работы и усиления транспортной системы. Железнодорожный транспорт является ее важнейшей составной частью. Он выполняет две трети всего объема перевозочной работы во внутреннем грузообороте. Велика его роль и в реализации Продовольственной программы СССР: к 1990 г. на железных дорогах доля сельскохозяйственной продукции и грузов аграрно-промышленного комплекса превысит 20 % в общем объеме перевозок.

Работа железных дорог СССР отличается высокой интенсивностью использования технических средств и подвижного состава. Грузонапряженность их резко превышает грузонапряженность железных дорог развитых капиталистических стран. Значительно выше и показатели качества эксплуатационной работы.

Известно, что современное промышленное и сельскохозяйственное производство является высококооперированным. Перевозки грузов осуществляются не только в запас, на долговременное хранение. Кооперированная продукция промышленного и аграрно-промышленного комплексов должна перевозиться ускоренно, в минимальные сроки. Она, как правило, идет непосредственно на конвейер, к местам переработки или потребления. В среднем в каждом грузовом поезде транспортируется 25—30 % грузов, для которых необходимо соблюдение повышенных требований к срокам перевозки и надежности перевозочного процесса.

На транспорте в настоящее время проводится большая работа по изучению надежности подвижного состава (электропоездов, тепловозов, вагонов, моторвагонного подвижного состава), систем автоматики, телемеханики и связи, устройств железнодорожного пути. Разработаны классификаторы причин отказов оборудования и узлов подвижного состава и других технических средств. Вводится и совершенствуется учет отказов и сбоев в работе, начинается разработка автоматизированных систем управления надежностью работы технических средств.

Но вместе с тем проблема надежности работы транспорта имеет еще и другую сторону: технические средства, подвижной состав работают с высокими скоростями движения, большими, а в ряде случаев близкими к предельным нагрузкам, большими величинами массы грузовых и пассажирских поездов. Актуальность проблемы возрастает в связи с большой загрузкой транспортных систем — станций, узлов, железнодорожных направлений и высокой степенью заполнения пропускной способности. Возникающие при этом технические и технологические отказы вызывают значительные сбои в эксплуатационной работе, задержки в продвижении потока грузовых и пассажирских поездов. А это приводит в свою очередь к значительным экономическим потерям. Последствия отказов в работе сказываются в течение длительного периода времени.

Таким образом, надежность технических средств — пути, локомотивов, вагонов, устройств электроснабжения, автоматики, телемеханики и связи следует рассматривать не только с учетом качества изготовления этих средств на заводах (конструктивная надежность по производству машин имеет первостепенное значение и постоянно должна повышаться), но и с точки зрения человеко-машинных систем, имея в виду режимы управления, эксплуатации и обслуживания. Нарушение режимов обслуживания и эксплуатации, ошибки в управлении, недостаточная квалификация управляющего персонала понижают надежность работы технических средств.

В настоящее время теория надежности получила широкое распространение в различных отраслях производства. Ее методы начинают использовать для обоснования высокоэффективной работы и оценки функционирования больших технологических систем, которые в свою очередь представляют собой взаимосвязанный набор сложных технических, информационных, управляющих систем и подсистем. В промышленности это — конвейерные линии, объединенные одним или несколькими цехами, системы энергоснабжения и др. На железнодорожном транспорте к таким сложным системам можно отнести сортировочные, участковые, промежуточные, пассажирские, технические и другие станции или их отдельные технологические линии.

Предлагаемая вниманию читателя книга посвящена проблемам надежности работы сортировочных и других основных типов станций железнодорожного транспорта, обоснованию их развития и установлению экономически оправданных уровней мощности и надежности работы. Надежность работы станций тесно связана с работой участков, с надежностью комплекса технических средств. В связи с этим кратко рассмотрены и эти вопросы. И поскольку станции влияют на эффективность работы железнодорожных участков и направлений в целом, ставится вопрос о надежности работы железнодорожного участка, графика движения как технологической системы, надежности перевозочного процесса, выполнения нормативных сроков доставки грузов для удовлетворения требований заказчиков на перевозки в соответствии с задачами, которые были поставлены на апрельском и октябрьском (1985 г.) Пленумах ЦК КПСС по интенсивному развитию всех отраслей народного хозяйства.

Автор выражает признательность профессорам П. А. Сыцко и И. Г. Тихомирову, а также кандидатам технических наук В. А. Захарову и В. П. Ярошевичу, инженерам В. Г. Кузнецову, А. А. Михальченко, Г. В. Козлову за ряд ценных советов и помощь при подготовке рукописи.

## НАДЕЖНОСТЬ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ. КЛАССИФИКАЦИЯ ОТКАЗОВ

### 1.1. Общая характеристика транспортных систем

Проблема надежности на транспорте имеет существенные особенности и не сводится только к надежности технических средств. Она определяется также условиями пропуска и закономерностями транспортных потоков. Традиционно к работе железнодорожного транспорта предъявляются высокие требования как по удовлетворению потребностей народного хозяйства и населения в перевозках, так и по обеспечению безопасности движения поездов и маневровой работы, сохранности перевозимых грузов.

Особенности проблемы надежности транспортных систем определяют следующие факторы:

- мобильность, динамичность работы таких крупных транспортных систем, как станция, узел, участок, линия, полигон;

- взаимосвязь и взаимодействие этих систем, учитывая, что отказы и сбои в их работе проявляются на значительных расстояниях: задержка движения на относительно короткий промежуток времени вызывает осложнения в эксплуатационной работе, проявляющиеся в течение одних или нескольких суток;

- транспортные потоки, которые являются нагрузкой на транспортные системы и сами являются системами, в которых режимы движения единиц — поездов — взаимозависимы и регулируются автоблокировкой, диспетчерской централизацией и диспетчерским контролем, причем свободный (независимый в известных пределах) режим движения возможен только при определенных условиях и параметрах транспортного потока;

- сложность устранения последствий отказов в работе транспортных систем, когда для ввода в график задержанных поездов нужны резервные нитки графика, т. е. резервная пропускная способность, а для остановки задержанных поездов — дополнительные (резервные) пути на станциях;

- большое воздействие на работу транспортных систем фактора времени и регламентация процесса перемещения графиком движения грузовых и пассажирских поездов, а также непрерывность транспортного процесса в течение суточного, а следовательно, и годового периодов;

- многомерность транспортной системы и сложность управления, когда отказы в одном месте системы вызывают необходимость в прогнозировании мер по предупреждению последствий отказов в других ее местах, например из-за задержки локомотивов, вагонов.

Исходя из необходимости снижать влияние отказов на экономику возникает объективная необходимость иметь резервы не только

пропускной способности, но и локомотивов, вагонов, материально-технических средств. При отсутствии таких резервов последствия отказов усугубляются, регулирование и управление усложняются, поскольку они осуществляются в условиях жестких ограничений по пропускной способности и подвижному составу.

Большое воздействие на работу железнодорожного транспорта оказывают информационные потоки и надежность информационно-управляющих систем. Сбои (отказы) по информации приводят к задержкам продвижения транспортного потока. Поэтому информационно-планирующие и информационно-управляющие системы, создаваемые на базе современных средств приема и переработки информации, микропроцессорной техники и ЭВМ, должны иметь высокую степень надежности, иначе их трудно использовать в качестве управляющих.

Особенно важно обеспечить надежность при создании информационно-управляющих систем, работающих в реальном масштабе времени на основе единого банка данных о размещении поездов, вагонов и локомотивов в грузовом движении. Именно проблема надежности объясняет тот факт, что разработка и внедрение таких управляющих систем на первых порах отстают от потребностей практики и что на первом этапе создаются, по существу, информационные системы, которые полностью оставляют функции управления за человеком.

В транспортных человеко-машинных системах велика роль управляющего фактора, а функция управления, несмотря на обилие технических средств, облегчающих управление движением и в той или иной степени отражающих положение системы в реальном масштабе времени (пульты, системы диспетчерского контроля, информационные системы на базе микропроцессоров и ЭВМ), по-прежнему остается за человеком. Особенностью человеко-машинных систем является зависимость общей надежности функционирования системы от оператора, диспетчера, от времени, которое ему необходимо для восприятия информации, ее осмысления и выработки управляющих воздействий. Работоспособность технических средств транспортной системы не определяет полностью ее безопасность. Это — необходимое, но недостаточное условие надежности транспортной системы, поскольку отказы могут возникать и возникают из-за недостаточной пропускной и перерабатывающей способности станции, железнодорожного узла, неточности или отсутствия информации, недостатка времени на выработку управляющих воздействий. Отказы могут возникать также в связи с информационной перегрузкой оперативного персонала, занятого управлением работой станций или других подразделений сети.

Для систем любого типа и степени сложности, в том числе и для таких больших систем, как железнодорожные станции, проблема надежности рассматривается в двух аспектах. Первый аспект касается разработки методов определения надежности. Решать эту задачу трудно, особенно для больших систем со сложной структу-

рой взаимодействующих элементов. Аналитические методы не в полной мере здесь применимы в связи с недостаточным их соответствием структуре и процессам, которые в действительности здесь происходят. Практическую ценность для таких систем представляют методы имитационного моделирования, с помощью которых удается с достаточной степенью точности воспроизвести работу сложных систем и учесть основные функциональные взаимосвязи и зависимости, рассчитать показатели работы и определить основные исходные параметры и показатели надежности.

Надежность работы системы связана с целым комплексом характеризующих ее физических показателей и параметров. Для транспортных систем наряду с техническими характеристиками большое влияние на уровень надежности оказывают такие комплексные характеристики, как пропускная, провозная и перерабатывающая способность. Методы расчета величины (уровня) надежности разрабатываются и расчет надежности выполняется как для эксплуатируемых, так и для вновь проектируемых или реконструируемых и развиваемых систем (станций, узлов, участков, локомотивов, вагонов, систем автоматики, телемеханики и связи, управления и др.). И хотя во всех этих случаях методы расчета надежности имеют некоторые отличия, речь идет об определении (измерении) надежности.

Другим аспектом проблемы надежности является обеспечение заданного или экономически оправданного уровня надежности системы. Здесь уже речь идет о технических, технологических, информационных и других характеристиках системы, которые во взаимосвязи определяют тот или иной уровень работоспособности системы при заданных величинах нагрузки.

Если первый аспект проблемы надежности связан с методологическими вопросами расчета и нормирования уровня надежности, то второй характеризует технический и инженерный уровень создаваемой или эксплуатируемой системы и связан с эффективностью капитальных вложений на создание, эксплуатацию и развитие системы. Обеспечение надежности определяется уровнем технического прогресса в отраслях народного хозяйства, технологией и организацией производства.

## 1.2. Основные понятия и определения теории надежности

Большинство терминов и понятий теории надежности в СССР стандартизированы (Государственный стандарт Союза ССР 27002—83 «Надежность в технике. Термины и определения»). Но поскольку они предназначены, главным образом, для сугубо технических объектов и, естественно, не учитывают особенностей работы транспортных систем, необходимы отдельные пояснения и дополнения исходя из условий функционирования транспортных человеко-машинных информационных технологических систем.

К числу наиболее общих понятий теории надежности относятся **объект, система, элемент** системы. Под объектом понимается предмет определенного целевого назначения, рассматриваемый в периоды проектирования, производства, эксплуатации, изучения, исследования и испытания на надежность. В это понятие входят сооружения, устройства, установки, изделия, машины, аппараты и др. в зависимости от их целевого назначения и задач по исследованию надежности.

Для термина **система** известно несколько определений. Под системой на транспорте будем понимать совокупность элементов, объединенных взаимодействием и взаимозависимостью. Большинство транспортных систем, таких, например, как сортировочная или пассажирская станция, информационно-управляющая система узла и др., отличаются характером взаимодействия элементов, причем это взаимодействие проявляется в постоянно повторяющемся регулярном процессе выполнения различных операций с поездами, вагонами, грузами, документами, информацией. По продолжительности выполнения операций этот процесс является неравномерным. Транспортные объекты отличаются развитой системой или системами управления, которые в свою очередь могут рассматриваться как отдельные системы или подсистемы.

Элемент — объект, являющийся простейшей частью системы. Несколько элементов могут объединяться в подсистему, если она, состоя из отдельных элементов, выполняет какие-то определенные функции, являющиеся составной частью (подфункциями) работы системы в целом.

Транспортные системы — станции, узлы, участки, полигоны, депо, грузовые дворы, склады и др. — системы и подсистемы с **входом** и **выходом**. Вход и выход могут объединяться одним элементом (устройством): однопутная линия на подходах к станции, например, является входом и выходом на каждое направление движения.

Транспортные системы отличаются также и таким очень важным показателем, как **емкость**. Она зависит от числа и длины путей (для станций, узлов, линий, полигонов), длины фронтов погрузочно-разгрузочных работ (для подъездных путей, грузовых дворов), вместимости складов (для складских систем и подсистем) и др. Емкость системы рассматривается и во взаимосвязи с мощностью (пропускной способностью) входов и выходов.

В связи с тем что на путях выполняются различные операции технологического процесса, требующие затрат труда, материальных, топливно-энергетических ресурсов и самого дорогостоящего ресурса — времени, между интенсивностью потоков поездов (вагонов) на входах и выходах, емкостью и **безотказностью** в работе существуют определенные взаимозависимости: при заполнении емкостей (путей, парков путей, складов и др.) поток на входе будет остановлен, и наоборот, при занятости выхода из системы или неисправном выходе поток из системы (поезда, вагоны, грузы) не может быть выведен и емкость не будет освобождаться, а это приводит

не только к задержке потока в самой системе, но и к последующей задержке потока на входе.

Таким образом, под термином «безотказность» следует понимать **свойство** системы непрерывно сохранять свою **работоспособность**. Работоспособность для транспортных систем типа станций, грузовых дворов, складов, контейнерных терминалов, вокзалов и др. — это способность обеспечивать регулярный прием транспортного потока на входе (по мере поступления потока, а при его отсутствии — сохранять готовность к его приему) и, функционируя в соответствии с установленной технологией, непрерывно отправлять поток из системы или сохранять соответствующую готовность к его отправлению. Этот термин в теории надежности стандартизирован. Под работоспособностью понимается состояние системы, при котором она выполняет или может выполнять заданные функции, сохраняя значения основных параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией.

Если система не выполняет установленные показатели в заданных пределах по отношению к нормативным, то ее работоспособность является пониженной, что требует проведения соответствующих мер по совершенствованию работы отдельных элементов, подсистем или систем в целом. Для транспортных (железнодорожных) систем, наряду с паспортными нормативами технических устройств и подвижного состава, нормативно-техническими документами являются план формирования поездов, график движения, технологические процессы станции, депо, пунктов технического обслуживания (ПТО) вагонов, технический план работы и др. Нормативы, показатели, устанавливаемые этими документами (скорости движения поездов, простои поездов и вагонов, размеры приема, сдачи поездов и вагонов и др.), должны быть объективными, учитывать реальные условия эксплуатации системы, нагрузку, пропускную способность и мощность (производительность) элементов системы и систем в целом, т. е. управление системой, анализ ее функционирования и надежности должны быть инженерно, методически и научно обоснованы.

**Надежность** является сложным понятием, включающим в себя и безотказность работы системы, и ее работоспособность. Под надежностью системы понимается свойство выполнять определенные задачи в определенных условиях эксплуатации. Нельзя отождествлять надежность функционирования системы, определяемую как свойство выполнять установленные для системы функции, как некоторую вероятностную безразмерную величину, с другими параметрами и характеристиками системы (например, пропускной или перерабатывающей способностью). Чем более сложной является система, тем большее число факторов влияет на ее эксплуатационную надежность.

Показатели надежности устанавливают количественные характеристики одного или нескольких свойств, определяющих надежность системы. На надежность таких транспортных систем, как станция (сортировочная, грузовая, пассажирская, техническая

и др.), узел, участок, линия, влияют надежность технических элементов (систем) — пути, устройств автоматики, телемеханики и связи, локомотивов, вагонов, а также число и длина путей, пропускная и перерабатывающая способность, нагрузка на систему, управление.

Для каждого типа системы рассматриваются **состояние** вообще и предельное состояние как функции времени. Предельное состояние, соответствующее технической невозможности или нецелесообразности дальнейшей эксплуатации системы, обусловлено требованиями безопасности или неустранимым снижением эффективности. Такое понимание **состояния** и **предельного состояния** относится к техническим системам (путь, локомотивы, вагоны и др.). Это состояние зависит от срока службы системы (изделия), когда под воздействием «старения» первоначальные параметры системы и ее работоспособность постепенно снижаются. Так, часть локомотивного парка дороги может находиться в таком техническом состоянии, когда потери, вызываемые отказами, и затраты на ремонт и восстановление превышают эффективность эксплуатации. Очевидно, такие локомотивы должны сниматься с эксплуатации, поскольку они достигли предельного технического состояния. Кроме того, и это очень важно, такие локомотивы не обеспечивают безопасность движения.

Исходя из этих факторов и устанавливается **срок службы** с учетом, конечно, всей системы восстановительных и текущих ремонтов. Под сроком службы понимается календарная продолжительность эксплуатации объекта от определенного момента времени до предельного состояния. Аналогичные рассуждения применимы, например, к рельсам, стрелочным переводам, вагонам и другим техническим элементам транспортных систем. Однако если в качестве системы рассматривать станцию, контейнерный терминал, грузовой двор, железнодорожный участок или узел, то под ее состоянием следует понимать степень заполнения поездами, вагонами, контейнерами, грузами, а предельное состояние соответствует переполнению (насыщению) системы, когда возникают отказы — задержки транспортного потока на входах. При этом техническое состояние может быть идеальным, полностью работоспособным.

Такие системы проектируются и строятся как постоянно действующие транспортные комплексы, хотя их технические элементы и физически, и морально стареют и подлежат замене или **восстановлению**. Для них не применим термин **повреждение** (событие, заключающееся в нарушении исправности объекта), который правомерен для технических объектов. Например, аэропорт может быть закрыт для приема самолетов из-за плохой погоды или по другим причинам, станция, морской порт могут быть закрыты для приема поездов и соответственно судов из-за заполнения путей, причалов или по другим причинам, вызвавшим отказ в их работе. Термины «ресурс», «срок службы», «старение», «повреждение», «исправность», «неисправность», «долговечность», «сохраняемость» для таких систем не применяются.

### 1.3. Классификация отказов в работе транспортных систем

Отказы в приеме, отправлении и пропуске поездов могут быть вызваны большим числом причин, связанных с управлением перевозочным процессом, технологией, проектированием, ремонтом и содержанием технических средств, их производством. К ним можно отнести, например, диспропорции в развитии пропускной способности железнодорожных линий, станций, локомотивных и других депо; переполнение емкостей парков, путей, станций, железнодорожных участков, направлений и др.; несоответствие пропускной и перерабатывающей способности величинам транспортных потоков; неправильное обоснование объема работы и величин пропускной и перерабатывающей способности станций, участков, депо при проектировании новых и развитии существующих линий; недостаточный учет степени неравномерности грузо-, вагоно-, поездопотоков и темпов их увеличения; недостаточность парка локомотивов и числа локомотивных бригад (дефицит локомотивов и бригад может быть вызван неудовлетворительным управлением и регулированием, увеличением числа локомотивов, находящихся в ремонте, заболеваниями работников локомотивных бригад, недостаточным по величине парком локомотивов по отношению к объему работы); неудовлетворительную конструктивную надежность технических средств или их отдельных элементов; несовершенство технологии производства; нарушение установленного режима профилактического осмотра и ремонта подвижного состава и постоянных технических устройств; недостоверность информации о поездах и грузах, ошибки в оформлении натурных листов и других документов, разъединения вагонов и документов; нарушения, связанные с выполнением грузовых и коммерческих операций, и др.

Большинство факторов, вызывающих отказы в приеме, отправлении и пропуске поездов, взаимозависимы и сводятся к нерасчетливому использованию пропускной и перерабатывающей способности, недостаткам оперативного прогнозирования и регулирования на разных уровнях управления и др. Отличительной особенностью отказов в работе технических, технологических и информационно-управляющих транспортных систем является отражение всех причин этих отказов, какими бы разнообразными они ни являлись, в задержках продвижения поездов (пропуска, приема, отправления), дополнительных задержках (простоях) вагонов на станциях, погрузочно-разгрузочных фронтах, грузовых дворах, контейнерных терминалах.

Имеются, конечно, такие отказы технических средств, которые не вызвали, хотя и могли вызвать, задержку поезда или дополнительный простой вагонов. Однако это не исключает общей закономерности отказов транспортных систем, которые приводят к снижению скорости перемещения транспортной массы, увеличению сроков доставки грузов или времени поездки пассажиров.

Общее время различных отказов на всем пути следования поезда от станции формирования до станции расформирования, если оно установлено достаточно большим числом наблюдений, характеризует надежность поездной работы. Аналогично суммарное время задержек, связанных с отказами, на всем пути следования груза — от станции отправления до станции назначения — представляет собой критерий надежности перевозочного процесса.

В теории надежности различают отказы **полный, внезапный, постепенный, частичный, независимый, зависимый, производственный, конструкционный, сбой, перемежающийся и эксплуатационный**. Под полным понимают такой отказ, после возникновения которого использование объекта по назначению невозможно до восстановления его работоспособности. К полным отказам относятся крупные поломки локомотивов, вагонов, устройств железнодорожного пути и других устройств, вызванные столкновением подвижного состава, излишней нагрузкой и другими причинами.

Частичный отказ — это такой отказ, после возникновения которого использование объекта по назначению возможно, но при этом значения одного или нескольких параметров выходят за допустимые пределы. Частичные отказы иногда называют параметрическими, поскольку они связаны с ухудшением основных параметров работы системы. К частичным отказам относятся, например, такие отказы железнодорожного пути, стрелочных переводов, когда движение не закрыто, но осуществляется с резко сниженными по отношению к нормативным скоростями движения. К частичным отказам относят также такие поломки или ухудшения в работе элементов подвижного состава, которые не угрожают безопасности движения, но и не позволяют использовать вагоны, локомотивы по прямому назначению.

Внезапный отказ характеризуется скачкообразным изменением одного или нескольких основных параметров системы. К таким отказам можно отнести одиночный выход из строя рельсов в связи с внезапными причинами, выход из строя отдельных элементов устройств автоблокировки, электрической и диспетчерской централизации и др. Внезапный отказ может быть и полным.

К производственным относят такие отказы, которые возникают вследствие нарушения или несовершенства технологического процесса изготовления или ремонта объекта. Эти отказы имеются и при производстве и, еще в большей степени, при ремонте локомотивов, вагонов, устройств пути, контактной сети и др.

Конструкционный отказ возникает из-за ошибок конструктора или несовершенства методов конструирования. В это понятие входит широкий диапазон отказов, связанных с конструированием электровозов, тепловозов, вагонов и других объектов. По этим причинам нередко новые образцы локомотивов и вагонов имеют низкую надежность, в результате много времени уходит на доведение параметров надежности до необходимого уровня. К этим отказам надо отнести и ошибки в проектировании транспортных систем: же-

железнодорожных линий, узлов и различных типов станций. Они сводятся к выбору нерациональных вариантов схем станций и узлов, необоснованному уменьшению длины и числа путей, ошибкам в проектировании различных горловин, неправильному обоснованию величин пропускной и перерабатывающей способности, недостаточно высокой величине расчетных объемов работы и другим неточностям, которые проявляются в виде задержек транспортного потока. Иногда эти задержки носят массовый характер и о них уже нередко говорят как о недостатках эксплуатационной работы и управления ею.

В работе станций, узлов и направлений часто возникают сбои — самоустраняющиеся отказы, приводящие к временной утрате работоспособности. Остановки транспортного потока перед станциями в связи с недостаточной производительностью работы по обработке и расформированию поездов, недостаточным числом путей, остановки потока перед стыковыми пунктами отделений и дорог в связи с различными организационно-технологическими причинами воспринимаются как сбои в работе. Экономические последствия от этих отказов, однако, весьма серьезны, если они вызывают задержки большого числа поездов и дезорганизуют работу в других взаимосвязанных элементах сети.

Большой перечень отказов включает в себя понятие эксплуатационный отказ. Это отказ, возникший вследствие нарушений установленных правил эксплуатации (ПТЭ, инструкций, приказов МПС, начальников дорог, отделений, нарушений установленных технологических процессов) или вследствие влияния не предусмотренных внешних воздействий (незапланированное увеличение транспортного потока на входе системы, внешнее нарушение регулировочной дисциплины при поступлении порожних вагонов, воздействие погоды и другие факторы).

Всякая задержка поезда, готового к отправлению на участок, приема его на станцию или задержка пропуска, не предусмотренная графиком движения или технологией работы станции, воспринимается как отказ в работе станции, участка. Таким образом, задержки приема, пропуска, отправления поездов являются отклонениями от нормы (отклонениями от графика движения, технологии станции). Задержки поездов, составов и вагонов могут происходить также по коммерческим причинам в связи с нарушением правил погрузки, выгрузки, оформления документов. Особую группу эксплуатационных отказов могут составить коммерческие отказы.

К отдельной группе отказов следует отнести задержки поездов и вагонов, вызванные нарушениями плана формирования поездов, когда в поезд ошибочно включают вагоны других назначений. В результате на станции расформирования требуется дополнительная работа и возникают дополнительные задержки вагонов, а те вагоны, которые были включены в поезд не по назначению, совершают излишний пробег или перерабатываются большое число раз. Ошибки в информации, оформлении документов, выполнении технологи-

ческого процесса и разъединения вагонов от документов также приводят к незапланированным задержкам вагонов, порче или полному повреждению грузов.

По природе возникновения все эксплуатационные отказы можно классифицировать следующим образом:

отказы технических средств:

организационно-технологические отказы, которые объединяют большой перечень отказов, не связанных непосредственно с износом, поломками, ухудшением параметров работы технических средств.

Отказы технических средств разделяются на отказы постоянных (пути, автоматики, телемеханики и связи, контактной сети) и других устройств и отказы подвижного состава (локомотивов и вагонов). Организационно-технологические отказы можно, в свою очередь, разделить на отказы в связи с полным заполнением графика движения поездов в тот или иной период суток, отсутствием локомотивов или локомотивных бригад, полным заполнением путей отправочных, сортировочных, транзитных и приемных парков станций, несвоевременной обработкой, расформированием, формированием, грузовых поездов, несвоевременной подготовкой в рейс и задержками экипировки пассажирских поездов, нарушениями плана формирования, ошибками в информации и оформлении документов, коммерческим браком, нарушениями правил погрузки (отказы из-за технологической дисциплины), ограничениями погрузки грузов, которые могут иметь объективные причины, связанные с эксплуатационной обстановкой на полигоне, или вызваны противоречиями в критериях управления.

В зависимости от того, где происходят задержки поездов (вагонов), существуют отказы: в пределах станции, на подходах к станции, на перегоне, на нескольких станциях и перегонах (на участке или направлении).

Большинство организационно-технологических отказов являются групповыми перемежающимися отказами — многократно возникающими сбоями одного и того же характера, которые периодически повторяются в связи с разнообразными причинами задержек транспортного потока.

Надежность перевозок наряду с другими признаками, характеризующими уровень работы транспорта (общее время в пути, сохранность грузов, стоимость перевозки), является важным объективным критерием качества транспортного процесса. Совершенствование подвижного состава и технической базы — очень важная часть проблемы надежности работы железнодорожного транспорта. Достаточные объемы пропускной и перерабатывающей способности, пропорциональное развитие железнодорожных направлений, узлов, станций, депо оказывают большое влияние на надежность эксплуатационной работы сети. Поскольку на сортировочных, участковых, грузовых, пассажирских и других станциях происходят массовые технологические процессы обработки, расформирования и форми-

рования поездов, операции по погрузке и разгрузке вагонов, оформление документов, зарождение и погашение транспортного потока и обработка информации о транспортном процессе, надежность работы всех этих станций оказывает решающее воздействие на проблему эксплуатационной надежности участков, полигонов и сети в целом.

#### 1.4. Резервирование. Резервы пропускной, перерабатывающей и провозной способности транспортных систем

Проблема резервов провозной способности на железнодорожном транспорте особенно актуальна: по прогнозным данным, отправление грузов в ближайшей перспективе значительно увеличится. Планируется и значительный рост перевозочной работы. В связи с этим комплексной долговременной программой развития транспорта предусмотрено решение ряда крупных народнохозяйственных задач, в частности увеличение пропускной и провозной способности железных дорог и создание необходимых резервов обеспечения грузовых и пассажирских перевозок с высоким уровнем эксплуатационной надежности.

Необходимость наличия резервов на железнодорожном транспорте определяется не только ростом объемов перевозочной работы, но и высоким заполнением пропускной способности на ряде направлений при существующих транспортных потоках. В настоящее время более 50 % сети дорог работает с заполнением пропускной способности выше технологически допустимого уровня. Минимальный допустимый резерв пропускной способности 20—25 % на ряде линий полностью исчерпан, на других линиях он весьма недостаточен — от 5 до 10 %.

Важный фактор создания резервов — широкое применение передового опыта и улучшение использования технических средств, интенсификация производственных процессов. Так, на передовых сортировочных станциях сети Люблино-Сортировочное, Минск-Товарный, Пермь-Сортировочная, Нижнеднепровск-Узел и ряде других транзитных вагонов с переработкой находятся по 6 ч и менее. На других станциях этот простой выше в 1,5—2,5 раза и они имеют большие потенциальные возможности (резервы) увеличения переработки вагонов за счет технологических и организационных мер.

Наличие резервов — решающий показатель эксплуатационной надежности работы транспортных систем. Причем необходимы резервы не только провозной, пропускной и перерабатывающей способности: крупные подразделения сети — дороги, полигоны, сеть в целом для обеспечения высокого уровня эксплуатационной надежности должны иметь резервы подвижного состава: вагонов, электровазов, тепловозов.

Для обеспечения эксплуатационной работы с заданными параметрами надежности необходимы также резервы топлива, рельсов,

запасных частей и оборудования для текущих и восстановительных ремонтов подвижного состава, устройств пути, автоматики, телемеханики и связи и других систем транспорта. Транспортные системы должны развиваться не только для освоения возрастающих объемов перевозочной работы, но и с учетом восстановления ранее исчерпанных резервов провозной способности, подвижного состава и других материальных ресурсов. Вся система и структура резервирования направлены на резкое сокращение последствий отказов и обеспечение заданной работоспособности систем. Как и проблема надежности в целом, резервирование представляет собой сложную технико-экономическую задачу. Резервирование как раздел теории надежности содержит ряд терминов и определений. Рассмотрим эти определения.

**Избыточность.** Это — дополнительные средства (локомотивы, вагоны, пути, запасные части и др.) или возможности (провозная, пропускная способность, перерабатывающая способность и др.) сверх минимально необходимых для выполнения системой заданных функций.

**Резервирование.** Это — метод повышения надежности объекта (станции, грузового фронта, контейнерного терминала, железнодорожного узла, участка, линии и др.) введением избыточности.

Большое значение для этих и других транспортных систем имеет **временное резервирование** как метод повышения надежности системы, предусматривающий использование избыточности времени. Это метод резервирования для железнодорожных линий, когда резерв пропускной способности выражается временем расчетных суток, которое непосредственно не занято пропуском любых категорий поездов. Это время может конкретно выражаться в виде резервных ниток графика движения. Если число этих ниток  $N_p$ , а расчетный временной интервал  $I$ , то время резерва для расчетных суток будет  $(I + 1)N_p$ .

В этот период времени в зависимости от роли системы в перевозочном процессе и технико-экономических возможностей могут проводиться профилактический осмотр и ремонт элементов системы. В общем случае часть расчетного времени работы системы  $T$  (для станций, узлов, линий, направлений — сутки) необходимо выделять для проведения ремонтно-профилактических работ. Обозначим его  $T_0$ . Отношение этого времени к расчетному называют коэффициентом избыточности времени или коэффициентом резерва:

$$\beta_0 = \frac{T_0}{T}. \quad (1.1)$$

В случае совмещения резерва с проведением ремонтно-профилактических работ устройств пути и контактной сети оставшееся время  $T - T_0$  должно использоваться для пропуска поездов. Такое совмещение возможно только при условии идеальной надежности движения поездов. Поскольку в реальных условиях возникают отказы локомотивов и вагонов, крепления груза, отказы постоянных уст-

роиств и др., то для обеспечения заданной эксплуатационной надежности работы необходимо выделить резерв времени  $T_1$ , предназначенный для обеспечения пропуска заданных размеров движения в условиях возможных отказов. Коэффициент резерва

$$\beta_1 = \frac{T}{T - T_0}. \quad (1.2)$$

Резервы времени  $T_0$  и  $T_1$  вместе взятые обеспечивают работоспособность на текущий год эксплуатации системы, но не предусматривают возможности освоения возрастающих объемов перевозочной работы без снижения некоторого заданного уровня эксплуатационной надежности  $P_N(t)$  работы системы (станции, участка, узла). Если выделить резервы  $T_0$  и  $T_1$ , то с ростом объемов работы система начинает работать в условиях затяжных отказов. Следовательно, необходим еще один временной резерв  $T_2$  в расчете на рост объема работы системы в течение текущего этапа, когда ее технические возможности сколько-нибудь существенно не увеличиваются (для транспортных капиталоемких систем 10—15 лет).

Коэффициент резерва для освоения перспективного объема работы

$$\beta_2 = \frac{T_2}{T - (T_0 + T_1)}, \quad (1.3)$$

а общий коэффициент резерва с учетом времени, выделенного на проведение ремонтно-профилактических работ,

$$\beta = \frac{T_0 + T_1 + T_2}{T}. \quad (1.4)$$

При резервировании необходимо исходить из того, что система работает с такими нагрузками, которые предопределяют ее безотказность в некоторый начальный момент времени  $t_i$  [состояние системы в этот момент —  $N(t_i)$ ]. Величину резервов  $T_0 + T_1 + T_2$  устанавливают исходя из обеспечения минимальных народнохозяйственных затрат на эксплуатацию транспортной системы, т. е. оптимальное значение надежности работы системы  $P^*(t)$  соответствует  $\min E = E\{N(t_0, t_1, \dots, t_k)\}$ , где  $k$  — число лет работы системы от исходного состояния до начала ее последующего развития.

В теории надежности предусматривается также структурное резервирование как метод повышения надежности объекта, предусматривающий избыточность структурных элементов. Применительно к таким системам, как станции всех типов и узлы, структурное, как и другие виды резервирования, не проработано в достаточной степени для обеспечения работоспособности в условиях роста объемов работы. В этом случае под резервными будем понимать такие элементы системы, которые используются для обеспечения ее работоспособности в случае отказа основного элемента. Основным элементом — такой элемент структуры системы, который, безусловно,

необходим для обеспечения работоспособности. В качестве основного элемента сортировочной станции, например, можно рассматривать сортировочную горку в целом или пути надвига и роспуска, если это однопутная горка, входы и выходы из основных парков станции и другие элементы. Структурное резервирование необходимо также для обеспечения работоспособности системы в условиях реконструкции, развития, ремонта основных элементов.

Широко используют также скользящее резервирование, когда группа основных элементов системы резервируется одним или несколькими элементами. Скользящее резервирование должно быть использовано при установлении необходимого числа путей в основных парках, оперативном распределении сортировочной работы в узлах и в ряде других случаев. При установлении резервов пропускной и перерабатывающей способности, определении путевой мощности парков необходимо использовать смешанное резервирование, при котором совмещаются в одной системе различные виды резервирования.

Различают также нагруженный резерв, когда резервный элемент находится в том же рабочем режиме, что и основной. Это, например, дублирующие ЭВМ в АСУ сортировочными станциями и других автоматизированных системах.

Ненагруженный резерв — резервный элемент, который не несет эксплуатационных нагрузок. К такому резерву можно отнести резервы вагонов, тепловозов, электровозов и др.

## ГЛАВА 2

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ

#### 2.1. Показатели безотказности работы транспортных систем

Теория надежности устанавливает и изучает количественные и качественные характеристики (критерии) надежности и исследует связь между показателями экономичности, эффективности и надежности. Нормируемый или заданный уровень надежности должен быть экономически обоснован, и это обоснование непосредственно взаимосвязано с функционированием системы, ее ролью в отраслях народного хозяйства, с величиной издержек (потерь) и последствиями отказов. Нормы уровня надежности для систем различных классов сложности и назначения в теории надежности заранее не устанавливают.

Такие транспортные системы, как сортировочная, грузовая, участковая, пассажирская станции, должны обеспечивать беспрепятственный прием, пропуск и отправление соответствующих ка-

тегорий поездов. В общем виде назначение станций состоит во вводе транспортного потока, его трансформации в соответствии с технологическим процессом, который имеет свои особенности и отличия для каждого типа станции, и выводе транспортного потока в соответствии с графиком движения. Функционирование по схеме «ввод—трансформация—вывод» характерно не только для станций как больших технологических систем, но и для систем еще большей размерности — узлов, линий и др. Общая закономерность работы по такой схеме выражается в показателях транспортных систем, в том числе и в показателях надежности. Общетеоретические положения теории надежности хорошо согласуются с сущностью технологических процессов в этих системах.

Надежность — основной показатель безотказной работы системы. Под надежностью понимают свойство объекта, заключающееся в его способности выполнять функциональные задачи в заданных условиях эксплуатации. Надежность, таким образом, — свойство выполнять заданные функции системой, а выполнение этих функций зависит от основных характеристик системы: мощности, технологии, управления. Следовательно, и надежность как свойство выполнять заданные функции зависит от основных параметров системы. Поэтому ее считают ведущим показателем, хотя сама по себе надежность не является исчерпывающей характеристикой работы транспортной системы и входит в число других показателей как наиболее существенный из них.

Время до возникновения отказа называют наработкой на отказ. Для больших технологических систем типа станций время наработки на отказ называют временем безотказной работы, а среднюю его величину определяют как отношение времени работы системы к математическому ожиданию числа отказов за принятый период времени. Для этих систем среднее время безотказной работы и среднее время между отказами практически совпадают.

**Среднее время простоя** — математическое ожидание времени вынужденного, нерегламентированного нахождения объекта в неработоспособном состоянии. **Среднее время восстановления** — математическое ожидание времени восстановления работоспособности. Сумма этих времен составляет время отказа в работе системы. Для систем станций в целом, если рассматривать не отдельные их элементы, эти времена не всегда удается разграничить. Кроме того, время отказа в общем случае не всегда совпадает с временем задержки поезда, поскольку один отказ системы, как правило, вызывает групповую задержку поездов, причем средний простой в связи с отказом задержанных поездов не равен времени отказа работы системы.

**Нестационарный коэффициент готовности** выражается вероятностью того, что объект будет работоспособным в заданный момент времени. **Средний коэффициент готовности** — усредненное на заданном интервале времени значение нестационарного коэффициента готовности. **Коэффициент готовности** — вероятность того, что

объект окажется работоспособным в произвольно выбранный момент времени в установившемся процессе эксплуатации. Этот коэффициент может быть определен также как доля времени, в течение которого объект находится в работоспособном состоянии в установившемся (стационарном) процессе эксплуатации. Стационарный коэффициент готовности является предельным значением, к которому стремятся величины нестационарного и среднего коэффициентов готовности. В связи с тем что коэффициент готовности характеризует работоспособность системы, может быть определен и коэффициент простоя (отказа), поскольку простой системы не совпадает с простоем задержанных поездов, который характеризует неработоспособность системы.

Если рассматривать работу системы с учетом временного резервирования, то коэффициенты готовности в зависимости от вида резерва будут выражаться зависимостями:

$$r_0 = \frac{T - T_0}{T} = 1 - \beta_0; \quad (2.1)$$

$$r_1 = \frac{T - (T_0 + T_1)}{T - T_0} = 1 - \beta_1; \quad (2.2)$$

$$r_2 = \frac{T - (T_0 + T_1 + T_2)}{T - (T_0 + T_1)} = 1 - \beta_2, \quad (2.3)$$

где  $T$  — расчетное время работы системы;  $T_0$  — время на проведение ремонтно-профилактических работ;  $T_1$  — время резерва на текущий год эксплуатации как часть расчетного суточного периода для устранения последствий отказов и восстановления работоспособности системы;  $T_2$  — время резерва для освоения объема работы на ближайшую перспективу (до наступления очередного этапа развития системы);  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$  — соответствующие временам  $T_0, T_1$  и  $T_2$  коэффициенты резерва.

В этих зависимостях время выражается в сутках.

Коэффициент готовности  $r_0$  характеризует долю времени, в течение которого в системе не ведутся профилактические и восстановительные работы, когда она находится в работоспособном состоянии. Коэффициент готовности  $r_1$ , в свою очередь, — доля времени, которая используется для пропуска поездов (или для их переработки, если речь идет о сортировочной станции), за вычетом потерь времени (эти потери времени могут быть переведены в потери пропускной (перерабатывающей) способности, которые связаны с вводом поездов в график и ликвидацией последствий отказов. И, наконец, коэффициент готовности  $r_2$  показывает готовность к безотказной работе не только с транспортным потоком текущего года эксплуатации, но и к обеспечению пропуска возрастающего потока в ближайшей перспективе (с этой целью в системе зарезервированы время  $T_2$  и соответствующая ему пропускная или перерабатывающая способность, а следовательно, и мощность системы).

Может быть определен и общий коэффициент готовности к безотказной работе системы:

$$r = \frac{T - (T_0 + T_1 + T_2)}{T} = r_0 r_1 r_2 = (1 - \beta_0) (1 - \beta_1) (1 - \beta_2) = 1 - \beta, \quad (2.4)$$

где  $\beta$  — общий коэффициент резерва.

Представляет также интерес **коэффициент оперативной готовности** — вероятность того, что объект, находясь в режиме ожидания (например, при перерыве в поступлении транспортного потока), окажется работоспособным в произвольный момент времени в установившемся процессе эксплуатации и, начиная с этого момента времени, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени. В момент ожидания работы система должна быть полностью готова к выполнению своих функций (характерно для транспортных объектов). Однако в связи с ожиданием возможны некоторые рассогласования ее элементов. Поскольку транспортные системы являются человеко-машинными, со сложной структурой оперативного управления, возможны рассогласования прежде всего в тех элементах, где работают операторы. В процессе ожидания не исключены и отказы других элементов системы. Коэффициент оперативной готовности играет существенную роль в общем комплексе показателей работоспособности транспортной системы.

Такая же роль принадлежит и **нестационарному коэффициенту оперативной готовности** — вероятности того, что объект, находясь в режиме ожидания, окажется работоспособным в заданный момент времени и, начиная с этого момента времени, будет работать безотказно в течение определенного интервала.

Показатели работоспособности влияют на степень использования технических средств. Для оценки работоспособности и безотказности системы рассчитывают **коэффициент технического использования** — отношение среднего времени наработки объекта за некоторый период эксплуатации к сумме средних значений времени наработки (безотказной работы), простоя, обусловленного техническим обслуживанием, и продолжительности ремонтов за тот же период. Чем больше значение этого коэффициента, тем работоспособнее система, меньше затраты времени на ее техническое обслуживание и восстановительный ремонт. Этот коэффициент используют для определения работоспособности локомотивов, вагонов, устройств пути, контактной сети и других элементов транспортных систем.

В число показателей работоспособности и надежности входят такие показатели, как интенсивность отказов, ведущая функция потока отказов, параметр потока отказов и др. Основные показатели надежности в соответствии с принятой их классификацией сведены в табл. 2.1.

Как видно из табл. 2.1, каждому свойству, характеризующему надежность системы или ее элементов, соответствует целая группа взаимосвязанных показателей надежности. Для подвижного состава, устройств пути, автоматики, телемеханики и связи и других эле-

Таблица 2.1

Основные показатели надежности

| Свойство                          | Показатель                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Безотказность                     | Вероятность безотказной работы<br>Средняя наработка на отказ<br>Средняя наработка между отказами<br>Интенсивность отказов<br>Ведущая функция потока отказов<br>Параметр потока отказов                                                                                                                                                                                                                    |
| Ремонтопригодность                | Вероятность восстановления<br>Среднее время простоя<br>Среднее время восстановления<br>Интенсивность восстановления                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Безотказность и ремонтпригодность | Коэффициент готовности<br>Коэффициент простоя<br>Коэффициент технического использования<br>Коэффициент оперативной готовности                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Долговечность                     | Гамма-процентный ресурс<br>Средний ресурс<br>Средний суммарный ресурс<br>Гамма-процентный срок службы<br>Средний срок службы<br>Средний срок службы до списания<br>Средний межремонтный ресурс<br>Медианный ресурс (ресурс, соответствующий медиане распределения ресурса)<br>Медианный срок службы (срок службы, соответствующий медиане распределения срока службы)<br>Средний межремонтный срок службы |
| Сохраняемость                     | Средний срок сохраняемости<br>Интенсивность отказов при хранении<br>Параметр потока отказов при хранении<br>Гамма-процентный срок сохраняемости<br>Медианный срок сохраняемости (срок сохраняемости, соответствующий медиане распределения этого срока)                                                                                                                                                   |

ментов транспортных технологических систем важны и такие свойства надежности, как долговечность и сохраняемость.

К показателям долговечности относится, в частности, **гамма-процентный ресурс** — наработка (время безотказной работы), в течение которой объект (система) не достигает предельного состояния с заданной вероятностью  $\gamma$ . Следовательно, с вероятностью  $1 - \gamma$  объект (локомотив, вагон, рельс, ЭВМ и др.) может перейти в предельное состояние, когда его уже невозможно или нецелесообразно эксплуатировать. Для таких систем, как станция, грузовой двор, контейнерный терминал, гамма-процентный ресурс не имеет смысла, так как эти системы не стареют в том смысле, как это имеет место применительно к техническим элементам. Предельное состояние подобных систем — полное заполнение поездами, вагонами, гру-

зами, когда они начинают отказывать в связи с недостаточными длиной и числом путей, емкостью складов и по другим причинам. Достижение и недостижение этих состояний также оценивается соответствующими вероятностями, которые отражают в этих случаях уже совершенно иные закономерности функционирования системы, не связанные непосредственно с потерей физико-технических свойств технических элементов этих больших систем.

## 2.2. Количественная мера надежности транспортных систем

Математические определения показателей надежности целесообразно сначала рассмотреть в наиболее общей форме на примере так называемых невосстанавливаемых объектов. Под невосстанавливаемыми системами понимают не только те системы, которые после отказа не подлежат восстановлению, но и прежде всего те объекты и системы, для которых последствия отказов — дополнительные экономические издержки, ухудшение показателей работы (снижение скорости движения поездов, замедление оборота вагонов и др.) — несобратимы.

Отказы в работе всех типов станций, узлов, участков и других транспортных систем, выражающиеся в задержке поездов и вагонов, являются, как правило, необратимыми. В процессе оперативного управления отдельные задержки могут быть устранены за счет нагона времени. Например, задержка (опоздание) пассажирского поезда может быть устранена за счет сокращения продолжительности последующих стоянок или путем ускорения движения. Но меры по ликвидации опозданий требуют дополнительных расходов (топлива, задержек других, менее срочных, поездов и др.).

Основная количественная мера работоспособности и безотказности, т. е. надежности работы системы, — время безотказной работы. Существует множество причин, связанных с объемом работы, мощностью основных элементов и их надежностью, которые вызывают отказы — задержки поездов и вагонов. Поэтому время безотказной работы как интервал от момента восстановления работоспособности до следующей ее потери (начала отказа) является случайной величиной  $\theta$ . В силу разнообразия влияющих факторов для станций и других транспортных систем колебания значений этой величины не устраняют ни управленческая деятельность диспетчерского аппарата, ни технологические воздействия на ход производственных процессов на станциях и участках.

Показатели надежности определяются исходя из вероятностных и статистических предположений. Статистические определения показателей надежности в большей степени соответствуют практическому расчету на основе статистических выборок и наблюдений. При неограниченном увеличении числа наблюдений статистические значения показателей надежности приближаются (сходятся по вероятности) к вероятностным.

Вероятность безотказной работы системы в интервале времени от 0 до  $t_0$

$$P(t_0) = P(0, t_0) = P\{\theta_1 \geq t_0\} = 1 - F_1(t_0), \quad (2.5)$$

где 0 — время безотказной работы системы до отказа;  $F_1(t_0)$  — функция распределения случайной величины  $\theta$ .

Выражение  $P\{\theta_1 \geq t_0\}$  характеризует вероятность того, что из всех возможных значений время безотказной работы системы больше или равно заданному отрезку времени  $[0; t_0]$  —  $\theta_1 \geq t_0$ . Таким образом, вероятность безотказной работы на этом отрезке является количественной мерой надежности работы  $P(0; t_0)$ . Если не рассматривать момент начала отсчета времени 0, то эту вероятность можно обозначить как  $P(t_0)$ .

Статистическое определение надежности работы в течение  $t_0$

$$\bar{P}(t_0) = \frac{N(t_0)}{N(0, t_0)} = 1 - \frac{n(t_0)}{N(0, t_0)}, \quad (2.6)$$

где  $N(t_0)$  — число пропущенных без отказа (принятых, отправленных, сформированных и др.) поездов или, в общем виде, число исправных объектов в момент времени  $t_0$ ;  $N(0, t_0)$  — общее число поездов, включая поезда, пропущенные безотказно, и поезда, которые имели задержки (в общем виде — число исправных объектов в начале работы);  $n(t_0)$  — число задержанных поездов в течение времени  $t_0$ .

На рис. 2.1 показан процесс подвода поездов к станции  $M$ . На оси времени  $X-K$  показаны поезда в соответствии с графиком движения в верхней части рисунка, подведенные на станцию  $K$  со станции  $X$ . За период  $t_0$  подведено 5 поездов, из них третий поезд задержан (порядковый номер 3 обведен кружком). Таким образом, на станции  $K$  для поездов, подведенных со станции  $X$ ,  $N(0, t_0) = 5$ ,  $n(t_0) = 1$ , а  $\bar{P}(t_0) = 1 - \frac{1}{5} = 0,8$ ; для поездов, подведенных со станции  $\Pi$ ,  $N(0, t_0) = 12$  (ось  $\Pi-K$  на рис. 2.1),  $n(t_0) = 3$ , а  $\bar{P}(t_0) = 1 - \frac{3}{12} = 0,75$ . Если параметры рассчитать по суммарному транспортному потоку, то  $N(0, t_0) = 18$ ;  $n(t_0) = 4$ , а  $\bar{P}(t_0) = 1 - \frac{4}{18} = 0,778$  (см. ось  $K-M$ ).

То, что задержки (отказы) происходили на станции  $K$ , может быть не связано с низкой надежностью станции  $K$  или  $M$ . Эти станции расположены на подходе к узлу и отказы обусловлены работой крупной сортировочной станции этого узла. Приведенный фрагмент хорошо иллюстрирует зависимость (2.6). Он показывает технологическую взаимосвязь элементов системы и, разумеется, не содержит достаточных статистических данных в связи с небольшой продолжительностью времени  $t_0$ , чтобы судить о надежности работы узла или сортировочной станции. В связи с большим взаимным влиянием транспортных комплексов система, в территориальных пределах которой происходят отказы, не всегда является источником их возникновения.

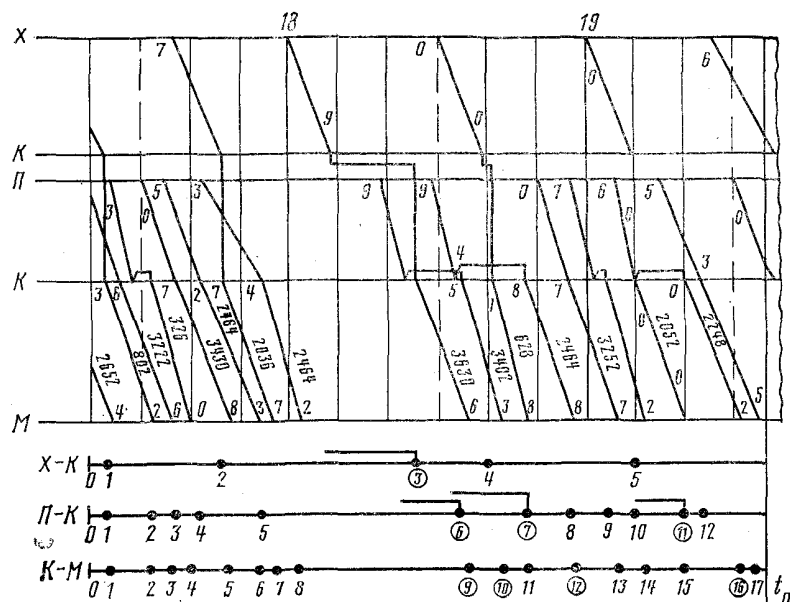


Рис. 2.1. Определение понятий  $\bar{P}(t_0)$  и  $\bar{Q}(t_0)$  на примере работы станции

Вероятность безотказной работы системы в интервале времени  $t, t+t_0$  определяется исходя из того, что она проработает безопасно в течение времени  $\theta_1 \geq t+t_0$  при условии, что надежность системы в интервале  $[0, t]$  составляет  $P(0, t)$ :

$$P(t, t+t_0) = P\{\theta_1 \geq t+t_0 / \theta > t\} = P(0, t+t_0) / P(0, t) = P(t+t_0) / P(t), \quad (2.7)$$

где  $P(t, t+t_0)$  — условная вероятность того, что система проработает безотказно в течение времени  $t, t_0$ , если ее надежность до момента времени  $t$  составляет  $P(t)$ .

Если допустить, что поток отказов — задержек поездов (передач), вагонов — является стационарным, когда вероятность появления того или иного числа отказов зависит только от длины отрезка  $t_1, t_2$  и не зависит от того, где именно на оси времени он находится, то расчет условной вероятности появления отказов на отрезке  $t+t_0$  для станций и узлов сводится к определению вероятности безотказной работы в течение интервала времени  $(0, t+t_0)$ . Эта вероятность выражается следующим образом:

$$\bar{P}(t, t+t_0) = N(t+t_0) / N(t) + N'(t_0), \quad (2.8)$$

где  $N(t+t_0)$  — число поездов, не имеющих отказов к моменту времени  $t+t_0$ ;  $N(t)$  — число поездов, не имеющих отказов к моменту времени  $t$ ;

$N'(t_0)$  — общее число поездов, пропущенное (принятое или отправленное) за период  $[t, t_0]$ .

Вероятность отказа систем в интервале времени  $0, t_0$

$$Q(t_0) = Q(0, t_0) = P\{\theta_1 < t_0\} = F(t_0), \quad (2.9)$$

где  $Q(t_0)$  — вероятность того, что система откажет в течение заданного интервала времени  $(0, t_0)$ , начав работать в начальный момент времени  $t=0$ .

В соответствии с зависимостью (2.9) величина  $Q(t_0)$  выражает вероятность того, что время безотказной работы  $\theta_1$  будет меньше  $t_0$ , что соответствует функции распределения  $F(t_0)$ .

Между функциями  $P(t_0)$  и  $Q(t_0)$  существуют соотношения:

$$Q(t_0) = 1 - P(t_0); \quad (2.10)$$

$$P(t_0) = 1 - Q(t_0). \quad (2.10a)$$

В теории надежности  $P(t_0)$  называют функцией надежности, а  $Q(t_0)$  — функцией ненадежности или функцией отказов.

Если физические, технические, технологические и информационно-управляющие качества элементов системы и системы в целом остаются неизменными и нагрузка на нее с течением времени возрастает (для транспортных систем — величина транспортного потока), то функция  $P(t)$  имеет следующие свойства:

1.  $P(t)$  является монотонно убывающей функцией времени, если оси времени  $t$  поставлена в соответствие непрерывно возрастающая нагрузка.

2. Если нагрузка носит дискретный характер, то и функция  $P(t_0)$  будет дискретно убывающей.

3. Для станций, узлов и других систем при  $t=0$  (в некоторый начальный заранее определенный момент времени)  $0 \leq P(0) \leq 1$ .

Свойства функции  $Q(t_0)$  носят противоположный характер по отношению к  $P(t)$ . Статистическое определение функции отказов выглядит следующим образом:

$$\bar{Q}(t_0) = n(t_0) / N(t_0), \quad (2.11)$$

где  $n(t_0)$  — число поездов, которое было задержано от момента  $t=0$  до момента  $t=t_0$ ;  $N(t_0)$  — общее число поездов за тот же интервал времени.

Эта функция для транспортных систем выражена не через число отказов — перерывов в работе системы, а через последствия отказов — число задержанных поездов.

Применительно к объектам, свойства которых с течением времени ухудшаются (локомотив, вагон и др.), статистическое определение функции отказов будет

$$\bar{Q}(t_0) = n(t_0) / N(0), \quad (2.12)$$

где  $N(0)$  — число исправных объектов в начальный момент времени;  $n(t_0)$  — число отказавших объектов к моменту  $t_0$ .

Значение функции отказов на примере (см. рис. 2.1) по данным суммарного транспортного потока (ось  $K-M$ ) составляет  $Q(t_0) =$

$= 4/18 = 0,222$ . Для статистического определения функции отказов справедливо также

$$\bar{Q}(t_0) = 1 - \bar{P}(t_0). \quad (2.13)$$

Рассмотрим вероятность отказа системы в интервале времени  $t$ ,  $t + t_0$  или условную вероятность того, что случайное время работы системы до отказа окажется меньше величины  $t + t_0$  при условии, что система уже проработала безотказно до момента времени  $t$ . Для объектов, эксплуатационные качества которых ухудшаются в зависимости от времени, эта вероятность

$$Q(t, t + t_0) = 1 - P(t, t + t_0) = 1 - P(t + t_0)/P(t), \quad (2.14)$$

где  $P(t)$  — вероятность безотказной работы объекта в течение времени  $t$ .

Статистически эта вероятность определяется как

$$\begin{aligned} \bar{Q}(t, t + t_0) &= \frac{n(t + t_0) - n(t)}{N(t)} = \frac{n(t + t_0) - n(t)}{N(t)} = \\ &= 1 - \frac{N(t + t_0)}{N(t)} = \frac{\Delta n(t, t_0)}{N(t)}, \end{aligned} \quad (2.15)$$

где  $N(t)$  — число исправных объектов к моменту времени  $t$ .

В выражении (2.15) разность  $\Delta n(t, t_0)$  представляет собой число объектов, отказавших в интервале времени  $[t, t + t_0]$ :

$$\Delta n(t, t_0) = N(t) - N(t + t_0), \quad (2.16)$$

или

$$\Delta n(t, t_0) = n(t + t_0) - n(t), \quad (2.16a)$$

где  $n(t + t_0)$  — число отказавших объектов к моменту времени  $t + t_0$ ;  $n(t)$  — число отказавших объектов к моменту времени  $t$ .

Для станций статистическое определение вероятности отказа системы в интервале времени  $t, t + t_0$

$$\bar{Q}(t, t + t_0) = \frac{n(t + t_0) - n(t)}{N(t + t_0)} = 1 - \frac{N'(t + t_0)}{N(t + t_0)} = \frac{\Delta n(t, t_0)}{N(t + t_0)}, \quad (2.17)$$

где  $\Delta n(t, t_0)$  — число задержанных поездов в течение периода  $[t, t + t_0]$ ;  $N'(t + t_0)$  — число безотказно пропущенных (сформированных, отправленных) поездов в этом же периоде;  $N(t + t_0)$  — общее число поездов, пропущенных за период.

Так, если на рис. 2.1 принять  $t = 18$  ч, а  $t + t_0 = 19$  ч 40 мин, то  $\bar{Q}(t, t + t_0) = \frac{4-0}{10} = 1 - \frac{6}{10} = 0,4$ , т. е. вероятность отказа работы системы в этом интервале по статистическим данным составила 0,4. Это, конечно, слишком высокая вероятность отказа, и она не может в полной мере характеризовать надежность работы по пропуску поездов в связи с малой величиной отрезка  $t, t + t_0$  (1 ч 40 мин). На практике  $\Delta n(t, t_0)$  должно быть достаточно велико, а следовательно, достаточно большим должен быть и отрезок времени  $t, t_0$ .

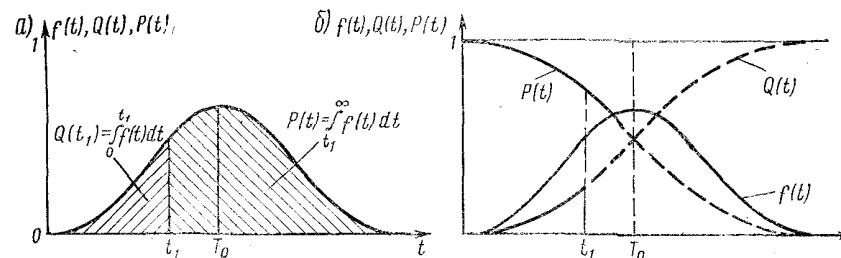


Рис. 2.2. Геометрическая интерпретация функций:  
а — плотности распределения вероятностей; б — надежности и отказов

Поскольку надежность работы систем выражается функцией  $F(t)$ , которая интерпретируется как функция надежности  $P(t) = 1 - F(t)$  или ненадежности (отказов)  $Q(t) = 1 - P(t)$ , то при количественном анализе рассматривается и плотность вероятностей отказов:

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t) = \frac{d}{dt} Q(t) = \frac{d}{dt} [1 - P(t)] = -\frac{d}{dt} P(t), \quad (2.18)$$

где  $f(t)$  — плотность вероятности отказа к моменту времени  $t$ .

Плотность распределения может быть определена и статистическим путем. Для этого рассмотрим состояние системы в конце периода времени  $t + \Delta t$ . Если обозначить общее число пропущенных (принятых, отправленных) поездов к моменту  $t + \Delta t$  через  $N(t + \Delta t)$ , а число поездов, на которое распространено влияние отказов к моменту времени  $t$ , как  $n(t)$ , число задержанных поездов на момент  $t + \Delta t$  — через  $n(t + \Delta t)$ , то статистически плотность распределения отказов будет

$$\bar{f}(t) = \frac{n(t + \Delta t) - nt}{n(t + \Delta t) \Delta t} = \frac{N(t + \Delta t) - N'(t + \Delta t)}{N(t + \Delta t) \Delta t} = \frac{\Delta n(t, \Delta t)}{N(t + \Delta t) \Delta t}, \quad (2.19)$$

где  $N'(t + \Delta t)$  — число безотказно обработанных поездов на конец периода  $t + \Delta t$ ;  $\bar{f}(t)$  — частота отказов в интервале времени  $[t, t + \Delta t]$ .

Таким образом, плотность распределения отказов представляет собой статистическую вероятность (частоту) отказов в интервале времени  $[t, t + \Delta t]$ . Как видно из выражения (2.19), плотность определяется как отношение числа задержанных поездов в интервале продолжительностью  $\Delta t$  к произведению числа поездов, пропущенных к концу периода  $t + \Delta t$ , на длительность интервала  $\Delta t$ .

Геометрическая интерпретация плотности вероятности отказа, а также функций  $P(t)$  — надежности работы системы и  $Q(t)$  — отказа в работе приведена на рис. 2.2. Площадь под кривой  $f(t)$

$$F(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) dt = 1.$$

Учитывая, что время безотказной работы и время отказов изменяется в пределах  $0 \leq t \leq \infty$ , правомерно записать:

$$F(t) = \int_0^{\infty} f(t) dt = 1.$$

Функция отказов на момент времени  $t$  через плотность вероятности отказов выражается как

$$Q(t) = \int_0^t f(t) dt,$$

а функция надежности —

$$P(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt = 1 - \int_0^t f(t) dt = 1 - Q(t).$$

Наряду с плотностью распределения отказов определяют также **интенсивность** отказов системы в момент времени  $t$ . Вероятностное выражение этого показателя имеет вид

$$\lambda(t) = \frac{1}{1 - F(t)} \frac{d}{dt} F(t) = \frac{f(t)}{P(t)}, \quad (2.20)$$

где  $\lambda(t)$  — плотность вероятностей отказов системы к моменту времени  $t$  при условии, что до наступления этого момента отказов в работе системы не было.

Статистическое определение интенсивности отказов для систем, пропускающих транспортный поток с трансформацией и отказы которых выражаются через задержки поездов, практически совпадает со статистическим определением плотности распределения отказов, т. е.

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{\Delta n(t, \Delta t)}{N(t + \Delta t) \Delta t}. \quad (2.21)$$

Например, если за период  $\Delta t = 1$  сут пропущено 100 поездов, т. е.  $N(t + \Delta t) = 100$ , а из них задержано 30, т. е.  $\Delta n = 30$ , то интенсивность отказов в расчете на 1 сут составит 30:  $(100 \cdot 1) = 0,3$  отказа на один пропускаемый поезд в сутки. В ряде случаев интенсивность отказов определяют как математическое ожидание доли отказавших элементов за отрезок времени  $[t, t + \Delta t]$  от их начального количества к числу неотказавших образцов за время  $t$ , считая, что это время отсчитано от некоторого начального момента времени  $t_0$ . Интенсивность отказов в этом случае можно рассчитать как

$$\bar{\lambda}(t, t + \Delta t) = \frac{\int_t^{t + \Delta t} f(t) dt}{[t, t + \Delta t] [1 - F(t)]} = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{[t, t + \Delta t]} \frac{1}{P(t)}.$$

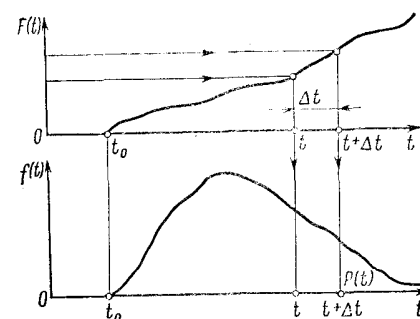


Рис. 2.3. Определение интенсивности отказов  $\lambda(t)$

Таким образом, интенсивность отказа представляет собой условную вероятность отказов в течение времени  $[t, t + \Delta t]$ . Если рассматривать отказы физических элементов системы (потеря работоспособности устройств пути, стрелочных переводов, автоматики, телемеханики и связи, других механических средств), то можно предположить, что до некоторого момента времени  $t_0$  отказы отсутствуют, и тогда  $F(t_0) = 0$ . В точке  $t = t_0$  рассматривают начальную интенсивность отказов. В этой точке в соответствии с предположением, что  $F(t_0) = 0$ , функция надежности  $P(t_0) = 1$ . Начальная интенсивность отказов определяется выражением

$$\lambda(t_0, \Delta t) = \frac{F(t_0 + \Delta t)}{\Delta t}. \quad (2.22)$$

Если обозначить приращение времени  $\Delta t$  через  $T$  и принять  $t_0 = 0$ , то начальная интенсивность отказов

$$\lambda(T) = \frac{F(T)}{T}. \quad (2.23)$$

Сравнивая выражение начальной интенсивности отказов с формулой интенсивности отказов (2.21), можно установить, что в данном случае мы определяем начальную интенсивность отказов. В рассмотренном ранее примере интенсивность отказов 0,3 в расчете на один принимаемый поезд за сутки представляет начальную интенсивность отказов за период  $\Delta t = 1$  сут в предположении, что до наступления этого отрезка времени отказов не было. Выражения (2.21) и (2.23) удобны для практического использования при определении интенсивности отказов транспортных систем, в том числе и отказов по транспортному потоку в целом (поездо-, вагоно-, грузопотоку в зависимости от вида системы).

Графический расчет интенсивности отказов показан на рис. 2.3. В верхней части показано приращение функции  $F(t)$  за отрезок времени  $\Delta t$ , в нижней — значение этого приращения на кривой плотности распределения  $f(t)$ .

Существует также понятие **мгновенная** интенсивность отказов  $G(t)$ . Это — предельное значение интенсивности отказов, когда отрезок времени  $[t, t + \Delta t] \rightarrow 0$ , т. е.

$$G(t) = \lim_{[t, t + \Delta t] \rightarrow 0} \left\{ \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{[t, t + \Delta t]} \right\} \frac{1}{P(t)} = \frac{f(t)}{P(t)}.$$

Таким образом, мгновенная интенсивность отказов, или просто интенсивность отказов, представляет собой выражение, определяемое формулой (2.20), т. е. плотность вероятностей отказов к моменту времени  $t$  при условии, что до наступления этого момента отказов в работе системы не было. Необходимо различать интенсивность отказов как вероятностную или статистическую величину, определяемую формулами (2.20) или (2.21), и физический поток отказов в работе системы. Если, например, проводить наблюдения за потоком отказов, приняв в качестве единицы отсчета какой-то отрезок времени  $T$  (час, сутки и т. д.), то поток отказов может быть однозначно определен числом отказов, попадающих в каждый отрезок времени  $T$  (рис. 2.4).

Для транспортных систем — станций, узлов, участков, контейнерных терминалов, грузовых дворов — поток отказов может быть однозначно задан статистической выборкой об отказах в периоде времени  $T$  либо законом распределения потока отказов в периоде  $T$ , т. е. распределением интенсивности отказов в этом периоде.

Большой интерес представляет традиционное для теории надежности изучение случайного потока отказов как случайного процесса в реальном масштабе времени (рис. 2.4, б). Поток отказов разделен последовательными интервалами неодинаковой продолжительности  $\theta_i$ , когда система была в работоспособном состоянии, и простоями  $t_{bi}$ , в течение которых происходило восстановление работоспособности системы или объекта. Под восстановлением понимают не только ремонт той или иной части системы, но и замену

неисправного локомотива, вагона, устранение коммерческих неисправностей, высвобождение путей парков для приема поездов, подвоз локомотивов для отправления скопившихся поездов, получение необходимой информации или восстановление ее достоверности, если отсутствие информации или ее недостоверность задерживали работу системы, и др.

Очень важной характеристикой является **среднее время работы системы (объекта) до отказа**, которое определяется как математическое ожидание интервалов между отказами:

$$T_p = M \{ \theta_i \} = \int_0^{\infty} x f(x) dx = \int_0^{\infty} x dQ(x) = \int_0^{\infty} P(x) dx. \quad (2.24)$$

При статистическом анализе среднее время работы системы до отказа определяют по начальному числу объектов, работоспособность которых анализируется. Для транспортных систем большой размерности это время необходимо определять в расчете на число отказов, т. е.

$$\bar{T}_p = \frac{1}{n} (\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_n) = \frac{\sum_{i=1}^n \theta_i}{n}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2.25)$$

где  $n$  — число отказов системы за анализируемый период времени.

Аналогично можно рассчитать среднее время простоя и восстановления безотказности работы системы:

$$\bar{T}_b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{bi}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (2.26)$$

Среднее время восстановления безотказности работы системы определяется и как вероятностная величина:

$$T_b = M \{ t_b \} = \int_0^{\infty} t f_b(t) dt = \int_0^{\infty} t dF_b(t) = \int_0^{\infty} [1 - F_b(t)] dt, \quad (2.27)$$

где  $T_b$  — математическое ожидание (среднее значение) времени восстановления работоспособности системы;  $f_b(t)$  — плотность распределения времени восстановления;  $F_b(t)$  — функция распределения времени восстановления.

Рассматривается также интенсивность восстановления безотказной работы системы в момент времени  $t$ , отсчитываемый от момента начала восстановления. Эта величина представляет собой условную плотность вероятности восстановления системы к моменту времени  $t$ . Причем допускается, что до момента времени  $t$  восстановление безотказной работы системы не произошло. Интенсивность восстановления системы в момент времени  $t$  можно определить вероятностным способом:

$$\mu(t) = \frac{1}{1 - F_b(t)} \frac{1}{dt} F_b(t) = \frac{f_b(t)}{1 - F_b(t)}, \quad (2.28)$$

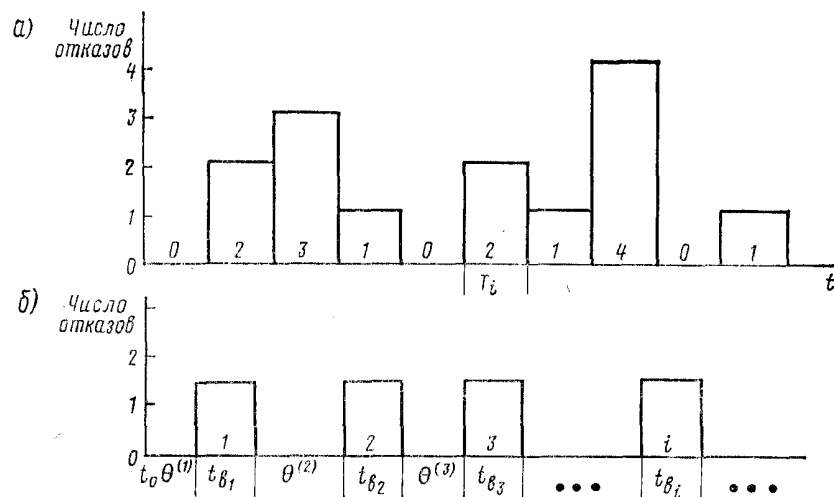


Рис. 2.4. Поток отказов:

а — интенсивность отказов в период времени  $T$ ; б — поток отказов в реальном масштабе времени

где  $F_B(t)$  — функция распределения времени восстановления,  $F_B(t) = P\{t_B \leq t\}$ ;  $\frac{1}{\Delta t} F_B(t)$  — плотность распределения функции  $F_B(t)$ .

Интенсивность восстановления безотказной работы в момент времени  $t$  определяется и статистическим путем:

$$\bar{\mu}(t) = \frac{n_B(t + \Delta t) - n_B(t)}{n(t) \Delta t} = \frac{\Delta n_B(t, t + \Delta t)}{n(t) \Delta t}, \quad (2.29)$$

где  $n_B(t)$  — число задержанных поездов или других транспортных единиц к моменту времени  $t$ ;  $n_B(t + \Delta t)$  — число задержанных поездов от момента начала их задержки до момента  $t + \Delta t$ ;  $\Delta n_B(t, t + \Delta t)$  — число задержанных и «восстановленных», т. е. принятых (отправленных), пропущенных поездов в интервале времени  $(t, t + \Delta t)$ ;  $n(t)$  — число задержанных поездов от момента начала их задержки, но не принятых (отправленных, пропущенных и т. д.) к моменту времени  $t$ .

Таким образом,  $\bar{\mu}(t)$  представляет собой отношение числа задержанных, но уже принятых поездов в интервале времени к произведению числа задержанных, но не принятых (отправленных, пропущенных) поездов за время  $t$  на длительность интервала  $\Delta t$ . В этом случае считают, что длительность интервала  $\Delta t$  небольшая,  $\Delta n_B(t, t + \Delta t)$  имеет достаточную величину. Расчет величины  $\bar{\mu}(t)$  показан на рис. 2.5.

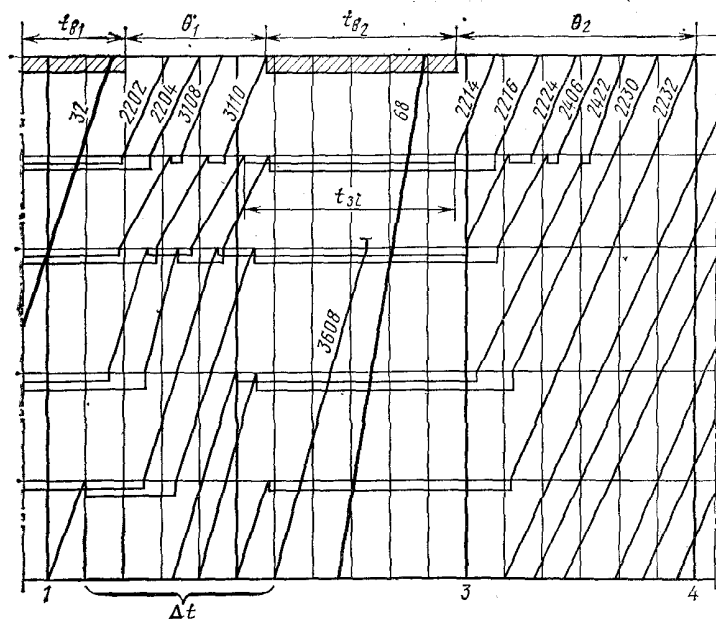


Рис. 2.5. Фрагмент графика выполненного движения на подходе к сортировочной станции

Допустим, что на момент времени  $t$ , например 1 ч 10 мин (см. рис. 2.5), из числа задержанных приняты поезда № 2202, 2204, 3108 и 3110. Следовательно, если  $\Delta t = 1$  ч и  $n_B(t + \Delta t) = 4$  поезда, в число задержанных поездов на момент времени  $t = 1$  ч 10 мин входят еще и поезда № 2214, 2216, 2224, 2406, 2422, 2230, 2232. Интенсивность восстановления по формуле (2.29) составит:

$$\mu_B(t) = \frac{[n_B(t + \Delta t) = 11] - [n_B(t) = 7]}{[n_B(t + \Delta t) = 11] \cdot 1} = \frac{4}{11} = 0,36 \text{ поезда/ч.}$$

Для транспортных систем, когда в соответствии с закономерностями движения потоков время простоя и восстановления безотказности  $t_B$  не равно времени задержки и простоя собственно транспортных единиц (поездов, подач), определяют поездо-часы, вызванные отказами в работе за рассматриваемый период времени:

$$nt = \sum_{i=1}^n t_{i3}, \quad i = 1, 2, \dots, n_3, \quad (2.30)$$

где  $n$  — число задержанных поездов (транспортных единиц) за период времени  $t$  (Т);  $t_{i3}$  — время (в часах) задержки  $i$ -го поезда, вызванной отказом системы или ее отдельного элемента.

Определяется также среднее время задержки поезда, вызванное отказами:

$$\bar{t}_3 = \frac{\sum_{i=1}^n t_{i3}}{n}. \quad (2.31)$$

Если установлена плотность распределения времени задержки, то математическое ожидание

$$T_3 = \{t_3\} = \int_0^{\infty} x f(x) dx. \quad (2.32)$$

Кроме того, рассчитывают время задержки, приходящееся на один пропущенный за рассматриваемый период поезд, т. е. удельное время задержки:

$$\bar{t}_{3y} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{i3}}{N(t)}, \quad (2.33)$$

где  $N(t)$  — число пропущенных поездов, включая поезда, пропущенные безотказно ( $N_6$ ) и имеющие задержки ( $n$ ).

Количественные показатели надежности работы восстанавливаемых систем принципиально не отличаются от показателей надежности невосстанавливаемых систем.

Вероятность безотказной работы такой системы в интервале времени  $0, t_0$  определяется в соответствии с выражением (2.5). Возможность безотказной работы системы в течение заданного времени ра-

боты  $t_0$ , начиная с момента окончания  $k$  — 1-го восстановления [27], оценивается вероятностью

$$P_K(t_0) = P \left\{ t + t_0 \leq \sum_{i=1}^{k-1} (\theta_i + t_{Bi}) + \theta_K \mid \sum_{i=1}^{k-1} (\theta_i + t_{Bi}) = t_0 \right\} = \\ = P \{ \theta_K \geq t_0 \} = 1 - F_K(t_0). \quad (2.34)$$

Статистическое определение применительно к транспортным системам было приведено ранее — формула (2.8). Таким образом, выражение (2.34) аналогично по смыслу выражению (2.7), однако оно трансформировано применительно к потоку отказов и восстановлений безотказности работы системы.

Вероятностное определение коэффициента оперативной готовности безотказной работы системы в течение заданного времени работы записывается в виде

$$R(t_0) = \lim_{t \rightarrow \infty} R(t, t + t_0), \quad (2.35)$$

где  $R(t_0)$  — вероятность того, что система будет работать безотказно в течение заданного времени  $t_0$ , начиная с произвольного достаточно удаленного момента времени  $t$ .

В теории надежности этот коэффициент рассчитывают для любых распределений времени безотказной работы  $\theta$  и времени восстановления  $t_B$ . Если эти распределения имеют соответствующие средние значения  $T_P$  и  $T_B$ , то коэффициент оперативной готовности

$$R(t_0) = \frac{1}{T_P + T_B} \int_{t_0}^{\infty} P_{\infty}(t) dt, \quad (2.36)$$

где  $P_{\infty}(t)$  — функция распределения времени работы от  $k$  — 1-го восстановления до  $k$ -го отказа при безграничном увеличении номера  $k$ .

В выражении (2.36)  $P_{\infty}(t) = \lim_{k \rightarrow \infty} P_K(t) = 1 - F_{\infty}(t)$ .

Исходя из выражения (2.33), коэффициент оперативной готовности системы можно определить как

$$R(t_0) = \frac{T_B}{T_P + T_B},$$

где  $T_P$  — математическое ожидание времени безотказной работы системы в течение заданного периода времени  $t_0$ .

Этот коэффициент является существенной характеристикой работоспособности транспортных систем и его нетрудно определить статистическим путем.

Вероятность отказа восстанавливаемой системы определяется в соответствии с выражением (2.9), если она рассчитывается для интервала времени работы системы  $0, t_0$ . Вероятность же отказа системы в течение заданного времени работы  $t_0$ , начиная с момента окончания  $k$  — 1-го восстановления,

$$Q_K(t_0) = P \{ \theta_K < t_0 \} = F_K(t_0) = 1 - P_K(t_0), \quad (2.37)$$

где  $Q_K(t_0)$  — вероятность того, что система откажет в течение заданного времени работы  $t_0$  при условии, что начало этого интервала времени совпадает с моментом  $k$  — 1-го восстановления безотказной работы.

Статистическое определение функций отказов для восстанавливаемых систем:

$$\bar{Q}_K(t_0) = \frac{n_K(t_0)}{N(t_0)} = 1 - \frac{N_{\delta}(t_0)}{N(t_0)}, \quad (2.38)$$

где  $n_K(t_0)$  — число поездов, задержанных в связи с отказами работы системы в течение периода времени  $t_0$ , начиная с момента времени  $t_{K-i}$ ;  $N_{\delta}(t_0)$  — число безотказно пропущенных поездов за тот же период времени;  $N(t_0)$  — общее число поездов, пропущенных за период времени  $t_0$  [ $N_{\delta}(t_0) + n_K(t_0)$ ].

Математические определения функции отказов по выражениям (2.11) и (2.38) являются идентичными. Совпадают также для восстанавливаемых и восстанавливаемых систем и математические определения плотности распределения отказов системы, интенсивности отказов системы в момент времени  $t$ , среднего времени работы системы до отказа. Для транспортных систем являются эквивалентными такие понятия, как среднее время работы до отказа и среднее время работы между отказами.

Наряду с коэффициентом оперативной готовности, определяемым по формулам (2.35) и (2.36), может определяться также нестационарный (на некоторый момент времени  $t$ ) коэффициент готовности системы к безотказной работе

$$K(t) = \sum_{i=1}^{\infty} P \left\{ \sum_{k=0}^i (\theta_K + t_{BK}) < t < \sum_{k=0}^i (\theta_K + t_{BK}) + \theta_i + 1 \right\}. \quad (2.39)$$

Нестационарный коэффициент готовности совпадает с коэффициентом оперативной готовности, если период времени  $t_0 = 0$ , т. е.  $K(t) = R(t, t_0 = 0)$ . Нестационарный коэффициент готовности, таким образом, характеризует вероятность того, что в момент времени  $t$  система окажется в работоспособном (безотказном) состоянии. Статистическим путем он рассчитывается по формуле

$$K(t) = \frac{N_{\delta}(t)}{N(t)} = 1 - \frac{n(t)}{N(t)}, \quad (2.40)$$

где  $N_{\delta}(t)$  — число поездов в системе в момент времени  $t$ , на которые не оказали влияние отказы;  $N(t)$  — общее число поездов в системе в момент времени  $t$ ;  $n(t)$  — число задержанных поездов к этому моменту времени.

Так, если условно принять за систему два перегона  $P-K$  и  $K-M$  (см. рис.2.1), то в 19 ч 15 мин в системе находились 3 поезда, из них один в состоянии отказа. В этом случае нестационарный коэффициент готовности составит  $1 - \frac{1}{3} = \frac{2}{3}$ .

Определяется, кроме того, нестационарный коэффициент простоя системы, который показывает долю поездов, находящихся в системе в состоянии отказа (задержки):

$$K(t) = 1 - K(t). \quad (2.41)$$

Функции надежности и отказов, плотность распределения вероятности отказа к моменту времени  $t$ , функция интенсивности отказов, как видно из их вероятностных и статистических определений, взаимосвязаны друг с другом: если известна одна из них, можно рассчитать и все остальные. Эти взаимосвязи, представляющие исходные и основные положения теории надежности, приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Функциональная связь между показателями надежности

| Показатель                    | Известная функция | Формулы для определения трех остальных функций |                           |                           |                                               |
|-------------------------------|-------------------|------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------|
|                               |                   | $P(t)$                                         | $Q(t)$                    | $f(t)$                    | $\lambda(t)$                                  |
| Функция надежности            | $P(t)$            | —                                              | $1 - P(t)$                | $-\frac{d}{dt} P(t)$      | $-\frac{1}{P(t)} \frac{d}{dt} P(t)$           |
| Функция отказов               | $Q(t)$            | $1 - Q(t)$                                     | —                         | $\frac{d}{dt} Q(t)$       | $\frac{1}{1 - Q(t)} \times \frac{d}{dt} Q(t)$ |
| Плотность вероятностей отказа | $f(t)$            | $\int_t^{\infty} f(x) dx$                      | $\int_0^t f(x) dx$        | —                         | $\frac{f(t)}{\int_t^{\infty} f(x) dx}$        |
| Интенсивность отказов         | $\lambda(t)$      | $-\int_0^t \lambda(x) dx$                      | $-\int_0^t \lambda(x) dx$ | $-\int_0^t \lambda(x) dx$ | —                                             |

Определение показателей надежности станций как сложных динамических систем, отдельных их подсистем (управления, пунктов технического обслуживания, технологических линий по подготовке и обработке документов, горочных и других комплексов), а также таких транспортных систем, как узел, участок, линия, дает возможность решать практические задачи эксплуатационной работы с учетом реальных условий и параметров. Это, в свою очередь позволяет повысить эффективность мер по совершенствованию работы как в текущих условиях эксплуатации, так и направленных на повышение надежности и освоение перспективных объемов работы. Более объективная оценка и выбор лучших вариантов технологии и усиления пропускной и провозной способности позволяют получить наибольшую отдачу от ресурсов, обеспечить выполнение технологических процессов, плана формирования, графика движения поездов, плановых заданий и нормативов.

### 2.3. Простейшие математические модели расчета параметров надежности

Для оценки надежности работы транспортной системы должны быть исследованы ее структура, характер образования отказов, статистические закономерности распределения времени безотказной работы и времени восстановления. В зависимости от степени соответствия и сложности выбирается набор аналитических моделей.

Работу станции, узла, участка, отделения, дороги можно характеризовать последовательностью чередующихся интервалов безотказной работы и работы с отказами (см. рис. 2.4, б):  $\theta^{(1)}, t_{B1}, \theta^{(2)}, t_{B2}, \theta^{(3)}, t_{B3}, \dots$ . Интервалы безотказной работы  $\theta^{(1)}, \theta^{(2)}, \theta^{(3)}, \dots$  характерны тем, что система в течение этих отрезков времени беспрепятственно принимает транспортный поток (поезда, вагоны, грузы и т. д.). В периоды времени  $t_{B1}, t_{B2}, t_{B3}$  и т. д. система задерживает транспортный поток, т. е. работает с отказами. В теории надежности эти отрезки называют временем простоя (ожидания ремонта) и восстановления работоспособности, не разделяя в общем виде на две составляющие.

Если транспортная система задерживает поезда из-за аварии, поломки или потери работоспособности устройств пути, автоматики, телемеханики и связи, то отрезки времени  $t_{B1}, t_{B2}, t_{B3}$  и т. д. также состоят из двух составляющих — времени ожидания ремонта и времени ремонта, что в сумме и составляет время восстановления работоспособности. В том случае, когда транспортная система задерживает поезда в связи с заполнением путей, недостаточной пропускной и перерабатывающей способностью элементов или по другим организационным, информационным причинам, интервалы времени  $t_{B1}, t_{B2}, t_{B3}$  и т. д. однородны и система в это время находится в работоспособном состоянии: она продолжает работать, но с задержками поездов, т. е. с отказами. Таким образом, в течение этих отрезков времени система восстанавливает не свою работоспособность, а способность работать безотказно.

При произвольном распределении  $F(t)$  времени безотказной работы  $\theta_i$  и времени восстановления  $F_B(t)$  безотказной работы  $t_{Bi}$  показатели надежности рассчитываются по формулам, приведенным в табл. 2.3 [27].

В табл. 2.3 параметром  $\gamma$  обозначено отношение средней продолжительности восстановления безотказной работы  $T_B$  к средней продолжительности безотказной работы  $T$ . Эти функции при произвольных распределениях времени безотказной работы и восстановления безотказности будут использованы при исследовании надежности работы станций и других транспортных систем.

При экспоненциальном распределении  $F(t)$  и  $F_B(t)$  время безотказной работы распределено также по экспоненциальному закону:

$$P(t_0) = e^{-\lambda t_0}, \quad (2.42)$$

где  $\lambda$  — параметр распределения, равный  $\frac{1}{T_P}$  (интенсивность потока отказов).

Таблица 2.3

Показатели надежности при произвольном распределении времени между отказами и времени восстановления

| Показатель | Точное значение                                                                                    | Приближенное значение                                           | Погрешность                                                                   |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| $T_p$      | $\int_0^{\infty} x f(x) dx = \int_0^{\infty} x dF(x) =$<br>$= \int_0^{\infty} P(x) dx$             | —                                                               | —                                                                             |
| $T_B$      | $\int_0^{\infty} x f_B(x) dx = \int_0^{\infty} x dF_B(x) =$<br>$= \int_0^{\infty} [1 - F_B(x)] dx$ | —                                                               | —                                                                             |
| $P(t_0)$   | $1 - F(t_0)$                                                                                       | —                                                               | —                                                                             |
| $Q(t_0)$   | $F(t_0)$                                                                                           | —                                                               | —                                                                             |
| $K$        | $\frac{T_B}{T_p + T_B} = \frac{1}{1 + \gamma}$                                                     | $1 - \gamma$                                                    | $\delta_+ < \gamma^2$                                                         |
| $K$        | $\frac{T_B}{T_p - T_B} = \frac{\gamma}{1 + \gamma}$                                                | $\gamma$                                                        | $\delta_- < \gamma^2$                                                         |
| $R(t_0)$   | $K - \int_{t_0}^{\infty} [1 - F(x)] dx =$<br>$= \frac{1}{T_p - T_B} \int_{t_0}^{\infty} P(x) dx$   | Для $t_0 \ll T$<br>и $T_B \ll T$<br>$1 - \frac{t_0 + T_B}{T_p}$ | $\delta_+ < 2,5 \times$<br>$\times \left[ \frac{\max(t_0, T_B)^2}{T} \right]$ |

Функция отказов в этом случае

$$Q(t_0) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (2.43)$$

а функции  $F(t)$  и  $F_B(t)$ :

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}; \quad (2.44)$$

$$F_B(t) = 1 - e^{-\mu t}, \quad (2.45)$$

где  $\mu$  — параметр распределения,  $\mu = \frac{1}{T_B}$  (интенсивность восстановления безотказной работы).

Таблица 2.4

Формулы для расчета показателей надежности при экспоненциальном распределении  $F(t)$  и  $F_B(t)$

| Показатель | Точное значение                                                                     | Приближенное значение                                       | Условие применимости                  | Погрешность                                                  |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| $P(t_0)$   | $e^{-\lambda t_0}$                                                                  | $1 - \lambda t_0$                                           | $\gamma t_0 \ll 1$                    | $\delta_+ < \frac{1}{2} (\lambda t_0)^2$                     |
| $Q(t_0)$   | $1 - e^{-\lambda t_0}$                                                              | $\lambda t_0$                                               | $\lambda t_0 \ll 1$                   | $\delta_- < \frac{1}{2} (\lambda t_0)^2$                     |
| $T_p$      | $\frac{1}{\lambda}$                                                                 | —                                                           | —                                     | —                                                            |
| $T_B$      | $\frac{1}{\mu}$                                                                     | —                                                           | —                                     | —                                                            |
| $K$        | $\frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{T_p}{T_p + T_B} = \frac{1}{1 + \gamma}$          | $1 - \gamma$                                                | $\gamma \ll 1$                        | $\delta_+ < \gamma^2$                                        |
| $K$        | $\frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{T_B}{T_p + T_B} = \frac{\gamma}{1 + \gamma}$ | $\gamma$                                                    | $\gamma \ll 1$                        | $\delta_- < \gamma^2$                                        |
| $K(t)$     | $K + K e^{-(\lambda + \mu)t}$                                                       | $1 - \gamma (1 - e^{-\mu t})$                               | $\gamma \ll 1$                        | $\delta_+ \sim \gamma^2 \times$<br>$\times (1 - e^{-\mu t})$ |
| $K_0(t)$   | $K (1 - e^{-(\lambda + \mu)t})$                                                     | $(1 - \gamma) (1 - e^{-\mu t})$                             | $\gamma \ll 1$                        | $\delta_- \sim \gamma^2 \times$<br>$\times (1 - e^{-\mu t})$ |
| $K(t)$     | $K (1 - e^{-(\lambda + \mu)t})$                                                     | $\gamma (1 - e^{-\mu t})$                                   | $\gamma \ll 1$                        | $\delta_- \sim \gamma^2 \times$<br>$\times (1 - e^{-\mu t})$ |
| $K_0(t)$   | $K + K e^{-(\lambda + \mu)t}$                                                       | $e^{-\mu t} + \gamma \times$<br>$\times (1 - e^{-\mu t})$   | $\gamma \ll 1$                        | $\delta_+ \sim \gamma^2 \times$<br>$\times (1 - e^{-\mu t})$ |
| $R(t_0)$   | $K e^{-\lambda t_0}$                                                                | $1 - \lambda (T_B - t_0) =$<br>$= 1 - \gamma - \lambda t_0$ | $\gamma \ll 1$<br>$\lambda t_0 \ll 1$ | $\delta_+ < 2,5 \times$<br>$\times [\lambda \max(t_0, T_B)]$ |

Основные расчетные формулы параметров надежности при экспоненциальном распределении  $F(t)$  и  $F_v(t)$  сведены в табл. 2.4.

В табл. 2.4  $\gamma = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{T_v}{T}$ . Нестационарный коэффициент готовности системы приведен для двух случаев: когда в момент  $t = 0$  система находится в работоспособном состоянии  $[K(t)]$  и когда система в момент  $t = 0$  находится в состоянии отказа  $[K_0(t)]$ . Для этих же случаев даны расчетные формулы нестационарного коэффициента простоя объекта.

### ГЛАВА 3

## ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПЕРЕВОЗОК

### 3.1. Регламентация перевозочного процесса

Проблема надежности перевозочного процесса является сложной, многоплановой задачей. Рассмотрим основные принципы ее решения.

Если для отдельно взятых станций или объектов технического комплекса (путь, устройства автоматики, телемеханики и связи и др.), а также единиц подвижного состава можно сформулировать поток отказов и восстановлений и установить последовательности интервалов безотказной работы  $\theta_i$  и восстановлений  $t_{vi}$ , то для такой системы, которая реализует перевозочный процесс (отдельных грузов и перевозочный процесс в виде суммарного транспортного потока), это осуществить трудно. Надежность таких крупномасштабных технологических процессов, как перевозки, оценивают по наиболее общим параметрам или показателям.

Повышению надежности перевозочного процесса на железнодорожном транспорте уделяется большое внимание. Надежность перевозок, уверенность в безусловном выполнении сроков доставки грузов является очень важным условием, так как от своевременного прибытия грузов зависят производственная деятельность предприятий, соблюдение графиков работ в строительстве и т. д.

Надежность перевозочного процесса тесно связана с его регламентацией во времени и пространстве. Если перевозки с моментов и от пунктов зарождения корреспонденций грузов до моментов и пунктов их погашения не регламентированы технологически и плохо управляемы, то надежность перевозочного процесса снижается, растет влияние случайных факторов. Чем больше отклонение перевозок во времени от регламентирующей технологии, чем выше нерегламентированные простои и задержки, тем ниже надежность пе-

ревозочного процесса. Величины отклонений зависят от категорий поездов, интенсивности и плотности транспортного потока, обеспеченности бригадами и локомотивами, надежности технических средств и подвижного состава, периода суток и времени года. Причем все эти факторы воздействуют на итоговые показатели перевозочного процесса, и через изменения этих показателей (отклонения от некоторой нормированной величины) можно определить надежность организации движения и перевозочного процесса в целом.

В гл. 1 была приведена классификация отказов в работе транспортных систем, в том числе отказов, вызывающих задержки транспортного потока. Все отказы приводят к нерегламентированным отклонениям поездов от графика, к изменениям времени расформирования, формирования, пропуска и отправления со станций. Кроме того, возможны нерегламентированные задержки и простои вагонов на станциях от момента погрузки до включения их в организованные поезда и от момента прибытия вагона на станцию назначения до выгрузки, а также задержки грузов от момента их приема к перевозке до начала погрузки.

Нерегламентированные отклонения времени отправления поездов на станциях их формирования и на стыковых пунктах отделений и дорог снижают надежность перевозочного процесса. Они могут быть связаны с поздней выдачей локомотивов в связи с их неготовностью для следования с поездом или недостаточным их числом в данном пункте образования поездов, задержкой в связи с недостаточным числом или в ряде случаев опозданиями локомотивных бригад, поздним формированием поездов, задержками технического осмотра и апробирования автотормозов, отцепками неисправных вагонов, задержками оформления натуральных листов и поездных документов, вызванными сбоями в работе технических контор и информационно-вычислительных центров, нерегламентированным графиком ожиданием свободности перегонов и другими причинами. Задержки отправления вызывают в свою очередь позднее прибытие поездов на последующие станции и дополнительные задержки в связи с опозданиями прибытия.

На надежность перевозочного процесса прямое воздействие оказывает трудовая и технологическая дисциплина, и в свою очередь технологическая дисциплина может выполняться, если перевозочный процесс технологически обеспечен.

К основному технологическому обеспечению, регламентирующему перевозочный процесс, относятся:

сетевой и внутридорожные планы формирования поездов, их своевременная корректировка в соответствии с фактическими величинами корреспонденций грузопотоков;

график движения поездов на участках, направлениях и сети в целом;

график передаточного движения в узлах, регламентирующий и обеспечивающий развоз местного груза с сортировочной или сортировочных станций узла на внутри- и предузловые станции, сбор

На сети железных дорог СССР многие линии характеризуются высокой степенью заполнения пропускной способности. Для предупреждения отказов из-за значительной интенсивности и плотности транспортного потока на участках и направлениях организуют наряду с обычными поездами пропуск поездов увеличенной массы и длины (Московская, Целинная, Горьковская, Северо-Кавказская, Белорусская и другие дороги). Это способствует росту средней массы поезда и повышению надежности выполнения графика движения. Организация движения местных поездов в узлах и на участках (передаточных, вывозных, сборных) основана на обеспечении строгого выполнения ниток графика.



Один из основных итоговых показателей работы транспортных систем — срок доставки грузов. Невыполнение его может вызвать серьезные сбои в производственном процессе. Кроме того, чем продолжительнее срок доставки, тем большими должны быть запасы продукции на складе и вместимость самих складов на предприятиях. Мощность транспортной системы, зависящие от нее сроки доставки грузов, величина складов и запасов продукции представляют самостоятельную большую комплексную оптимизационную задачу: их параметры должны быть экономически сбалансированы.

Надежность перевозочного процесса, определяемую через срок доставки грузов, выразим статистической функцией  $F(t) = P\{T \leq T_{\text{нормы}}\}$ . При исследовании надежности через параметры работы системы происходит инверсия функции надежности и отказов. В этом случае надежность выражается как  $F(t) = P\{T \leq T_{\text{нормы}}\}$ , а «ненадежность» — как  $F(t) = P\{T > T_{\text{нормы}}\}$ , если речь идет о таких параметрах, сокращение величины которых является результатом целенаправленного управленческого воздействия и повышает надежности системы.

Вместе с тем при использовании ряда показателей инверсия функций не возникает. Таким показателем работы может быть, например, маршрутная или любая другая скорость, когда надежность выражается функцией  $F(v) = P\{v \geq v_{\text{норм}} \leq v_{\text{доп}}\}$ , а «ненадежность» —  $F(v) = P\{v < v_{\text{норм}}\}$ .

Эмпирическую функцию распределения срока доставки груза можно выразить как

$$F(T_i) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^i n(T_k), \quad (3.1)$$

где  $N$  — число статистических наблюдений;  $n(T_k)$  — частота  $k$ -го наблюдения.

Если известна плотность распределения срока доставки  $f(T)$ , то функция надежности будет выражаться как

$$P(T) = \int_0^{T_n} f(T) dT, \quad (3.2)$$

а функция отказов системы по сроку доставки —

$$Q(T) = \int_T^{\infty} f(T) dT = 1 - P(T). \quad (3.3)$$

Графики функций надежности перевозочного процесса и отказов приведены на рис. 3.2. По значениям сроков доставки, которые не превышают нормативную величину ( $T_i \leq T_n$ ), можно судить о надежности перевозочного процесса, и наоборот, по тем срокам, которые выше нормативной величины ( $T_i > T_n$ ), — о появлении в системе перевозочного процесса различного рода нерегламентированных задержек (отказов).

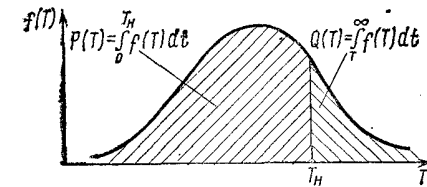


Рис. 3.2. Функции надежности и отказов перевозочного процесса

При анализе срока доставки грузов его величина может округляться до целых суток, а статистическая выборка носит дискретный характер. В этом случае функции надежности и отказов перевозочного процесса по сроку доставки определяются так:

$$P(T) = 1 - \sum_{k=(T_n)+1}^N f(\Delta T_i) = \sum_{i=1}^{K(T_n)} f(\Delta T_i); \quad (3.4)$$

$$Q(T) = \sum_{k=(T_n)+1}^N f(\Delta T_i) = 1 - \sum_{i=1}^{K(T_n)} f(\Delta T_i), \quad (3.5)$$

где  $K(T_n)$  — выборка, соответствующая нормативному значению параметра.

Рассмотрим статистическую выборку для однородного груза, направляемого из района производства в район потребления на расстояние 2800 км. Общее число наблюдений в этом случае составило 350.

|                            |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Срок доставки $T$ ,<br>сут | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| $K(T_i)$                   | 15 | 15 | 30 | 50 | 80 | 70 | 60 | 20 | 10 |

Определим по этим данным показатели надежности перевозочного процесса по сроку доставки груза на основе эмпирической функции (3.1), которую представим следующим образом:

|                              |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Срок доставки $T_i$ ,<br>сут | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    |
| $f(\Delta T_i)$              | 0,043 | 0,043 | 0,086 | 0,142 | 0,229 | 0,200 | 0,171 | 0,057 | 0,029 |
| $F(T_i)$                     | 0,043 | 0,086 | 0,172 | 0,314 | 0,543 | 0,743 | 0,914 | 0,971 | 1,00  |

Если принять нормативный срок доставки  $T_n = 13$  сут, то в соответствии с выражением (3.4) численное значение функции надежности составит:

$$P(T < 13) = 1 - \sum_{T=14}^{16} f(\Delta T_i) = 1 - (0,171 + 0,057 + 0,029) = 1 - 0,257 = 0,743;$$

$$P(T > 13) = \sum_{T=14}^{16} f(\Delta T_i) = 1 - \sum_{i=1}^{13} f(\Delta T_i) = (0,171 + 0,057 + 0,029) = 1 - 0,743 = 0,257.$$

Средний срок доставки грузов  $T = \sum_{i=1}^N f(\Delta T_i) T_i$  по данным рассматриваемого статистического ряда будет равен:

$$T = 0,043 \cdot 8 + 0,043 \cdot 9 + 0,086 \cdot 10 + 0,142 \cdot 11 + 0,229 \cdot 12 + \\ + 0,200 \cdot 13 + 0,171 \cdot 14 + 0,057 \cdot 15 + 0,029 \cdot 16 = 12,2 \text{ сут.}$$

Решение задачи определения надежности перевозочного процесса для отдельного груза связано с необходимостью исследования потерь от увеличения сроков его доставки и разложения этих потерь по составным элементам транспортных систем, участвующих в перевозках: станций, графика движения поездов, подвижного состава и других технических средств. Исследование надежности перевозочного процесса по сроку доставки на конкретных направлениях позволяет решать такие важные вопросы ускорения перевозок, как выявление потерь от отказов и сбоев по элементам перевозочного комплекса, «узких» звеньев перевозочного процесса, разработка мер по развитию пропускной способности направлений, пропускной и перерабатывающей способности станций, совершенствование графика движения поездов на участках направления, информационного обеспечения и управления процессом перевозок, технологии работы с местным грузом и графика передаточного движения в узлах, повышение эффективности маршрутизации перевозок груза или отправление его в поездах, следующих с более высокими скоростями, и др.

### 3.2. Надежность работы станций по пропуску маршрутов и выполнению плана формирования

Повышение надежности выполнения плана формирования поездов и работы станций по формированию и пропуску маршрутных и транзитных поездов является составной частью решения проблемы надежности перевозочного процесса. Нарушения технологии формирования и пропуска поездов, как правило, вызываются низкой технологической дисциплиной на отдельных станциях и увеличивают объемы работы по переработке поездов и, следовательно, приводят к дополнительным отказам в приеме поездов на тех станциях, где эта переработка выполняется.

Надежность пропуска маршрутных поездов со станций их формирования до станций назначения можно оценить через параметрическую надежность срока доставки грузов в этих поездах в соответствии с функциями (3.1)–(3.5). Если анализ надежности пропуска маршрутов производится за период времени  $T$ , то функцию надежности можно определить из выражения

$$P(T, N) = \frac{N_{\text{назн}}^M(T)}{N_{\Phi}^M(T)} = 1 - \frac{N_{\text{пер}}^M(T)}{N_{\Phi}^M(T)}, \quad (3.6)$$

а функцию «ненадежности» управления пропуском маршрутов — как

$$Q(T, N) = 1 - \frac{N_{\text{назн}}^M(T)}{N_{\Phi}^M(T)} = \frac{N_{\text{пер}}^M(T)}{N_{\Phi}^M(T)}, \quad (3.7)$$

где  $N_{\Phi}^M(T)$  — число сформированных маршрутов за время  $T$ ;  $N_{\text{назн}}^M(T)$  — то же прибывших в пункт назначения;  $N_{\text{пер}}^M(T)$  — то же переформированных в пути следования.

Дополнительная переработка вагонов при среднем их числе в составах маршрутных поездов  $m$

$$n_{\text{пер}}^M = Q(T, N) N_{\Phi}^M(T) m = N_{\text{пер}}^M(T) m. \quad (3.8)$$

Аналогично определяется надежность работы станций по выполнению плана формирования. Функция надежности по выполнению плана формирования станций (например, станции  $A$ ) за период времени работы  $T$  рассчитывается по формуле

$$P_A(T, N) = \frac{N_B(T)}{N_{\Phi}(T)} = 1 - \frac{N_H(T)}{N_{\Phi}(T)}, \quad (3.9)$$

а функция «ненадежной» работы по плану формирования

$$Q_A(T, N) = 1 - P_A(T, N) = \frac{N_H(T)}{N_{\Phi}(T)}, \quad (3.10)$$

где  $N_{\Phi}(T)$  — число сформированных поездов за время  $T$ ;  $N_B(T)$  — то же в полном соответствии с планом формирования;  $N_H(T)$  — то же с нарушением плана формирования.

Если анализ надежности работы по выполнению плана формирования проводится по станциям отделения или дороги, то в формулах (3.9) и (3.10) учитываются суммы  $\sum_{i=1}^K N_{\Phi}(T)$ ,  $\sum_{i=1}^K N_B(T)$ ,  $\sum_{i=1}^K N_H(T)$ .

Объем дополнительной работы по переформированию на последующих станциях поездов, поступивших с нарушением плана формирования,

$$n_{\text{пер}}^{\text{доп}} = \sum_{i=1}^K N_{Hi}(T) m_i, \quad (i=1, 2, 3, \dots, K), \quad (3.11)$$

где  $m$  — средний состав поезда, взятый на  $i$ -й станции.

Контроль за надежностью работы по выполнению плана формирования каждого поезда можно организовать в дорожных вычислительных центрах с помощью ЭВМ по опыту Белорусской и ряда других дорог сети.

# ГЛАВА 4 **ВЛИЯНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НА НАДЕЖНОСТЬ ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ И РАБОТУ СТАНЦИЙ**

## **4.1. Учет и анализ надежности тепловозного комплекса**

Учитывая воздействие на перевозочный процесс надежности тепловозов и системы организации их работы и обслуживания, в расчетах целесообразно использовать параметрический метод. В этом случае последствия различных по характеру отказов изучают с помощью ряда параметров, обуславливающих снижение участковой скорости движения поездов, увеличение простоев поездов на технических станциях, ухудшение использования пропускной способности линий.

Можно определить статистическую плотность распределения отказов, вызванных всем тяговым комплексом тепловозного хозяйства (тепловозы, бригады, система ремонта и профилактики):

$$\bar{f}_T(t) = \frac{n_T(t + \Delta t) - n_T(t)}{N_T(t + \Delta t) \Delta t} = \frac{\Delta n_T(t, \Delta t)}{N_T(t + \Delta t) \Delta t}, \quad (4.1)$$

где  $n_T(t + \Delta t)$  — число отказов и сбоев (задержек поездов), вызванных тепловозным комплексом на момент времени  $t + \Delta t$ ;  $n_T(t)$  — то же на момент времени  $t$ ;  $N_T(t + \Delta t)$  — число безотказно пропущенных (отправленных) поездов в течение интервала времени  $[(t + \Delta t), t]$ , т. е. в интервале  $\Delta t$ .

Функция  $\bar{f}_T(t)$  характеризует интенсивность отказов тепловозного комплекса. Воздействие их на перевозочный процесс и график движения поездов определяется через последствия отказов, выраженные в задержках поездов. В этом случае к причинам, которые вызывают задержки поездов по отправлению, относят выдачу тепловозов под поезда с опозданием, ремонт тепловоза на технической станции, опоздания локомотивных бригад.

Причины, вызывающие задержки поездов по проследованию, можно разделить по месту их происхождения на возникающие на промежуточных раздельных пунктах и перегонах. Задержки на промежуточной станции возникают в связи с несоблюдением времени хода ранее отправленного поезда и превышением в связи с этим установленной графиком нормы времени стоянки поезда на промежуточной станции, а также с ремонтом тепловоза на промежуточной станции. Аналогичный характер имеют причины задержек на перегонах. К причинам задержек по проследованию относят также порчу тепловоза с требованием резерва.

Причины, вызывающие задержки при отправлении и проследовании, действуя на один и тот же поезд, могут совмещаться.

При анализе надежности тепловозного комплекса за большой период времени (месяц, квартал, год) интенсивность отказов определяют в виде их числа, приходящегося на 1 тыс. поездов:

$$\bar{\lambda}(T) = \frac{n_T(T) \cdot 10^3}{N(T)}, \quad (4.2)$$

где  $n_T(T)$  — число задержанных поездов по тепловозному комплексу за время  $T$ ;  $N(T)$  — общее число поездов за то же время.

В расчетах также учитывают текущее значение  $\lambda(T)$ , определяемое на 1 тыс. пропущенных поездов, когда  $N(t_1) = N(t_2) = \dots = N(t_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$ . В этом случае как отдельные анализируемые периоды времени, так и число задержанных поездов по комплексу будут переменными, т. е.  $t_1 \neq t_2 \neq t_i$  и  $n_T(t_1) \neq n_T(t_2) \neq n_T(t_i)$ :

$$\lambda(t_i) = \frac{n_T(t_i)}{N(t_i)}, \quad (4.3)$$

$$N(t_i) = 10^3.$$

Нестационарный коэффициент готовности к безотказному обслуживанию поездов по комплексу на любой текущий момент  $t$

$$K_T(t) = 1 - \frac{n_T(t)}{N(t)}, \quad (4.4)$$

где  $n_T(t)$  — число задержанных в системе поездов на момент  $t$  по рассматриваемому комплексу;  $N(t)$  — общее число поездов на момент времени  $t$  на участке.

Коэффициент готовности по комплексу может характеризовать (без учета бригад) посуточные значения доли исправных локомотивов в общем парке депо, отделения или дороги (ДИЛ) за тот или иной период времени:

$$\text{ДИЛ} = \frac{M_{\text{и}}}{M}, \quad (4.5)$$

где  $M_{\text{и}}$  — число исправных локомотивов;  $M$  — общий парк локомотивов.

Параметрическую надежность эксплуатационной работы по локомотивам комплекса  $P'_T(t)$  можно определить за период  $t_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$ :

$$P'_T = \frac{\sum_1^k M_{\text{и}}(t_i)}{\sum_1^k M_{\text{и}}(t_i) + \sum_1^k M_{\text{н}}(t_i)} = 1 - \frac{\sum_1^k M_{\text{н}}(t_i)}{\sum_1^k M_{\text{и}}(t_i) + \sum_1^k M_{\text{н}}(t_i)}. \quad (4.6)$$

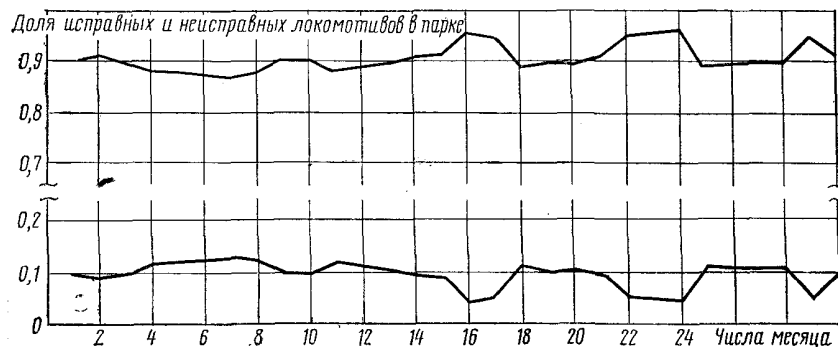


Рис. 4.1. Диаграмма посуточной готовности и неготовности выполнения эксплуатационной работы по комплексу  $T$  (вверху — процент исправных локомотивов, внизу — процент локомотивов, находящихся в ремонте)

Поскольку при любом уровне конструктивной надежности тепловозов и уровне их обслуживания и эксплуатации нормируемая часть локомотивного парка будет находиться в ремонте, то «ненадежность» по комплексу (без бригад) необходимо рассматривать как увеличение числа неисправных локомотивов по сравнению с этой нормируемой частью:

$$P_T(t) = \frac{\sum_{i=1}^k M_{\text{и}}(t_i)}{\left[ \sum_{i=1}^k M_{\text{и}}(t_i) + \sum_{i=1}^k M_{\text{н}}(t_i) \right] (1 - \alpha_{\text{нр}})}, \quad (4.7)$$

где  $\sum_{i=1}^k M_{\text{и}}(t_i)$  — число исправных локомотивов в течение  $k$  суток анализа их надежности;  $\sum_{i=1}^k M_{\text{н}}(t_i)$  — число неисправных локомотивов за тот же период;  $\alpha_{\text{нр}}$  — регламентированная доля неисправных локомотивов.

В ряде случаев фактическая надежность локомотивного парка будет выше нормированной. Тогда для входящих в формулу (4.7) параметров будет справедливым вариант

$$\left[ \sum_{i=1}^k M_{\text{и}}(t_i) + \sum_{i=1}^k M_{\text{н}}(t_i) \right] (1 - \alpha_{\text{нр}}) \geq \sum_{i=1}^k M_{\text{и}}(t_i).$$

**Пример.** Рассчитаем надежность тепловозного парка отделения в соответствии с диаграммой, приведенной на рис. 4.1. Для этого определим стационарный коэффициент готовности локомотивного парка к вождению поездов на момент времени  $t$ :

$$\kappa_T(T) = 1 - \frac{M_{\text{н}}(t)}{M(t)}, \quad (4.8)$$

где  $M_{\text{н}}(t)$  — число отказавших локомотивов по всему эксплуатируемому парку на момент времени  $t$ ;  $M(t)$  — общий рабочий парк локомотивов.

В соответствии с рис. 4.1 по состоянию на 11-е сутки при парке  $M(t) = 200$  ед. получим:

$$\kappa_T(t=11 \text{ сут}) = 1 - \frac{0,13 \cdot 200}{200} = 1 - 0,13 = 0,87.$$

Наиболее высокая готовность была по состоянию на 16-е сутки:

$$\kappa_T(t=16 \text{ сут}) = 1 - \frac{0,06 \cdot 200}{200} = 1 - 0,06 = 0,94.$$

Задача всего комплекса заключается в том, чтобы иметь высокую устойчивую оперативную готовность и устойчиво обеспечивать достаточную эксплуатационную надежность тепловозного парка. При анализе надежности интенсивность отказов определяют не только на 1 тыс. поездов, но и на 1 млн поездо-км, и 1 млн локомотиво-км пробега, а в ряде случаев и на 1 млн т · км, т. е. интенсивность отказов связывают с массой поездов, поскольку чем выше масса, тем больше не только абсолютная, но и относительная загрузка систем локомотива на единицу мощности.

Эти зависимости, как и (4.2), выражают в следующем виде: интенсивность отказов на 1 млн поездо-км пробега

$$\lambda_T(T) = \frac{n(T) \cdot 10^6}{\Sigma NL(T)}; \quad (4.9)$$

интенсивность отказов на 1 млн локомотиво-км

$$\lambda_T(T) = \frac{n(T) \cdot 10^6}{\Sigma ML(T)}; \quad (4.10)$$

интенсивность отказов на 1 млн т · км брутто

$$\lambda(T) = \frac{n(T) \cdot 10^6}{\Sigma NL(T) \bar{Q}_{\text{бр}}}, \quad (4.11)$$

где  $\Sigma NL$ ,  $\Sigma ML$  — поездо-км и локомотиво-км, выполненные локомотивным парком за период работы  $T$ ;  $\bar{Q}_{\text{бр}}$  — среднее значение массы поезда за этот период работы.

Один и тот же отказ в разных условиях может вызывать разную продолжительность задержки поездов. Если отказ по тепловозному комплексу вызвал задержку только одного поезда, то ее будем называть первичной. Однако отказы происходят в транспортном потоке и они вызывают вторичные задержки: попутных (на двухпутных линиях) или попутных и встречных (на однопутных линиях) поездов.

Обозначим поездо-часы задержек по тепловозному комплексу через  $nt_T$  или за некоторый календарный период времени как

$nt_T(T) = \sum_1^n t_{t3}$ . Тогда среднее время задержки по этому комплексу

$$\bar{t}_{3T} = \frac{nt_T(T)}{n_T(T)}, \quad (4.12)$$

или в расчете на 1 тыс. пропущенных поездов

$$\bar{t}'_{3T} = \frac{nt_T(T) \cdot 10^3}{N(T)}. \quad (4.13)$$

Для анализа надежности работы локомотивного комплекса выполняют статистические выборки о числе опозданий поездов и их продолжительностях в расчете на один отказ. В табл. 4.1 для примера приведены данные о задержках поездов, вызванных отказами в работе комплекса, включая бригады, как по отправлению, так и по проследованию. В этой таблице приведены выборки по одному из отделений по месяцам года.

Таблица 4.1

Число опозданий и их продолжительность по тепловозному комплексу

| Месяц   | Число опозданий |             |             |                                 |                   | Продолжительность, мин |                                                         |                                   |
|---------|-----------------|-------------|-------------|---------------------------------|-------------------|------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------|
|         | всего           | отправление | в том числе |                                 |                   | одной задержки         | в том числе                                             |                                   |
|         |                 |             | всего       | проследование                   |                   |                        | несоблю-<br>дение вре-<br>мени хода<br>и остано-<br>вки | порча и<br>ремонт ло-<br>комотива |
|         |                 |             |             | из них                          |                   |                        |                                                         |                                   |
|         |                 |             |             | опоздания<br>по времени<br>хода | порчи и<br>ремонт |                        |                                                         |                                   |
| Январь  | 87              | 22          | 65          | 6                               | 52                | 49,6                   | 6,6                                                     | 42,8                              |
| Февраль | 80              | 28          | 52          | 5                               | 41                | 46,4                   | 11,2                                                    | 51,9                              |
| Декабрь | 40              | 5           | 35          | 16                              | 12                | 48,2                   | 15,3                                                    | 44,9                              |
| За год  | 656             | 171         | 485         | 113                             | 334               | 43,1                   | 16,9                                                    | 62,9                              |

По данным табл. 4.1, на отделении наиболее длительные по средней продолжительности сбои в движении поездов по тепловозному комплексу происходили в декабре, январе, феврале (в зимние месяцы). Число сбоев по проследованию составляет 73,9 % всех случаев отказов. Это свидетельствует о неудовлетворительной подготовке локомотивов в рейс: средний простой в связи с их порчей и ремонтом в пути следования составил 62,9 мин, а из-за несоблюдения времени хода — 16,9 мин.

Число случаев опозданий поездов для рассматриваемого отделения за год и их общее суммарное время опозданий по месяцам года в расчете на 1 тыс. поездов приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Число опозданий по тепловозному комплексу и их продолжительность в расчете на 1 тыс. поездов

| Отказы                          | Месяцы |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | В среднем за год |
|---------------------------------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------------|
|                                 | I      | II   | III  | IV   | V    | VI   | VII  | VIII | IX   | X    | XI   | XII  |                  |
| По отправлению                  | 8,0    | 6,9  | 7,3  | 4,1  | 5,6  | 3,4  | 4,5  | 3,9  | 3,1  | 4,8  | 4,2  | 4,1  | 4,90             |
| По отправлению и проследованию  | 7,9    | 10,2 | 9,4  | 3,2  | 5,1  | 4,1  | 3,6  | 3,5  | 3,1  | 2,8  | 3,8  | 4,3  | 5,10             |
| Только по проследованию         | 19,1   | 10,6 | 10,8 | 4,1  | 5,6  | 3,4  | 4,1  | 3,8  | 4,2  | 4,9  | 8,3  | 10,4 | 7,40             |
| Общее время сбоев, ч            | 28,0   | 25,1 | 27,2 | 6,3  | 9,6  | 19,3 | 8,4  | 8,1  | 7,9  | 12,4 | 9,4  | 15,0 | 14,71            |
| Время задержек на один отказ, ч | 0,80   | 0,91 | 0,98 | 0,55 | 0,58 | 1,73 | 0,68 | 0,72 | 0,76 | 0,99 | 0,75 | 0,79 | 0,86             |

Таким образом, на данном полигоне недостаточная надежность комплекса приводила к задержке отправления (в среднем на 1 тыс. поездов) 4,9 поезда, отправления и проследования 5,1 поезда, только по проследованию 7,4 поезда, что в сумме составило 17,4 поезда, а по продолжительности — 0,86 ч на один отказ. Следует отметить, что в табл. 4.1 приведены данные по полигону сети, который характеризуется достаточно высоким уровнем организации движения поездов. На отдельных полигонах задержки по тепловозному комплексу в несколько раз (иногда в десятки раз) выше.

Для анализа влияния надежности рассматриваемого комплекса на эксплуатационную работу все случаи сбоев распределяют по укрупненным причинам. По отправлению к этим причинам относят позднюю выдачу тепловозов, ремонт тепловозов, ожидание бригад, по проследованию выделяют задержки по удалению и в связи с ремонтом тепловозов на станциях, а также по удалению и ремонту на перегонах.

Рассмотрим результаты такого анализа на примере для отдельных участков обращения тепловозов. В табл. 4.3 дано процентное распределение числа задержек поездов по тепловозному комплексу на двух участках их обращения за год.

Из задержек по проследованию большой удельный вес приходится на перегоны: на первом участке — 32,1 % и на втором — 29,3 %. Задержки по отправлению в основном сводятся к причинам, связанным с поздней выдачей тепловозов (18,6 и 20,8 %) и их ремонтом (17,4 и 21,3 %). И хотя удельный вес задержек в связи с ожиданием бригад по отношению ко всем остальным невелик, но они связаны с уровнем трудовой и технологической дисциплины в депо.

Таблица 4.3

## Распределение отказов тепловозного комплекса за год

| По отправлению(станции основного и оборотного депо) |                           |                  |                 | По проследованию |          |        |          |        | «Бросание» поездов |
|-----------------------------------------------------|---------------------------|------------------|-----------------|------------------|----------|--------|----------|--------|--------------------|
|                                                     |                           |                  |                 | Всего            | Станция  |        | Перегон  |        |                    |
| Всего                                               | Поздняя выдача тепловозов | Ремонт тепловоза | Ожидание бригад |                  | Удаление | Ремонт | Удаление | Ремонт |                    |
| 41                                                  | 18,6                      | 17,4             | 5,0             | 59               | 14,0     | 10,8   | 9,5      | 22,6   | 2,1                |
| 47                                                  | 20,8                      | 21,3             | 3,9             | 53               | 11,4     | 12,0   | 11,2     | 18,1   | 1,3                |

Поэтому укреплению технологической, производственной и трудовой дисциплины при решении проблем повышения надежности должно уделяться особое внимание.

Представляет интерес распределение числа опозданий по их длительности для каждой причины или группы причин. Анализ распределения числа опозданий по продолжительности задержек поездов на станциях и участках, вызванных отказами, которые устранялись ремонтом тепловозов непосредственно в местах возникновения неисправностей, показывает, что чем меньше длительность, опозданий, тем чаще они повторяются. Необходимо отметить также, что опоздания длительностью до 5 мин вообще не учитываются и, кроме того, часто совпадают с задержками по другим причинам.

Для эксплуатационного парка локомотивов меры по повышению надежности разрабатывают на основе статистического анализа числа и продолжительности задержки поездов по каждому элементу комплекса. Используют также корреляционные зависимости при установлении влияния массы поезда, степени загрузки локомотива, типа профиля, климатической зоны, числа секций локомотивов и других факторов на эксплуатационную надежность локомотивного парка.

## 4.2. Влияние надежности комплекса электрической тяги

Электрическая тяга — прогрессивный и перспективный вид тяги на железнодорожном и других видах транспорта. В современных условиях надежность электровозов гораздо выше, чем тепловозов: в среднем у локомотивов постоянного тока — в 3—4 раза, переменного тока — в 5—6 раз.

Интенсивность отказов у электровозов относительно невелика и значительно ниже по сравнению с тепловозами. Однако последствия отказов при электрической тяге — задержки поездов — почти сопоставимы с потерями от отказов при тепловозной тяге. Это объясняется тем, что электровозы эксплуатируются, как правило, на грузонапряженных линиях с высокой интенсивностью и плотностью транспортного потока. И один и тот же по времени отказ вызывает здесь примерно в 2—3 раза большее число задержек поездов, чем

при тепловозной тяге, за счет вторичных задержек поездов попутного следования или попутного и встречного потоков.

Допустим, что на двухпутной линии движение поездов организовано по насыщенному графику (рис. 4.2, а). В этом случае при задержке поезда на перегоне на время  $t_{вi}$  все поезда попутного направления будут задержаны на это же время. Число вторично задержанных поездов, кроме первого, на который непосредственно повлиял возникший отказ, составит:

$$n_3(t_{вi}) = \frac{t_{вi}}{I' - I''}, \quad (4.14)$$

где  $I'$  — интервал движения поездов к месту, где произошел отказ системы;  $I''$  — интервал движения поездов после восстановления движения.

Для насыщенного графика при жестком интервале и равенстве  $I' = I''$  число задержанных поездов может неограниченно возрастать. Следовательно, фактически реализуемые размеры движения должны быть меньше максимально возможных по пропускной способности при насыщенном графике. Поэтому обязательным для экс-

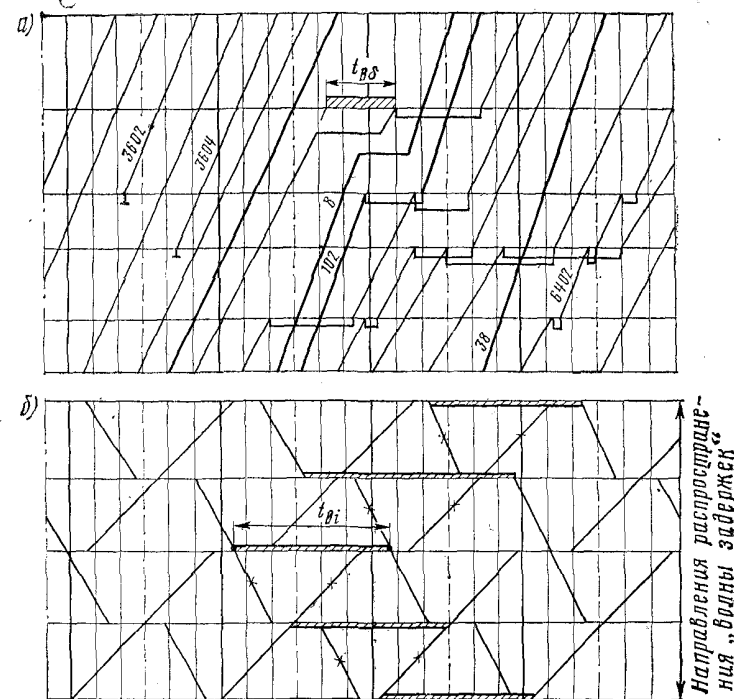


Рис. 4.2. Фрагмент графика исполненного движения:

а — насыщенный график для двухпутного участка; б — график для однопутного участка

платируемой линии должно быть правило: движение поездов после восстановления работоспособности системы должно осуществляться с интервалами  $I''$ , меньшими по величине, чем интервалы  $I'$  движения до места образования отказа, пока не восстановится безотказное (без задержек) движение до и после места образования отказа.

На однопутном участке (рис. 4.2, б) «волна задержек» от места отказа распространяется в обе стороны, т. е. в попутном и встречном направлениях движения. Число задержанных поездов в связи с отказом продолжительностью  $t_{вз}$  с учетом времени восстановления составит:

$$n'(t_{вз}) = \frac{t_{вз}}{\Delta I'}; \quad (4.15)$$

$$n''(t_{вз}) = \frac{t_{вз}}{\Delta I''}, \quad (4.16)$$

где  $\Delta I'$ ,  $\Delta I''$  — разность интервалов подвода поездов к месту отказа и вывода их после восстановления работоспособности в четном и нечетном направлениях.

Чем меньше величина  $\Delta I$ , тем больше при прочих равных условиях будет задержано поездов в связи с перерывом движения. На электрифицированных участках интенсивность потока  $r(t)$  — число поездов, пропускаемых в единицу времени, выше, следовательно, меньше по величине в большинстве случаев интервалы  $I'$  по сравнению с участками тепловозной тяги. Поэтому на участках с электрической тягой при одном и том же по продолжительности перерыве в движении задерживается больше поездов, чем с тепловозной тягой.

Методика, рассмотренная в § 4.1, полностью применима и для анализа надежности комплекса электрической тяги и определения ее влияния на эксплуатационную работу. Однако при этом необходимо еще учитывать надежность устройств тягового энергоснабжения как составную часть комплекса электрической тяги.

Устройства тягового энергоснабжения линий постоянного и переменного тока относятся к высоконадежным системам. Но они в отдельные периоды года при высоком уровне износа контактного провода и других неблагоприятных условиях могут давать отказы, вызывающие серьезные сбои в организации движения на участках и эксплуатационной работы на станциях.

Установлено, что на линиях с постоянным током повреждения арматуры, фиксаторов и сходы провода с токоприемника составляют примерно 20% отказов устройств энергоснабжения, перерывы питания 16—18%, повреждения контактного провода — свыше 15%, повреждения опор контактной сети 10—12%. На линиях с переменным током наиболее часто повторяемые отказы — повреждения изоляции (до 30%), перерывы питания (20—22%), повреждения контактного провода (13—14%) и опор (до 12%).

Перерывы питания далеко не в полной мере зависят от качества обслуживания и ремонта устройств энергоснабжения: эти отказы часто вызываются отказами в первичной энергосистеме или повреждениями электроподвижного состава, вызывающими снятие напряжения с контактной сети. Повреждения опор контактной сети вызываются, как правило, внешними причинами и только в редких случаях (на линиях постоянного тока) коррозионными повреждениями арматуры.

Интенсивность потока отказов определяют в расчете на 100 км развернутой длины контактной сети на станциях и перегонах за год и на 1 млн поездо-км при электровозной тяге. Она равна при расчете по первому фактору:

$$\lambda_{\text{э}}(T) = \frac{w(T) \cdot 10^2}{L_{\text{р}}}, \quad (4.17)$$

или

$$\lambda_{\text{э}}(T) = \frac{n_{\text{э}}(T) \cdot 10^2}{L_{\text{р}}}, \quad (4.18)$$

где  $w(T)$  — число отказов устройств энергоснабжения за период времени  $T$ ;  $L_{\text{р}}$  — развернутая длина контактной сети, км, в пределах которой определена величина  $w(T)$ ;  $n_{\text{э}}(T)$  — число задержанных поездов, вызванное отказами  $w(T)$  за период  $T$ ;

по второму фактору:

$$\lambda_{\text{э}}(T) = \frac{w(T) \cdot 10^6}{\sum NL(T)}, \quad (4.19)$$

или

$$\lambda_{\text{э}}(T) = \frac{n_{\text{э}}(T) \cdot 10^6}{\sum NL(T)}. \quad (4.20)$$

Суммарная интенсивность отказов по комплексу электрической тяги в расчете на 1 млн поездо-км пробега

$$\lambda_{\text{эт}}(T) = \frac{[n_{\text{эв}}(T) + n_{\text{э}}(T)] \cdot 10^6}{\sum NL(T)}, \quad (4.21)$$

где  $\lambda_{\text{эт}}(T)$  — число задержанных поездов в расчете на 1 млн поездо-км, выполненных электровозами;  $n_{\text{эв}}(T)$  — число задержанных поездов по отправлению, отправлению и проследованию и проследованию с учетом задержек, вызванных локомотивными бригадами.

Все отказы комплекса электрической тяги, которые происходят в процессе эксплуатации и вызывают задержки отправления или проследования поездов, ухудшают показатели перевозочного процесса: приводят к уменьшению скорости движения, замедляют оборот подвижного состава, снижают экономические показатели. На работу станций отказы комплекса электрической тяги влияют через график движения, определяя ту или иную интенсивность подвода поездов к станциям, ограничивающим участок, и условия их отправления (вывода).

### 4.3. Надежность вагонного парка

Обеспечение эксплуатационной надежности вагонов — сложная комплексная проблема. Требования к повышению их надежности определяют не только необходимость улучшения работы станций, но и ускорения перевозочного процесса на участках. В табл. 4.4 приведены данные о браке в поездной и маневровой работе из-за отказов вагонов. За 10 лет (1971—1980 гг.) их общее число сократилось на 6,3 %. Однако увеличились такие серьезные отказы, как обрывы поездов вследствие неисправности автосцепки и хребтовой балки, саморасцепы автосцепки в поездах.

Таблица 4.4

Число брака, ‰, в поездной и маневровой работе из-за отказов вагонов

| Показатели                                                            | 1971 г. | 1972 г. | 1973 г. | 1974 г. | 1975 г. | 1976 г. | 1977 г. | 1978 г. | 1979 г. | 1980 г. |
|-----------------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Всего                                                                 | 100     | 95,2    | 131,3   | 112,7   | 102,1   | 103,2   | 100,3   | 96,1    | 97,9    | 93,7    |
| Обрывы поездов вследствие неисправностей автосцепки и хребтовой балки | 3,3     | 4,2     | 2,6     | 3,4     | 3,7     | 4,0     | 4,5     | 5,1     | 4,1     | 5,1     |
| Саморасцепы автосцепки                                                | 4,3     | 4,2     | 3,1     | 3,5     | 4,1     | 4,4     | 5,8     | 4,9     | 5,2     | 5,6     |
| Заклинивание колесных пар                                             | 6,8     | 7,1     | 4,3     | 5,2     | 5,9     | 5,3     | 4,5     | 5,5     | 4,6     | 4,4     |
| Прочий брак                                                           | 85,6    | 84,5    | 90,0    | 87,9    | 86,3    | 86,3    | 85,2    | 84,5    | 86,1    | 84,9    |

Наиболее слабым звеном в вагоне является буксовый узел: на него приходится большая часть всех отказов по вагонам, возникших в пути следования. Большое число отказов в пути следования (19,5 %) дает еще тормозная система. Они происходят из-за одностороннего износа тормозных колодок, их заворотов и изломов, обрывов и изломов тормозной магистрали и подводящих трубок, утечки воздуха и других неисправностей. Однако в результате совершенствования регулирования тормозной системы и ее рычажной передачи число случаев заклинивания колесных пар за период 1971—1980 гг. сократилось на 2,4 %.

По прогнозам специалистов в области эксплуатации и технического обслуживания вагонов [24], в перспективе можно ожидать значительного повышения надежности грузовых вагонов, что ускорит организацию их обслуживания и снизит его трудоемкость.

Эксплуатационные качества вагонов характеризует частота поступления их в текущий отцепочный ремонт. Задача состоит в том, чтобы вагон после подготовки в техническом и коммерческом отношении под погрузку безотказно выполнил свою функцию, не отказал, по крайней мере, на всем протяжении груженого рейса или в течение времени оборота на груженом рейсе.

Вся система изготовления вагонов, их содержания, обслуживания, ремонта и эксплуатации должна быть высоконадежной. В настоящее время средняя наработка вагона рабочего парка до отцепочного ремонта составляет  $\bar{T}_\Phi = 87$  сут. Исходя из этой средней наработки до отцепочного ремонта, можно оценить качество всей системы поддержания работоспособности вагонов: базы для периодических (деповских и заводских) ремонтов, а также для их технического обслуживания и текущего ремонта в эксплуатации, пунктов подготовки вагонов к перевозкам (ППВ) и пунктов технического обслуживания (ПТО). Приняв условно среднее время оборота вагона рабочего парка  $\Phi = 7$  сут, можно определить число груженых рейсов (число народнохозяйственных перевозок), которое совершает вагон рабочего парка за время между отцепочными ремонтами:

$$R_B = \frac{\bar{T}_\Phi}{\Phi}.$$

Для  $T_\Phi = 87$  сут и  $\Phi = 7$  сут  $R = 12,4$ . Следовательно, в среднем на сети вагон рабочего парка выполняет свои функции по схеме «12 перевозок — отцепочный ремонт, 12 перевозок — отцепочный ремонт и т.д.». Функция отказов вагонного парка в этом случае будет определяться выражением

$$Q_B(t) = \frac{1}{R_B} = \frac{\Phi}{\bar{T}_\Phi}, \quad (4.22)$$

а функция надежности

$$P_B(t) = 1 - \frac{1}{R_B} = 1 - \frac{\Phi}{\bar{T}_\Phi}. \quad (4.23)$$

Для принятой величины оборота вагона надежность вагонного парка (надежность всей системы ее обеспечения) составляет  $1 - (7 : 12,4) = 1 - 0,08 = 0,92$ . Очевидно, с учетом современного состояния вагонного парка необходимо повышать надежность обеспечения перевозочного процесса, так как срок службы вагона между отцепочными ремонтами (около 87 сут) нельзя считать удовлетворительным.

Время оборота вагона  $\Phi_i$  является переменной величиной и может характеризоваться функцией распределения  $\Phi(t) = P(\Phi < t)$  с плотностью  $\phi(t)$ . Тогда надежность перевозочного процесса по вагонам (по всей системе ее обеспечения)

$$P_B = \int_0^\infty P_B(t) d\Phi = \int_0^\infty P_B(t) \phi(t) dt, \quad (4.24)$$

где  $P_B(t)$  — надежность вагонного парка.

Основные функции теории надежности применительно к анализу надежности вагонного парка имеют классическое применение.

Вероятность безотказной работы вагонного парка в течение заданного времени работы  $t_0$  (месяц, квартал, год), начиная с момента к — 1-го восстановления, может быть определена статистически:

$$\bar{P}_{KB}(t) = \frac{N_{KB}(t_0)}{N_{KB}(t=0)} = 1 - \frac{n_{KB}(t_0)}{N_{KB}(t=0)}, \quad (4.25)$$

где  $\bar{P}_{KB}(t)$  — отношение числа вагонов, у которых время работы от момента окончания к — 1-го восстановления до момента наступления к-го отказа больше заданного времени работы  $t$ , к общему числу вагонов;  $N_{KB}(t=0)$  — число исправных вагонов в момент  $t=0$ ;  $N_{KB}(t_0)$  — число вагонов, не отказавших к моменту  $t=t_0$ ;  $n_{KB}(t_0)$  — число вагонов, отказавших хотя бы 1 раз к моменту  $t=t_0$ .

Для вагонного парка при любых распределениях времени безотказной работы  $\theta_i$  и восстановления  $t_b$  (например, времени нахождения вагона в отцепочном ремонте) среднее время между ремонтами  $\bar{T}_b$  и среднее время восстановления  $\bar{t}_b$  имеют конечное значение. В этих условиях коэффициент оперативной готовности или стационарную вероятность безотказной работы вагонного парка в течение заданного времени работы  $t_0$  можно определить из выражения

$$R_b(t_0) = \frac{1}{T_b + \bar{t}_b} \int_{t_0}^{\infty} P_{\infty}(t) dt, \quad (4.26)$$

или статистическим путем

$$\bar{R}_b(t_0) = \frac{N(t, t+t_0)}{N(t)}, \quad (4.27)$$

где  $N(t, t+t_0)$  — число исправных вагонов, начиная с некоторого момента  $t$  до момента  $t+t_0$ ;  $N(t)$  — общее число вагонов на момент времени  $t$ .

Расчет надежности вагонного парка, учитывая громоздкость и объем этой системы, сложность и многообразие отказов и системы восстановления работоспособности, является весьма трудоемким. В результате проведенных во Всесоюзном научно-исследовательском институте железнодорожного транспорта исследований [24] установлены численные значения вероятностей восстановления работоспособности вагонов после всех видов ремонта и технического обслуживания. В этом случае время окончания ремонта или технического обслуживания принималось за  $t=0$ . Так, вероятность безотказной работы в соответствии с выражением (4.25) для полувагонов составила после капитального (заводского) ремонта 0,8, после депоовского — 0,71, после текущего отцепочного ремонта — 0,453. Восстановленный при всех видах ремонта технический ресурс полувагонов рабочего парка составил 0,673. Таким образом, между заводскими ремонтами 20 % полувагонов давали отказы, после которых их необходимо было вновь направлять в заводской ремонт, после депоовского ремонта отказы давали 29 % полувагонов и после текущего ремонта — 54,7 % полувагонов.

Интенсивность потока отказов для вагонов рабочего парка

$$\lambda_b(t) = \frac{n_b(t+\Delta t) - n_b(t)}{N_T(t) \Delta t}, \quad (4.28)$$

где  $n_b(t+\Delta t)$  — число отказов вагонов, которые произошли за время  $[t, t+\Delta t]$ ;  $n_b(t)$  — число отказов на момент времени  $t$ ;  $N_T(t)$  — число исправных вагонов в момент времени  $t$ .

Интенсивность отказов (параметр потока отказов) в течение заранее принятого времени  $\Delta t=T$  (год, квартал, месяц) рассчитывают по формуле

$$\omega(T) = \frac{[n_b(t+\Delta t) - n_b(t)] \cdot 10^3}{N_b(t)} = \frac{\Delta n_b(T)}{N_b(t)}, \quad (4.29)$$

где  $\Delta n_b(T)$  — число отказов вагонов за время  $T$ ;  $N_b(t)$  — парк вагонов, отказы которых анализировались, или число исправных вагонов на момент времени  $t$ , являющееся начальным для отрезка времени  $T$ .

Этот параметр в ряде случаев определяют на 1 тыс. вагонов рабочего парка, т. е.:

$$\omega'[T] = \frac{\Delta n_b(T) \cdot 10^3}{N_b(t)}. \quad (4.30)$$

В настоящее время для повышения надежности вагонного парка разработана и проводится система мер по обеспечению сохранности вагонов в эксплуатации, улучшению качества всех видов ремонта, подготовки вагонов к перевозкам в районах погрузки и выгрузки путем создания крупных механизированных ППВ и усиления существующих пунктов, совершенствования методов и средств технического обслуживания вагонов на ПТО.

Например, из общего числа около 40 операций по ремонту вагонов в поездах на ПТО более 72 % затрат труда приходится на выполнение восьми операций: замену подшипников скольжения, доливку масла в буксы, замену тормозных колодок, воздухораспределителей, соединение тормозных рукавов, регулировку рычажных передач, а также устранение утечек воздуха из тормозной магистрали и замену соединительных рукавов и концевых кранов. Из перечисленных операций в настоящее время частично механизирована замена подшипников, которая выполняется с помощью самоходных ремонтных машин. Имеются технические решения и опыт доливки масла в буксы с помощью этих машин или при надвиге состава на сортировочную горку [24]. Ведутся работы по созданию аппаратуры для выявления дефектов колес (ползунов, неровностей, проката). Изготовлен опытный образец аппаратуры для измерения проката колес. Создается также вспомогательное оборудование для средств технической диагностики, в том числе различители типа букс (роликовые или скольжения), устройства-краскоотметчики для разметки неисправных вагонов на ходу поезда, для автоматического считывания осей вагонов.

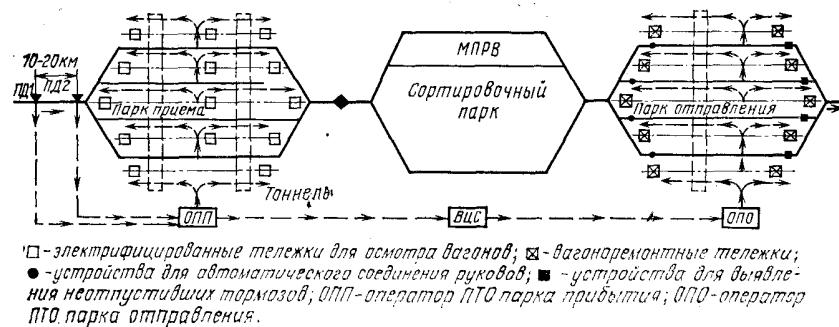


Рис. 4.3. Размещение основных технических средств ПТО сортировочной станции

К перспективным диагностическим средствам можно отнести и устройства для выявления в движущихся поездах перегревшихся букс с подшипниками обоих типов, неисправностей роликовых подшипников, дефектов колес по кругу катания, износа гребней и проката колес, износа тонкомерных тормозных колодок, выхода деталей за габарит подвижного состава.

Разработан и изготовлен опытный образец устройства для проверки равномерного проката колес. Действие его основано на вихретоковом методе. Эту аппаратуру предлагается устанавливать непосредственно на входе в парк приема крупных узловых сортировочных станций. Такой же принцип используется в аппаратуре для выявления износа гребней колес. Начаты работы по использованию акустического метода для выявления дефектов роликовых осевых подшипников. Разрабатывается устройство для выявления колодок с предельным износом. На ряде ПТО Свердловской дороги внедрена автоматическая система опробования тормозов (АСОТ), позволяющая проверять действие тормозов и плотность воздушной магистрали по программе в автоматическом режиме.

Требуется существенно усилить техническое оснащение ПТО крупных сортировочных станций. Это даст возможность удлинить гарантийные участки безостановочного проследования поездов. На рис. 4.3 показана схема размещения в парках приема и отправления сортировочной станции тележек для осмотра и ремонта вагонов, а также устройств для автоматического соединения рукавов, тоннелей для перехода через пути и другого оборудования. Для механизации труда работников ПТО предусмотрены два поста диагностики вагонов (ПД) в движущихся поездах. Первый пост размещается на расстоянии 10—12 км от узловой сортировочной станции. На нем выявляются дефекты, которые могут быть обнаружены при относительно высокой скорости движения поезда (ползуны, «навар» на колесах), и дефекты, для обнаружения которых поезд должен пройти без остановок сравнительно большое расстояние (неисправ-

ности буксовых узлов). Поэтому здесь размещают аппаратуру теплового контроля букс, выявления неисправностей колес по кругу катания, а также различители типа букс, краскоотметчики неисправных вагонов, устройства для немедленной остановки поезда в случае высокого нагрева букс.

Второй пост диагностики размещают в горловине парка приема. На нем предусматривают устройства для выявления проката, износа гребней колес и проверки роликовых подшипников, а также счетчик осей вагонов и краскоотметчики неисправных вагонов. Здесь же проводят визуальный или телевизионный контроль неисправностей элементов кузова, выхода частей вагона за пределы габарита подвижного состава и др. с использованием специального пульта передачи информации оператору ПТО с автоматическим счетом осей.

Информация с постов диагностики передается по каналам технологической связи оператору ПТО в парке приема (ОПП). Оператор сообщает показания диагностической аппаратуры по громкоговорящей станционной связи осмотрщикам парка приема для проверки обнаруженных аппаратурой неисправностей узлов и решения вопроса об отцепке вагонов. Тормозная магистраль состава подключается к стационарному устройству для централизованной разрядки тормозов. Осмотрщики передают данные оператору с помощью портативных радиостанций. При наличии АСУ ПТО оператор-информатор по телетайпу передает данные о неисправностях вагонов в вычислительный центр станции.

Центр автоматической системы опробования тормозов и выявления неотпущенных тормозов размещается в головной части парка в помещении ПТО парка отправления. При АСУ ПТО наряд на ремонт вагонов передается оператору ПТО по телетайпу.

В соответствии с выполненными исследованиями [31] аппаратуру теплового контроля букс (типа ПОНАБ) рекомендуется устанавливать на подходах к сортировочным станциям и настраивать ее на низкую температуру (примерно 70 °С при температуре воздуха 0 °С). В результате, как показывает опыт, примерно на 15 % увеличивается объем работы по осмотру подшипников на ПТО сортировочной станции, но сокращается на 30 % число остановок поездов по показаниям аппаратуры ПОНАБ на расположенных за ней гарантийных участках.

Ввиду того что прибывающие поезда часто останавливаются на подходе к узлу и перегревшиеся буксы остывают, целесообразно удалять ПОНАБ на расстояние 10—20 км.

Виброметрическую аппаратуру для контроля геометрических неровностей колес в поездах (КРАП), предназначенную для выявления ползунов, «наваров», выщербин и неравномерного проката, рекомендуется устанавливать перед сортировочными станциями для использования в качестве диагностической. Ее целесообразно размещать там же, где и приборы ПОНАБ, так как дефекты колес выявляются при скорости движения более 25 км/ч.

На основе выполненных исследований Главным управлением вагонного хозяйства МПС рекомендована следующая схема размещения ПОНАБ (в порядке очередности установки):

перед пунктами контрольно-технического осмотра (ПКТО), на которых отменен сплошной осмотр брукс с остановкой поезда по графику;

перед промежуточными станциями в начале участков безостановочного следования поездов, на расстоянии 40—60 км от пунктов технического обслуживания (ПТО), осуществляющих подготовку составов в рейс, и за 60—80 км до ПТО, находящихся на границах удлинённых участков;

перед промежуточными станциями между ранее организованными постами контроля, причём число их в этом случае зависит от длины «незащищённых» участков и устанавливается в зависимости от величины гарантированного пробега вагонов в пределах 40—60 км;

перед пунктами технического обслуживания сортировочных и участковых станций, ограничивающих участки безостановочного следования поездов.

При установке аппаратуры перед промежуточными станциями основная задача контроля — обеспечение безопасности движения поездов. Размещение ПОНАБ перед ПТО и ПКТО позволяет сократить число случаев задержек поездов и отцепок вагонов по причине брукс на промежуточных станциях, ускорить выявление неисправностей брукс на технических станциях, имеющих достаточное путевое развитие, сократить штат квалифицированных осматривающих вагонов и слесарей по ремонту бруксовых узлов, средства механизации работ и транспортировочные устройства.

Интервалы  $\theta_i$  между поездами, в которых аппаратура ПОНАБ выявила отказы по бруксовому узлу, представляют собой отрезки времени наработки на отказ (рис. 4.4). Это время часто аппроксимируют экспоненциальным распределением. Если обозначить интенсивность потока поездов, в которых аппаратура ПОНАБ выявляет отказы по бруксам, через  $\lambda(T)$ , то функция надёжности потока поездов по бруксовому узлу

$$P_0(t) = e^{-\lambda T}, \quad (4.31)$$

а функция отказов

$$Q_0(t) = 1 - e^{-\lambda T}. \quad (4.32)$$

Приближённое значение функции надёжности выражается как  $1 - \lambda T$  (см. табл. 2.4), а функции отказов —  $\lambda T$ . Так, если за 6 мес на участке протяжённостью 270 км общее число поездов, у которых перегонное оборудование аппаратуры ПОНАБ, установленное перед ПКТО и напольной аппаратурой промежуточных постов технического надзора (ППТН), выявило неисправности брукс, равно 2700, то средняя интенсивность задержек поездов по бруксам составит  $2700 : (182 \cdot 24) = 0,42$  задержаний за 1 ч. Надёжность пото-

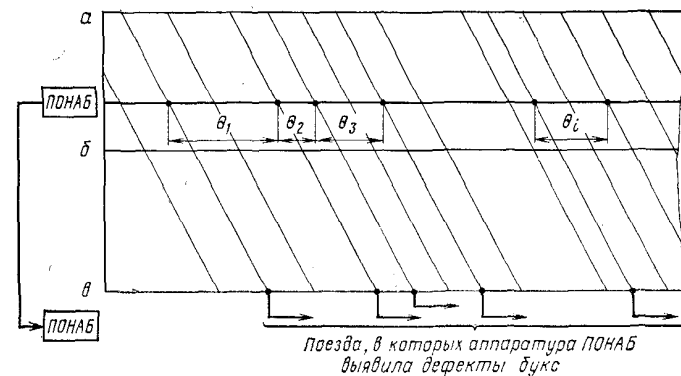


Рис. 4.4. Интервалы между поездами, в которых аппаратура ПОНАБ выявила отказы по бруксовому узлу

ка поездов по бруксовому узлу на подходе к технической станции за 1 ч будет равна  $1 - 0,42 \cdot 1 = 0,58$ ; за период 2 ч —  $1 - 0,42 \cdot 2 = 0,16$ , а за 2,5 ч —  $1 - 0,42 \cdot 2,5 = 0$ . Таким образом, в течение 2,5 ч в среднем хотя бы один поезд будет задержан на участковой или сортировочной станции по отказам бруксового узла, выявленным ПОНАБ.

Для участка протяжённостью  $L$ , на котором в течение некоторого времени  $t$  пропущено  $N$  поездов, среднюю наработку между отказами по бруксовому узлу можно определить и через ходовую скорость:

$$T(\bar{V}_x, L) = \frac{NL}{\bar{V} \Sigma n_0}, \quad (4.33)$$

а среднюю интенсивность потока отказов как

$$\bar{\lambda}(T) = \frac{t}{T(\bar{V}_x, L)}. \quad (4.34)$$

Функция надёжности потока поездов по бруксовому узлу будет определяться выражением

$$P(t) = \exp\left(-\frac{t}{T(\bar{V}_x, L)}\right). \quad (4.35)$$

Необходимо отметить, что функция надёжности потока поездов по показаниям аппаратуры ПОНАБ показывает потенциальную возможность невыполнения графика. В одном поезде может быть несколько перегретых брукс, и чем их больше, тем выше вероятность того, что поезд на участковой или сортировочной станции будет задержан свыше технологической нормы для устранения отказов по бруксам. Частота наличия одной перегретой бруксы в поезде, остановленном по показаниям ПОНАБ, составляет примерно 0,7, двух 0,2. Наличие в одном поезде четырех и более перегретых брукс — редко повторяемые (маловероятные) события.

Степень выявляемости перегретых букс аппаратурой ПОНАБ рассчитывается по формуле

$$\eta_6 = \frac{\sum N_{\Phi} - \sum N_{\text{пр}}}{\sum N_{\Phi}} 100 = (1 - P_{\text{пр}}) \cdot 100, \quad (4.36)$$

где  $\sum N_{\Phi}$  — общее число фактически выявленных аппаратурой ПОНАБ перегретых букс за период работы  $t$ ;  $\sum N_{\text{пр}}$  — число не выявленных аппаратурой перегретых букс;  $P_{\text{пр}}$  — частота пропуска перегретых букс при выбранном уровне настройки аппаратуры на температуру нагрева шейки оси, при которой букса считается неисправной ( $100^{\circ}\text{C}$ ).

Определяют также достоверность работы аппаратуры ПОНАБ  $\beta_6$  и частоту ее необоснованных показаний  $\alpha$  при анализе за период  $t$  достаточной продолжительности:

$$\beta_6 = \frac{\sum N_{\text{п}}}{\sum N_{\text{понаб}}} 100\%; \quad (4.37)$$

$$\alpha = \frac{\sum N_{\text{ош}}}{\sum N} 100\%, \quad (4.38)$$

где  $\sum N_{\text{п}}$  — общее число выявленных перегретых букс за период  $t$ ;  $\sum N_{\text{понаб}}$  — число букс, выявленных аппаратурой ПОНАБ;  $\sum N_{\text{ош}}$  — число необоснованных показаний аппаратуры;  $\sum N$  — общее число поездов, проверенных с помощью аппаратуры за период  $t$ .

Показатели  $\eta_6$ ,  $\beta$  и  $\alpha$  неодинаковы по величине, они составляют примерно 70, 90 и 1 %. Выявляемость перегретых букс аппаратурой ПОНАБ пока еще недостаточна. Совершенствование этой аппаратуры, улучшение ее эксплуатации и настройки позволят повысить достоверность работы.

#### 4.4. Влияние надежности устройств пути

На железных дорогах широко проводятся меры по усилению реконструкции пути. Укладываются рельсы тяжелых типов, увеличивается протяженность пути на щебеночном основании, железобетонных шпалах, увеличиваются поставки транспорту средств механизации трудоемких путевых работ. Повышение надежности и долговечности устройств пути и путевого комплекса в целом имеет особенно актуальное значение: ремонтно-профилактические работы путевого комплекса требуют значительных резервов пропускной способности линий и станций, а отказы путевого комплекса вызывают сбои в эксплуатационной работе, снижают скорость движения поездов.

Вот почему к устройствам пути, качеству изготовления его элементов, профилактике и ремонту предъявляются повышенные требования. Для ремонтных работ создан и широко используется комплекс высокопроизводительных машин. Осуществляется переход на машинный способ текущего содержания пути в «окна» для профилактического осмотра и ремонта.

Машинизированное текущее содержание пути требует строгого соблюдения периодичности между выправками пути и выполнения в полном объеме сопутствующих им работ: пополнения балласта в шпальных ящиках (в технологическую цепочку включается хоппер-дозатор), планировки балластной призмы, закрепления узлов скреплений, поправки противоугонов.

Содержание пути с использованием технологически взаимосвязанной системы машин потребовало четкого разделения работ по целям и задачам (работы неотложные и планово-предупредительные), а весь комплекс капитального, среднего и текущего ремонта для обеспечения высокой эксплуатационной надежности выполнять по научно обоснованной системе.

Для путевого комплекса можно определить вероятность безотказной работы в течение заданного времени  $t_0$ , начиная с произвольного достаточно удаленного момента  $t$  после окончания очередного планово-предупредительного ремонта. Коэффициент оперативной готовности по комплексу пути определяется из выражений:

$$\left. \begin{aligned} R_{\text{п}}(t_0) &= \frac{1}{T_{\text{р}} + T_{\text{в}}} \int_{t_0}^{\infty} P_{\infty}(t) dt; \\ P_{\infty}(t) &= \lim_{k \rightarrow \infty} P_k(t) = 1 - F_{\infty}(t), \end{aligned} \right\} \quad (4.39)$$

где  $F_{\infty}(t)$  — функция распределения времени работы путевого комплекса от  $k$  — 1-го восстановления до  $k$ -го отказа.

Если это распределение установлено, то может быть определено и среднее время между отказами за некоторый период достаточно большой продолжительности как  $T_{\text{р}} = M\{\theta_i\}$ , в течение которого должна быть получена представительная выборка отрезков времени между отказами. Одновременно рассчитывают среднее время простоя и восстановления комплекса. Тогда коэффициент оперативной готовности комплекса

$$R_{\text{п}}(t_0) = \frac{T_{\text{р}}}{T_{\text{р}} + T_{\text{в}}}. \quad (4.40)$$

При оценке влияния надежности пути на эксплуатационную работу в качестве первичной минимальной по протяженности единицы измерения комплекса пути необходимо принимать железнодорожный участок — расстояние между двумя соседними техническими станциями (участковыми или сортировочными).

Для участка или полигона сети (отделения, дороги) можно определить интенсивность отказов комплекса в расчете на 1 тыс. пропущенных поездов:

$$\lambda_{\text{п}}(T) = \frac{n_{\text{п}}(T) \cdot 10^3}{N(T)}, \quad (4.41)$$

где  $n_{\text{п}}(T)$  — число поездов, имеющих задержки в связи с отказами по комплексу пути;  $N(T)$  — общее число пропущенных поездов за рассматриваемый период.

Может также потребоваться расчет нестационарного коэффициента готовности комплекса к безотказному пропуску поездов на участке или станции:

$$K_{\Pi}(t) = 1 - \frac{n_{\Pi}(t)}{N(t)}, \quad (4.42)$$

где  $n_{\Pi}(t)$  — число задержанных поездов на участке или станции по комплексу на момент времени  $t$ ;  $N(t)$  — общее число поездов на участке или станции.

Существенное влияние на организацию эксплуатационной работы на станциях, участках и направлениях имеет параметрическая надежность путевого комплекса, которая определяется по степени снижения скорости движения поездов. Этот показатель в конечном итоге определяет уровень и качество работ по обеспечению беспрепятственного пропуска поездов и определяется на основе анализа отказов (предупреждений о снижении скорости). Предупреждения о снижении скорости — наиболее часто повторяемый вид отказов устройств пути.

Каждое предупреждение характеризуется тремя физическими параметрами: протяженностью участка пути  $l_i$ , на котором должна быть снижена скорость движения, продолжительностью предупреждения  $t_i$  и величиной скорости  $V_{in}$ , которая предусмотрена предупреждением, исходя из обеспечения безопасности движения, причем эта скорость всегда меньше установленной графиком движения поездов.

Снижение скорости  $\Delta V_{in}$ , расстояние действия предупреждений и их продолжительность учитывают с помощью обобщенного показателя, определяемого по формуле

$$\Pi = \sum_{i=1}^m \frac{t_i l_i}{\Delta V_{in}}.$$

Например, для одной дистанции за год показатель составил 1600 ч<sup>2</sup>, для другой — 560, для третьей — 495 ч<sup>2</sup> и т. д. Это дает возможность сопоставить уровень работ по содержанию и ремонту пути и по обеспечению пропуска поездов с наименьшим снижением скорости. Однако с его помощью трудно оценить уровень параметрической надежности путевого комплекса на участках. Для этого необходимо знать вероятность того, что в момент времени  $t$  железнодорожный путь окажется в работоспособном состоянии (обеспечит пропуск поездов с установленной графиком движения скоростью). Нестационарный коэффициент готовности железнодорожного пути (по предупреждениям) для пропуска поездов с установленной скоростью целесообразно рассчитывать по формуле

$$K_{\Pi}(t) = \frac{LV_{\Gamma P} - \sum_{i=1}^m l_i V_{in}}{LV_{\Gamma P}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m l_i V_{in}}{LV_{\Gamma P}}; \quad (4.43)$$

$i = 1, 2, \dots, m,$

где  $L$  — длина железнодорожного участка, км;  $\bar{V}_{\Gamma P}$  — средняя установленная ходовая скорость на участке, км/ч;  $V_{in}$  — скорость по предупреждению на  $i$ -м отрезке пути протяженностью  $l_i$ , км;  $m$  — число действующих на момент времени  $t$  предупреждений.

Например, если на участке протяженностью 60 км действуют пять предупреждений об ограничении скорости до 40 км/ч на отрезках пути по 1,5 км, то при ходовой скорости по графику 70 км/ч нестационарный коэффициент готовности пути (по предупреждению)

$$K_{\Pi}(t) = \frac{60 \cdot 70 - 5 \cdot 1,5 \cdot 40}{60 \cdot 70} = 0,93.$$

Параметрическую надежность пути по скорости за период значительной продолжительности следует рассчитывать с учетом длительности предупреждений:

$$\bar{K}_{\Pi}(t, V, l) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m l_i V_{in} t_i}{L \bar{V}_{\Gamma P} T}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (4.44)$$

где  $T$  — период, в течение которого производится анализ параметрической надежности комплекса;  $t_i$  — длительность  $i$ -го предупреждения;  $m$  — число предупреждений на участке в течение периода  $T$ .

Основным элементом верхнего строения пути, определяющим наличие отказов, особенно при несоблюдении межремонтных норм, являются рельсы. На дорогах СССР эксплуатируются рельсы Р50, Р65 и Р75, эксплуатационная надежность и износостойкость которых зависят от качества металла и условий эксплуатации, т. е. осевых нагрузок подвижного состава, скорости движения, нормы массы поездов.

Обобщающим показателем для изучения эксплуатационной надежности принимается грузонапряженность железнодорожных линий. Отказы, связанные с ограничением скорости движения поездов, вызываются состоянием нижнего и верхнего строения пути, его элементов. Наиболее часто происходят одиночный выход рельсов по дефектам и ухудшение состояния эксплуатируемых рельсов, когда снижается скорость движения поездов.

При анализе выхода рельсов по дефектам выбирают участки сети с диапазоном изменения числа перевезенных за год тонн грузов (тоннажа) 50 млн. т brutto на 1 км сети. Удельный выход рельсов (на 1 км пути) определяют для  $i$ -й градации следующим образом

$$y_i = \frac{n_i}{l_i}, \quad (4.45)$$

где  $n_i$  — число изъятых рельсов для  $i$ -й градации пропущенного тоннажа;  $l_i$  — развернутая протяженность пути, который пропустил тоннаж  $i$ -й градации.

Механизация ремонтно-путевых работ, в том числе текущего содержания пути, соблюдение сроков планово-предупредительных

ремонт с заменой основных элементов верхнего строения пути повышают эксплуатационную надежность путевого комплекса, снижают влияние его отказов на пропускную способность и работу станций и направлений.

#### 4.5. Влияние надежности комплекса устройств АТС

Работоспособность комплекса устройств автоматики, телемеханики и связи (АТС) оказывает прямое воздействие на регулирование движения поездов, управление процессами перевозок, использование пропускной способности линий, выполнение показателей эксплуатационной работы. Системы автоблокировки (АБ) и диспетчерской централизации (ДЦ) на участках и электрической централизации стрелок (ЭЦ), горочной автоматической централизации (ГАЦ), автоматического регулирования скорости (АРС) и другие автоматизированные системы на станциях являются широко распространенными средствами управления и регулирования движения поездов и технологии станций. Поэтому проблема их надежности является особенно актуальной, так как они работают в реальном масштабе времени и оказывают заметное влияние на пропускную способность линий, перерабатывающую способность станций. Значительные по продолжительности отказы устройств АТС могут вызывать сбои в продвижении поездов и работе станций. Важным звеном в комплексе АТС является обслуживающий персонал, «надежность» которого также заметно воздействует на работоспособность и безотказность всей системы.

В последние годы разрабатываются системы АТС, построенные на новых принципах и элементной базе, совершенствуются рельсовые цепи с более широким использованием электроники. Новые системы интервального регулирования на линиях и управления на станциях отвечают повышенным требованиям по обеспечению безопасности движения поездов на железных дорогах в условиях высокой интенсивности перевозочного процесса.

При оценке надежности систем комплекса АТС выделяют основное устройство или комплекс устройств (объектов), по которым определяют параметры потока отказов. В табл. 4.5 перечислены эти основные объекты [44].

Анализ систем автоматики и телемеханики показывает, что они состоят в основном из аналогичных объектов. Для определения показателей надежности выбирают те из них, которые характерны для различных систем: рельсовая цепь, стрелочный перевод, сигнальная точка, пульты и приборы аппаратуры управления и контроля, электрические цепи линий связи, источники питания. На основе статистических данных за определенный период времени (час, месяц, квартал, год) можно определить количественные оценки параметров надежности объектов.

По комплексу АТС происходят следующие отказы:

электрическая централизация — невозможность задания маршру-

Таблица 4.5

Основные объекты систем АТС

| Система                                  | Объект                                                                                                                      | Условный измеритель системы     |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Диспетчерская централизация              | Кодовая аппаратура<br>Каналообразующая аппаратура<br>Линия связи<br>Источник питания                                        | Управляемый объект; пункт связи |
| Автоблокировка                           | Сигнальные устройства<br>Аппаратура рельсовой линии<br>Рельсовая линия<br>Линия связи<br>Источник питания                   | Сигнальная точка                |
| Схема изменения направления движения     | Сигнальные устройства<br>Аппаратура управления<br>Линия связи<br>Источник питания                                           | Сигнальная точка                |
| Электрическая централизация              | Стрелочные устройства<br>Сигнальные устройства<br>Рельсовая линия<br>Источник питания<br>Аппаратура управления              | Стрелочный перевод              |
| Полуавтоматическая блокировка            | Аппаратура управления<br>Линия связи<br>Источник питания                                                                    | Станция                         |
| Маршрутно-контрольные устройства         | Стрелочные устройства<br>Аппаратура управления                                                                              | Стрелочный перевод              |
| Пересздная сигнализация                  | Устройства ограждения<br>Сигнальные устройства<br>Источник питания                                                          | Переезд                         |
| Автоматическая локомотивная сигнализация | Дешифратор<br>Усилительная аппаратура<br>Источник питания                                                                   | Дешифратор                      |
| Станционное кодовое управление           | Каналообразующая аппаратура<br>Кодовая аппаратура<br>Источник питания                                                       | Станция                         |
| Горочная централизация                   | Стрелочные устройства<br>Рельсовая линия<br>Сигнальные устройства<br>Замедлитель<br>Постовые устройства<br>Источник питания | Стрелочный перевод              |

рута и открытия сигнала, неразделка маршрута, перекрытие сигнала, потеря контроля или ложный контроль на пульте и др.;

горочные устройства — невозможность торможения замедлителем, невозможность установки маршрута и перевода стрелки, ложная занятость секции, невозможность автоматического респуска составов и др.;

автоблокировка — более разрешающее показание сигнала (вместо красного — желтый или зеленый, вместо желтого — зеленый и др.), горение сигнала красным огнем, неразворот сигнальной точки при смене направления, невозможность смены направления при нормальном и аварийном режимах, погасание огня в проходном сигнале, перекрытие сигнала, самопроизвольный разворот сигнальной точки от грозы;

автоматическая локомотивная сигнализация — несоответствие сигнальных показаний, несвоевременное срабатывание электропневматического клапана, пропадание белого огня при следовании по не кодируемому участку, сбой сигнальных показаний;

диспетчерская централизация — ложное показание на пульте-табло, невозможность передачи на местное управление, неправильное прохождение управляющего и известительного сигналов, невозможность установки маршрута, открытия сигнала, подачи акустического сигнала;

диспетчерский контроль — ложные показания на табло.

Неравномерно распределены отказы элементов комплекса АТС по дням недели и часам суток [44], что необходимо учитывать при управлении эксплуатационной работой. Максимальное число отказов приходится на четверг, заметно оно возрастает в рабочее время суток. На неравномерность распределения отказов по дням недели и периодам суток влияют многие факторы, связанные, главным образом, с обслуживанием систем АТС, режимом работы персонала, распределением объема работ и т. д. Отказы комплекса происходят и по вине других служб.

Средняя наработка на отказ определяется средней продолжительностью работы между отказами:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n \theta_i}{n}, \quad (4.46)$$

где  $\sum_{i=1}^n \theta_i$  — общее время работы за календарный период;  $\theta_i$  — продолжительность периода исправной работы между  $i$  — 1-м и  $i$ -м отказами;  $n$  — число отказов за рассматриваемый календарный период.

Коэффициент готовности за период работы  $T_p$  для систем комплекса АТС можно рассчитать с помощью формулы

$$\bar{k} = \frac{\sum_{i=1}^n \theta_i}{\sum_{i=1}^n \theta_i + \sum_{i=1}^n t_{вi}}, \quad (4.47)$$

где  $t_{вi}$  — время обнаружения и восстановления  $i$ -го отказа;  $n$  — число отказов за рассматриваемый период времени,

а интенсивность отказов элементов

$$\lambda_i = \frac{\Delta n_i}{(N - n_i) \Delta t_i}, \quad (4.48)$$

где  $\Delta n_i$  — число отказов за промежуток времени  $\Delta t_i$ ;  $N$  — начальное число элементов;  $n_i$  — число отказавших элементов к началу промежутка времени  $\Delta t_i$ .

При экспоненциальном распределении времени безотказной работы системы с последовательным соединением элементов и известной интенсивности отказов элементов комплекса АТС  $\lambda(T)$  вероятность безотказной работы

$$p(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}. \quad (4.49)$$

Для системы, состоящей из последовательно соединенных элементов, вероятность безотказной работы определяется как произведение вероятностей безотказной работы всех элементов:

$$p(t) = p_1(t) p_2(t) p_3(t) \times \dots \times p_N(t) = \prod_{j=1}^N p_j(t), \quad (4.50)$$

а вероятность безотказной работы элемента по результатам испытаний на надежность

$$p(t) = \frac{N - n_i}{N}, \quad (4.51)$$

где  $N$  — начальное число испытываемых элементов;  $n_i$  — число отказавших элементов за время  $t_i$ .

Для периода нормальной эксплуатации интенсивность отказов — величина постоянная. Так, вероятность безотказной работы при экспоненциальном распределении времени

$$p(t) = e^{-\lambda T}, \quad (4.52)$$

а среднее время безотказной работы

$$T = \int_0^{\infty} e^{-\lambda T} dT = \frac{1}{\lambda}. \quad (4.53)$$

Например, максимальная интенсивность отказов рельсовых цепей, по данным наблюдений, составила  $205,7 \cdot 10^{-3}$ , или 0,206 отказов в год (число наблюдаемых элементов 2289, число отказов — 438, доверительная вероятность — 0,8). В этом случае в соответствии с (4.52) минимальная вероятность исправной работы рельсовой цепи в течение года

$$p = e^{-\lambda t} = e^{-0,206} = 0,82,$$

а среднее время безотказной работы

$$T = \frac{1}{0,206} \approx 5 \text{ лет},$$

т. е. в течение года каждые пять рельсовых цепей будут давать по одному отказу.

Аналогично вероятность исправной работы стыка рельсовой цепи на графитовой смазке при  $\lambda = 0,27$

$$p = e^{-0,27} = 0,76,$$

а стыка с приварными соединителями

$$p = e^{-0,17} = 0,86.$$

Среднее время безотказной работы стыка на графитовой смазке составляет 3,7 года, а стыка с приварными соединителями — 5,9 года, т.е. 37 стыков первого типа и 59 второго дают по 10 отказов в год.

Параметр потока отказов в расчете на 1 км автоблокировки составляет 0,187 в год [44]. В этом случае вероятность безотказной работы систем автоблокировки

$$p = e^{-0,187} = 0,844,$$

а среднее время безотказной работы 5,3 года. Это значит, что каждые 53 км автоблокировки дают по 10 отказов в год (в расчете на один главный путь).

Минимальное значение вероятности исправной работы устройств АТС при  $\lambda = 0,31$

$$p = e^{-0,31} = 0,733,$$

а среднее значение времени безотказной работы комплекта аппаратуры АТС — 3,2 года, т. е. на каждые 32 локомотива в год будет по 10 отказов приборов АЛС.

Устройства ЭЦ на станциях дают, по данным наблюдений, 0,96 отказов в год в расчете на один стрелочный перевод. Вероятность безотказной работы устройств ЭЦ

$$p = e^{-0,96} = 0,383,$$

а среднее время безотказной работы устройств ЭЦ примерно 1 год. Это значит, что станционная горловина из 10 стрелок будет давать по устройствам электрической централизации в среднем по 10 отказов в год.

Влияние отказов устройств комплекса АТС на эксплуатационную работу, пропускную и перерабатывающую способность проявляется через продолжительность времени восстановления работоспособности системы  $t_b$ . Она складывается из затрат времени на оповещение электромеханика об отказе, на следование его или группы специалистов к объекту отказа, на поиск и устранение отказа.

Зная интенсивность отказов в расчете на 1 км автоблокировки или на 1 стрелочный перевод системы ЭЦ и других станционных систем комплекса АТС, можно прогнозировать число отказов для станции, участка, отделения. За прошедший период воздействие отказов комплекса устройств АТС определяется на основе статистических данных.

Отказы светофоров на станциях и участках вызывают кратковременные задержки продвижения поездов, которые характеризуются величинами потерь времени  $\Delta t_c$  и снижения ходовой и участковой скорости. Если принять среднее значение параметров отказа сигнальной точки 0,394 в год, то вероятность безотказной работы светофоров

$$p = e^{-0,394} = 0,677,$$

а вероятность отказа  $q = 0,323$ .

Потери поездочасов за счет отказов сигнальных точек при их функции надежности  $Q_i(t)$

$$\sum (Nt)_{oc} = \sum_{i=1}^{365} N_i n Q_i(t) \bar{\Delta t}_c, \quad (4.54)$$

где  $\sum_{i=1}^{365} N_i$  — общее число пропущенных по участку поездов за год;  $n$  — число светофоров на участке;  $\bar{\Delta t}_c$  — средняя потеря времени, ч, при отказе сигнальной точки.

Восстановление работоспособности других элементов и систем комплекса АТС требует больших затрат времени (среднее время восстановления устройств ЭЦ, например, составляет 0,81 ч, а автоблокировки — 1,35 ч). А это вызывает сбои в продвижении поездов и работе станций, потери в использовании пропускной способности и снижает показатели эксплуатационной работы в грузовом и пассажирском движении. Кроме того, комплекс устройств АТС оказывает прямое воздействие на безопасность движения поездов, определяет общий уровень технической оснащенности станций и железнодорожных линий в целом.

#### 4.6. Влияние комплекса технических средств и станций на надежность выполнения графика движения поездов

График движения поездов является организующей и технологической основой перевозочного процесса. Он функционально объединяет комплекс технических средств, работу депо, подвижного состава, станций в единую технологию. На графике технологический процесс представлен в виде суммарного скоординированного транспортного потока (во времени и пространстве). Величина этого потока определяется планами отправления грузов и формирования поездов.

Отказы комплексов технических средств, подвижного состава, технологические отказы и сбои в работе станций, отказы информа-

ционно-управляющих систем в конечном итоге приводят к серьезным нарушениям графика движения и недоиспользованию пропускной способности. Изучение надежности графика движения поездов как общесистемной технологической основы является актуальной проблемой.

График движения оказывает большое влияние на надежность и условия работы сортировочных и других станций: когда пропускаются транзитные поезда, на станциях задерживаются поезда своего формирования, сгущенный (пачковый) пропуск транзитных поездов вызывает последующий неравномерный (пачковый) подвод разборочных поездов, которые могут быть приняты на станции с отказами (задержками). В свою очередь станции наряду с комплексом технических средств и подвижным составом оказывают решающее влияние на надежность движения поездов по графику.

Первичный учет надежности выполнения графика движения поездов проводят инженеры-анализаторы, которые ведут специальные книги формы ДУ-26 для грузового и ДУ-27 для пассажирского движения. Исходным материалом, отражающим фактический ход процессов, является график исполненного движения.

Следует, однако, учитывать некоторую неточность отражения процессов на графике исполненного движения, которая вызывается разными причинами (недостоверной информацией дежурных по станции, операторов, неправильным отражением процессов дежурными и диспетчерами) и тесно связана с уровнем исполнительской и технологической дисциплины. Специальным анализом можно установить степень искажения фактического процесса при его отражении на графике. Может быть определена сумма квадратов отклонений данных графика исполненной работы и фактического процесса по отправлению, прибытию или проследованию:

$$D = \sum_{i=1}^n (t_{ni} - t_{грi})^2 = \sum_{i=1}^n \Delta_i^2; i=1, 2, \dots, n, \quad (4.55)$$

где  $t_{ni}$  — фактическое время наступления  $i$ -го события;  $t_{грi}$  — время наступления события, показанное на графике;  $n$  — число событий (поездов).

На основе формулы (4.55) можно определить некоторую величину ошибки отражения событий на графике:

$$\varepsilon = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{n}}. \quad (4.56)$$

На рис. 4.5 приведен фрагмент графика исполненного движения, на котором показаны отклонения времени на графике исполненной работы (тонкие линии) от фактического времени проследования поездов (углощенные линии). По данным рис. 4.5 сумма квадратов отклонений составляет:  $(6)^2 + (3)^2 + (4)^2 + (5)^2 + (7)^2 = 160 \text{ мин}^2$ ,

а неточность отражения процесса по проследованию в расчете на один поезд —  $\varepsilon = \sqrt{\frac{160}{9}} = 4 \text{ мин}$ .

При анализе выполнения графика движения поездов можно использовать также настольный журнал движения поездов и локомотивов, сменный план поездной работы отделения дороги, указания о назначении пассажирских поездов, нормативы технологического процесса работы станций.

Работа станций по выполнению графика отправления поездов должна быть основана на научных принципах управления, положениях теории надежности и резервирования. При соблюдении этих положений обеспечены ускоренный пропуск поездопотоков, наилучшие условия использования технических средств, их профилактического осмотра и ремонта.

Для определения влияния отказов всех элементов комплекса технических средств на выполнение графика движения будем использовать параметр потока отказов — среднее число отказов ремонтируемых устройств (восстанавливаемых объектов) в единицу времени для рассматриваемого периода:

$$\lambda_j(T) = \frac{\sum_{i=1}^k n_j(t + \Delta t) - \sum_{j=1}^k n_j(t)}{N(t) \Delta t}; j=1, 2, \dots, k, \quad (4.57)$$

где  $k$  — число технических, технологических и информационных комплексов, отказы которых оказывают влияние на движение поездов и выполнение графика;  $n_j(t)$  — число отказов, вызывающих нарушение графика (число за-

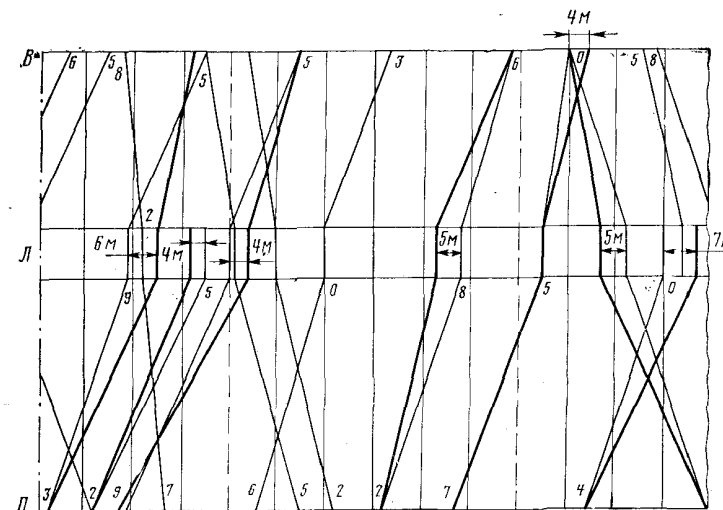


Рис. 4.5. Фрагмент графика движения. Тонкими линиями показаны плановые нитки, толстыми — фактические

держанных поездов)  $j$ -м комплексом на момент времени  $t$ ;  $\Delta t$  — элементарный промежуток времени (для анализа графика можно принять  $\Delta t = T = 1$  сут).

Если обозначить потоки отказов, которые вызвали задержку отправления поездов в течение периода  $T$  (например, в течение 1 сут) по локомотивному комплексу,  $\omega_{\text{л}}(T)$ , вагонов —  $\omega_{\text{в}}(T)$ , пути —  $\omega_{\text{п}}(T)$ , АТС —  $\omega_{\text{АТС}}(T)$ , грузовому комплексу —  $\omega_{\text{г}}(T)$ , пассажирскому комплексу —  $\omega_{\text{пас}}(T)$ , по технологии формирования и обеспечения документами —  $\omega_{\text{д}}(T)$ , то общий поток отказов, вызвавших невыполнение установленного времени отправления, с учетом отказов по управлению  $\omega_{\text{у}}(T)$

$$\omega(T) = \omega_{\text{л}}(T) + \omega_{\text{в}}(T) + \omega_{\text{п}}(T) + \omega_{\text{АТС}}(T) + \omega_{\text{г}}(T) + \omega_{\text{пас}}(T) + \omega_{\text{д}}(T) + \omega_{\text{у}}(T) = \sum_{j=1}^k \omega_j(T); j=1, 2, \dots, k, \quad (4.58)$$

а надежность выполнения графика по отправлению

$$P_{\text{гр}}^0(T) = 1 - \frac{\sum_{j=1}^k \omega_j(T)}{N(T)} = 1 - \omega(T); j=1, 2, \dots, k, \quad (4.59)$$

где  $k$  — число технических, технологических и информационных комплексов, которые могут вызвать отказ — задержку отправления поездов.

Определить надежность работы по подготовке и отправлению поездов по графику можно с помощью коэффициентов готовности по соответствующим комплексам. Система работы по подготовке поездов к отправлению состоит из  $k$  элементов (комплексов). Отказ хотя бы одного элемента вызывает срыв отправления поездов по графику, т. е. при отказе одного элемента отказывает вся система подготовки отправления поезда по графику.

Обозначим интенсивности отказов комплексов локомотивов, вагонов, пути и т. д.  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_k$ , а интенсивности восстановления готовности к отправлению поездов  $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_k$ . Если представить состояния всего комплекса подготовки поездов к отправлению в виде графа, то можно составить систему дифференциальных уравнений, характеризующих взаимосвязи этих состояний:

$$\begin{aligned} \frac{dp_1(t)}{dt} &= \lambda_1 p_0(t) - \mu_1 p_1(t); \\ \frac{dp_2(t)}{dt} &= \lambda_2 p_0(t) - \mu_2 p_2(t); \\ &\dots \dots \dots \\ \frac{dp_k(t)}{dt} &= \lambda_k p_0(t) - \mu_k p_k(t), \end{aligned}$$

причем  $\sum_{i=1}^k p_i(t) = 1$ , а функция готовности системы к графическому отправлению поездов  $\Gamma(t) = \sum_{j=1}^k p_j(t)$ .

При установившемся режиме работы по отправлению поездов имеем

$$\begin{aligned} \lambda_1 p_0 - \mu_1 p_1 &= 0; \\ \lambda_k p_0 - \mu_k p_k &= 0; \\ &\dots \dots \dots \end{aligned}$$

Отсюда коэффициент готовности всех комплексов к выполнению работы по отправлению поездов в соответствии с графиком:

$$K_{\text{гр}} = p_0 = \frac{1}{1 + \sum_{j=1}^k \frac{\lambda_j}{\mu_j}}, \quad (4.60)$$

где  $p_0$  — вероятность начального состояния.

Вероятность нахождения системы из  $k$  комплексов в  $i$ -м состоянии определяем из выражения

$$p_j = \frac{\lambda_j}{\mu_j} p_0. \quad (4.61)$$

Кроме того, из соотношения

$$K_{\text{г}} = \frac{\mu}{\mu + \lambda}$$

находим, что интенсивность восстановления готовности к отправлению поезда по  $j$ -му комплексу

$$\mu_j = \lambda_j \frac{K_{\text{гр}}}{1 - K_{\text{гр}}}. \quad (4.62)$$

Подставив этот результат в формулу (4.60), получим очень важное для использования на практике выражение коэффициента готовности работы к отправлению поездов по графику, или надежности выполнения графика отправления поездов:

$$K_{\text{гр}}^0 = \frac{1}{1 + \sum_{j=1}^k \left( \frac{1}{K_{\text{гр}j}} - 1 \right)}. \quad (4.63)$$

Число отправленных поездов по графику составляет целую часть выражения

$$N_{\text{гр}} = [N(T) \kappa_{\text{гр}}^0], \quad (4.64)$$

а число задержанных поездов

$$N_{\text{з}} = [N(T) (1 - \kappa_{\text{гр}})]. \quad (4.65)$$

**Пример.** Необходимо определить коэффициент готовности отправления поездов по графику и надежность выполнения графика движения поездов по отправлению, если за сутки отправляется 110 поездов всех категорий,  $N(T) = 110$ . Коэффициенты готовности отправления поездов по комплексам составляют: локомотивному (с учетом подготовки локомотивов в ПТО, подвода и обеспеченности бригадами)  $\kappa_{\text{л}} = 0,950$ ; вагонному, включая каналы (бригады) ПТО,  $\kappa_{\text{в}} = 0,960$ ; пути  $\kappa_{\text{п}} = 0,994$ ; АТС  $\kappa_{\text{АТС}} = 0,996$ ; грузовому комплексу, включая коммерческую подготовку составов к отправлению,  $\kappa_{\text{г}} = 0,982$ ; пассажирскому комплексу  $\kappa_{\text{пасс}} = 0,990$ ; по комплексу движения (включая управление)  $\kappa_{\text{д}} = 0,953$ .

По формуле (4.63) получаем:

$$\begin{aligned} \kappa_{\text{гр}}^0 &= \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{0,950} - 1\right) + \left(\frac{1}{0,960} - 1\right) + \left(\frac{1}{0,994} - 1\right) +} \\ &\rightarrow \frac{1}{+ \left(\frac{1}{0,996} - 1\right) + \left(\frac{1}{0,982} - 1\right) + \left(\frac{1}{0,999} - 1\right) + \left(\frac{1}{0,953} - 1\right)} = \\ &= \frac{1}{1 + 0,0526 + 0,0417 + 0,0060 + 0,0040 + 0,0183 + 0,001 + 0,0493} = \\ &= \frac{1}{1,1729} = 0,8526. \end{aligned}$$

Надежность выполнения графика движения поездов по отправлению

$$p'(N) = 0,8526 \cdot 100 = 84,26\%.$$

Надежность отправления поездов по графику в данном случае невысока из-за неудовлетворительной величины коэффициента готовности прежде всего по комплексам локомотивному, вагонному, движения, грузовому. Число «сорванных» с графика поездов

$$N_{\text{з}} = [110 (1 - 0,8526)] = 16.$$

Аналогичный подход может быть применен при исследовании и анализе надежности графика движения поездов по проследованию и прибытию.

## НАДЕЖНОСТЬ РАБОТЫ СТАНЦИЙ — СТЫКОВЫХ ПУНКТОВ ОТДЕЛЕНИЙ И ДОРОГ

### 5.1. Виды стыковых пунктов между системами и подсистемами, их классификация

Стыковые пункты между транспортными системами, каждая из которых имеет отдельное управление, внутреннюю технологию и учет показателей работы, можно отнести к слабым звеньям перевозочного процесса. На железнодорожном транспорте именно в стыковых пунктах в первую очередь появляются сбои в поездной и грузовой работе. Наиболее часто сбои в продвижении вагонопотока возникают на стыках:

«железнодорожный участок—сортировочная (участковая) станция» — по вводу поезда с участка на станцию;

«сортировочная (участковая) станция—железнодорожный участок» — по выводу (отправлению) поездов со станции;

«система поездообразования—система подвода и подвязки локомотивов—система их технического обслуживания и подготовки в рейс»;

«железнодорожный участок—межотделенческий или междорожный стык (станция) — железнодородный участок»;

«железнодорожный участок—станция (пункт смены локомотивных бригад) — железнодородный участок»;

«железнодорожный участок (или несколько вместе взятых железнодородных участков) — станция (пункт оборота локомотивов) — железнодородный участок (или сумма участков)» и т. д.

Неудовлетворительный прием и пропуск поездов через стыковые пункты приводят к нарушениям режима труда локомотивных бригад и работников других подразделений, задержкам на станциях значительного числа поездов и другим осложнениям в эксплуатационной работе.

В связи с многообразием причин, влияющих на работу стыковых станций, их надежность в значительной степени характеризует уровень управления, развития и качество взаимодействия подсистем перевозочного процесса. В связи с этим будем рассматривать надежность станций—стыковых пунктов — как элементов подсистемы «железнодорожный участок—стыковой пункт (станция) — железнодородный участок».

Стыковые пункты можно классифицировать по месту расположения (на полигоне дороги — межотделенческие и на сети — междорожные), классности станций, наличию пунктов смены локомотивных бригад и оборота локомотивов. Они на полигоне могут располагаться на участке между сортировочными (участковыми) станциями, на подходе к сортировочной (участковой) станции, на подходе к узлу.

Станции — стыковые пункты могут быть сортировочными, участковыми и промежуточными. Обычно станции стыковых пунктов, где не производится смена локомотивных бригад и оборот локомотивов, являются промежуточными. Стыковые станции со сменой локомотивных бригад и оборотом локомотивов обычно участковые.

Размещение стыковых пунктов оказывает большое влияние на технологию пропуска поездопотоков, выработку регулировочных мероприятий и управленческих решений. Исследование затруднений в пропуске поездопотоков, возникающих на стыковых пунктах, позволяет выявить закономерность появления отказов в поездной работе, предупредить возможные затруднения и за счет этого повысить пропускную способность направлений, эффективность оперативного планирования и регулирования эксплуатационной работы на полигоне.

## 5.2. Отказы в работе стыковых пунктов

Задержки поездов на стыковых пунктах между отделениями и дорогами вызываются в основном отсутствием достаточной пропускной и перерабатывающей способности на прилегающих участках и взаимодействующих станциях, несоответствием в развитии пропускной способности линий, станций, локомотивных и вагонных депо, других устройств, недостатками в оперативном прогнозировании и регулировании поездопотоков, несвоевременным подводом локомотивов и бригад, неритмичностью эксплуатационной работы, отказами технических средств.

Большинство факторов, вызывающих отказы в пропуске поездов через стыковой пункт, взаимосвязаны. Рассмотрим их влияние на конкретных примерах.

Отсутствие достаточной пропускной и перерабатывающей способности на участках и станциях, взаимосвязанных через стыковые пункты, в тех случаях, когда фактические размеры движения поездов больше тех, на которые рассчитаны станционные и перегонные устройства участков, приводит к затруднениям в работе. Фактические размеры движения поездов в отдельные периоды превышают установленные графиком. Это вызывает переполнение емкостей путей парков, станций участков, отдельных направлений и отделений дороги.

Например, на одном конце участка  $Л—Н$  (рис. 5.1) находится двусторонняя сортировочная станция  $Л$ , а на другом — станция  $Н$ , которая является стыковым пунктом двух отделений. Ограничивающим элементом в четном направлении на линии является станция  $Л$ . В отдельные периоды суток поток поездов, поступающих в переработку, превышает перерабатывающую способность ее четной сортировочной системы. Это приводит к постепенному заполнению парков станции, задержкам поездов на станциях участка  $Л—Н$  и затем запрету на прием по стыковому пункту  $Н$  поездов, следующих в переработку на станцию  $Л$ . На рис. 5.1 показан пачкообразный

подход поездов к станции  $Л$  с участка  $Л—Н$  и последовавший за ним полный запрет на прием поездов в течение  $T_3^Л = 60$  мин. В дальнейшем прием поездов на станцию осуществлялся по мере освобождения путей в парке прибытия четной сортировочной системы. Это привело к постепенному заполнению участка поездами назначением  $Л$  и запрету приема поездов на участок в течение  $T_3^Н = 1 \text{ ч } 40 \text{ мин.}$

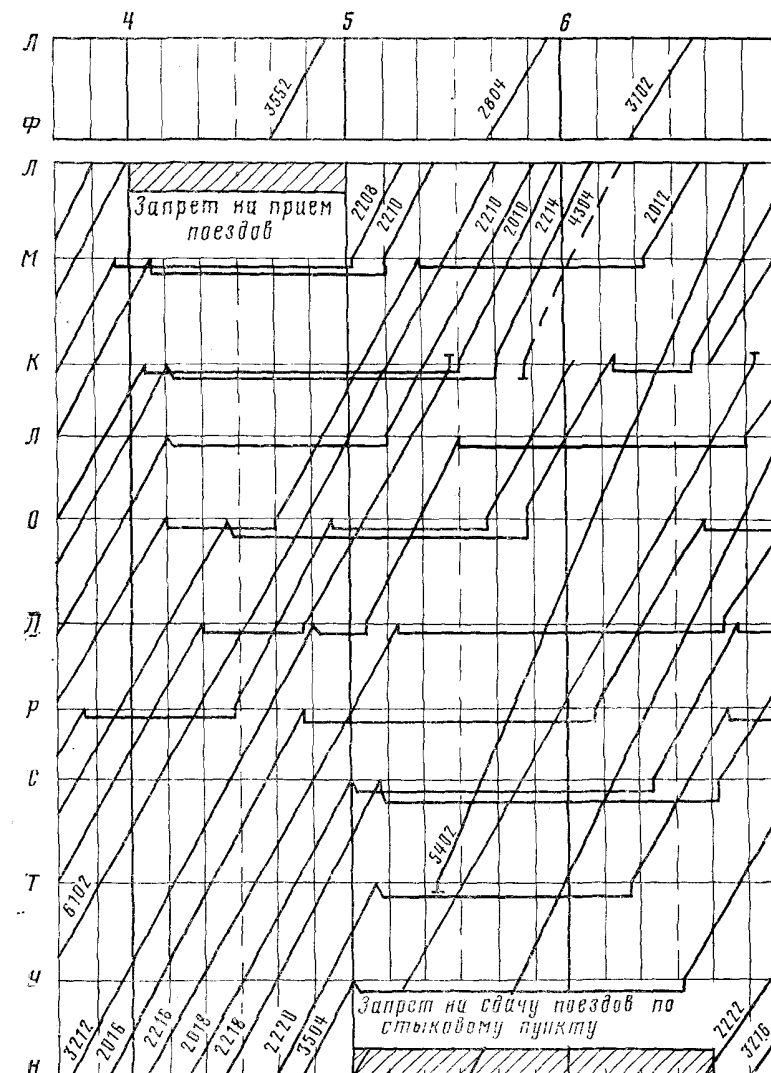


Рис. 5.1. Возникновение отказов в приеме поездов стыковой станцией  $Н$  из-за недостаточной перерабатывающей способности станции  $Л$

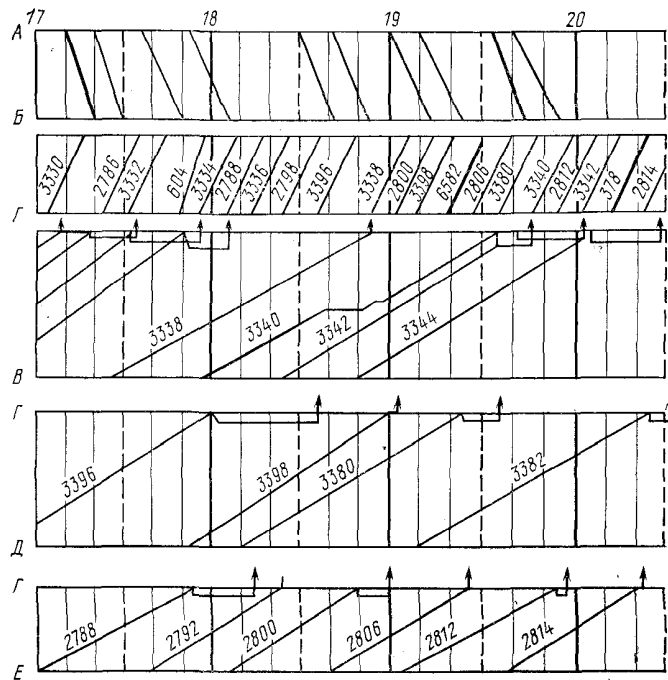


Рис. 5.2. Задержки грузовых поездов на станции Г из-за неравномерного подвода поездов к стыковой станции Б

Несоответствие в развитии пропускной способности железнодорожных линий, станций, локомотивных и вагонных депо, других устройств заключается в превышении их величин по одну из сторон стыкового пункта, неодинаковом развитии технической базы (разветвленность сети локомотивных и вагонных депо, различие в типах эксплуатируемых локомотивов, степени электрификации участков и станций, в путевом развитии, применяемых устройствах СЦБ и связи и т.д.). Это приводит к невозможности освоения в одном из направлений постоянно возрастающего поездопотока в целом за сутки или в течение отдельного периода времени.

Недостатки оперативного прогнозирования и регулирования поездопотоков связаны с тем, что на дорогах и отделениях система информационного обеспечения диспетчерского руководства движением поездов не имеет достаточно глубокой информации о зарождении и продвижении поездопотока, а диспетчерское регулирование охватывает лишь ограниченные полигоны. Это приводит к неравномерной загрузке станций и, в частности, стыковых пунктов.

На рис. 5.2 показаны задержки грузовых поездов на станции Г из-за неравномерного подхода грузовых поездов к стыковому

пункту Б с трех подходов В—Г, Д—Г, Е—Г. Всего задержано 11 поездов и общий их простой на станции Г составил 3,3 поездо-ч (поезда № 3332, 3334, 3336, 3340, 3342, 3344 — с первого подхода, № 3396, 3380 — со второго, № 2788, 2800 — с третьего подхода). С четвертого подхода грузовые поезда принимались без задержек с преимуществом по сравнению с тремя другими подходами.

Неравномерный подход грузовых поездов к стыковому пункту Б вызван очень малой глубиной информации о поступлении на диспетчерский участок поездов с подходов А, В, Д, Е; поездной диспетчер часто получает информацию о поезде и его основных характеристиках только при поступлении на участок. Период планирования работы диспетчерского участка ограничивается средним временем хода по нему грузового поезда. Поэтому на диспетчерском участке небольшой протяженности с несколькими подходами и большими размерами движения практически трудно регулировать поездопотоки.

Неритмичность эксплуатационной работы возникает в основном из-за неравномерности погрузки-выгрузки на подъездных путях, путях общего пользования, грузовых дворах станций, а также на промышленном железнодорожном транспорте в течение суток, недели, месяца и года. Невыполнение специализации графика движения поездов может также приводить к нарушению ритма эксплуата-

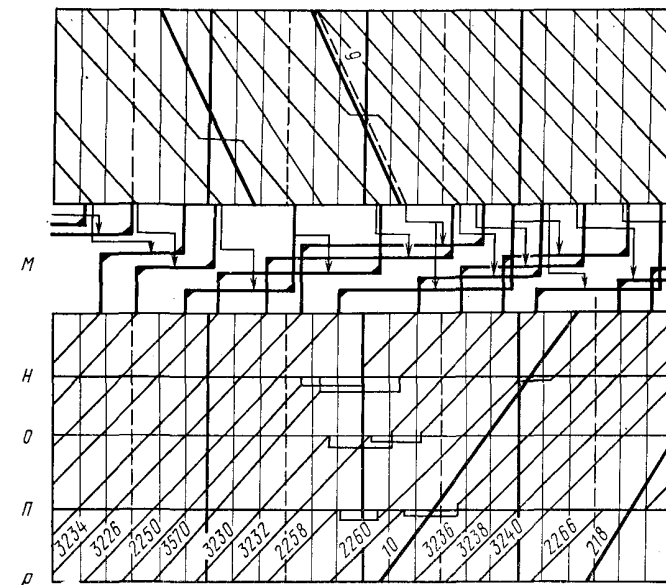


Рис. 5.3. Отказы в приеме поездов стыковой станцией М между дорогами (из-за несвоевременного подвода локомотивных бригад) и станциями Н, О, П (из-за заполнения путей станции М — вторичные отказы)



лиз вероятностей отказа в работе стыковых пунктов по пропуску поездов четного и нечетного направлений показывает, что отделение К работает с большей вероятностью отказа в приеме поездов, чем взаимодействующие с ним отделения.

Таблица 5.1

Надежность работы стыковых пунктов отделения в месяц с максимальными задержками поездов

| Стыковой пункт | Показатели надежности по направлениям |                      |        |        |                    |                      |        |        |
|----------------|---------------------------------------|----------------------|--------|--------|--------------------|----------------------|--------|--------|
|                | четному                               |                      |        |        | нечетному          |                      |        |        |
|                | $\sum_{i=1}^n N_i$                    | $\sum_{i=1}^n N_i^H$ | $Q(t)$ | $R(t)$ | $\sum_{i=1}^n N_i$ | $\sum_{i=1}^n N_i^H$ | $Q(t)$ | $R(t)$ |
| А              | 2983                                  | 403                  | 0,135  | 0,865  | 2448               | 155                  | 0,063  | 0,937  |
| Б              | 1567                                  | 307                  | 0,196  | 0,804  | 1650               | 866                  | 0,525  | 0,475  |
| В              | 2189                                  | 546                  | 0,249  | 0,751  | 2275               | 306                  | 0,135  | 0,875  |
| Г              | 283                                   | 1                    | 0,004  | 0,996  | 293                | 5                    | 0,017  | 0,983  |

Для более достоверной оценки надежности работы стыковой пункт необходимо рассматривать во взаимосвязи с подсистемой «диспетчерский участок—стыковой пункт—диспетчерский участок» («ДУ—СП—ДУ»). Влияние отказов в работе стыкового пункта на функционирование подсистемы «ДУ—СП—ДУ» можно проследить на ее технологической модели, построенной на основе теоретико-множественного описания общих систем.

Работу стыковых пунктов будем рассматривать по обеспечению выполнения установленных плановых количественных и качественных заданий. Для нормального функционирования подсистемы «ДУ—СП—ДУ» необходимо, чтобы через стыковые пункты поступало установленное число  $U$  и сдавалось  $V$  вагонов (поездов). Пусть  $U$  и  $V$  — множества входных и выходных потоков,  $S$  — технологическая подсистема «ДУ—СП—ДУ», определяемая соотношением

$$S \subseteq U \times V.$$

• Технологическая система переработки вагонопотока на отделении (дороге) функционирует во времени, поэтому  $U$  и  $V$  являются временными объектами. Обозначим их значения в момент  $t$   $U(t)$ ,  $V(t)$ , состояние отделения (дороги) в момент  $t$  —  $X(t)$ , а множество  $X$  — семейство состояний. Семейство состояний временной и технологической систем отделения (дороги) определяют такие параметры и характеристики, которые изменяются во времени (прием и сдача вагонов по стыковым пунктам, рабочий парк, оборот вагонов и др.).

Если  $X(t)$  — множество состояний отделения (дороги), то реакцией отделения (дороги) в момент  $t$  будет функция

$$g(t): X(t) \times U(t) \rightarrow V_t. \quad (5.5)$$

Семейство всех реакций

$$G = \{g(t): x_t \times U_t \rightarrow V_t\}. \quad (5.6)$$

Семейство  $G$  будут составлять зависимости, связывающие параметры и показатели функционирования отделения, дороги (оборот вагона, рабочий парк и т.п.), входной поток (прием вагонов по стыковым пунктам) с величиной выходного потока (сдача вагонов).

На входе отделения в подсистеме «ДУ—СП—ДУ» целый ряд случайных факторов может привести к отказам  $\xi$  ( $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ ). С их учетом выходной поток из отделения в момент  $t$

$$V(t) = g[x(t), u(t), \xi(t)]. \quad (5.7)$$

Разделим множества  $U$  и  $V$  на два подмножества:

$$\left. \begin{aligned} U &= U_1 \cup U_2; V = V_1 \cup V_2; \\ u &\in (U_1 \cap U_2); v \in (V_1 \cap V_2), \end{aligned} \right\} \quad (5.8)$$

где  $U_1, V_1$  — множества допустимых значений входных и выходных потоков в подсистеме «ДУ—СП—ДУ»;  $U_2, V_2$  — множества недопустимых значений входных и выходных потоков;  $U_n, V_n$  — критерии входных и выходных потоков подсистемы.

Тогда семейство отображений состояния подсистемы «ДУ—СП—ДУ» можно разбить на две части: допустимую область потоков (входных и выходных), при которых подсистема находится в работоспособном состоянии,

$$S_1 \subseteq U_1 \times V_1 \quad (5.9)$$

и область, при которой подсистема неработоспособна:

$$\left. \begin{aligned} U_1 \times V_2; \\ S_2 \subseteq U_2 \times V_1; \\ U_2 \times V_2. \end{aligned} \right\} \quad (5.10)$$

Граница перехода подсистемы «ДУ—СП—ДУ» из одного состояния в другое будет определяться пространством:

$$S_H \subseteq U_H \times V_H. \quad (5.11)$$

Установление границ перехода подсистемы «ДУ—СП—ДУ» в неработоспособное состояние  $S_2$  наиболее важно для определения режимов работы сортировочных станций, прогнозирования объемов работы отделений и дорог. Отсутствие учета влияния случайных факторов на входах отделения (дороги) приводит к возникновению отказов в подсистеме, а также к отказам в работе отделения, дороги и целых направлений.

Использование величины интенсивности отказов  $\lambda$ , полученной на основе анализа технических и технологических отказов в каждой конкретной подсистеме «ДУ—СП—ДУ», происшедших при различных нагрузках, позволяет определить основные параметры надежности —ной вероятность безотказной работы и период нормального функционирования подсистемы между отказами.

Подсистема «ДУ—СП—ДУ» может находиться в  $n$  состояниях. Находясь в  $X_k(t)$ -м состоянии, она может отказать за время  $\Delta t$  с вероятностью  $\lambda_k \Delta t$ . Время пребывания в  $X_k(t)$ -м состоянии есть случайная величина, тогда смена состояний образует марковскую цепь. Если  $\tau_k(t)$  — суммарное время пребывания подсистемы в состоянии  $k$  на участке  $(0, t)$ , то вероятность безотказной работы подсистемы

$$p(t) = Me^{-\sum_{k=1}^n \lambda_k \tau_k(t)} \quad (5.12)$$

Если время  $t$  очень велико, то

$$p(t) \approx e^{-\left(\sum_{k=1}^n \lambda_k p_k\right)t}, \quad (5.13)$$

где  $p_k$  — вероятность того, что в произвольно взятый момент времени система находится в состоянии  $k$ .

Предполагая, что технологические и технические отказы возникают независимо друг от друга, получим функцию надежности работы подсистемы «ДУ—СП—ДУ»:

$$p(t) = p_1(t) p_2(t), \quad (5.14)$$

где  $p_1(t)$ ,  $p_2(t)$  — вероятности того, что за время  $t$  не произойдет технологического и технического отказов.

Надежность работы стыкового пункта в первую очередь характеризует взаимодействие участков (отделений, дорог), т. е. сможет ли участок принять в момент  $t + \Delta t$  поезд, группу поездов, каков максимальный объем поездов, передаваемых на участок по данному стыковому пункту за период  $t$  без задержек. При расположении стыкового пункта на однопутном участке вероятность его безотказной работы определится произведением вероятностей пропуска поездов без задержек в четном и нечетном направлениях:

$$p_{\text{одн}}(t) = p^{\text{н}}(t) p^{\text{ч}}(t). \quad (5.15)$$

На двухпутном участке вероятность безотказной работы стыкового пункта равна сумме вероятностей безотказного пропуска поездов в четном и нечетном направлениях, так как отдельные направления можно рассматривать как самостоятельные подсистемы и в случае отказа на одном из путей возможно использование второго пути для пропуска поездов обоих направлений через стыковой пункт:

$$p(t) = p^{\text{н}}(t) + p^{\text{ч}}(t) - p^{\text{н}}(t) p^{\text{ч}}(t). \quad (5.16)$$

На надежность работы стыковых пунктов, таким образом, влияет комплекс взаимосвязанных причин технического, технологического, информационно-управляющего характера. Причем чем выше степень заполнения графика движения поездов на взаимодействующих со стыковой станцией участках, тем ниже уровень эксплуатационной надежности стыковой станции.

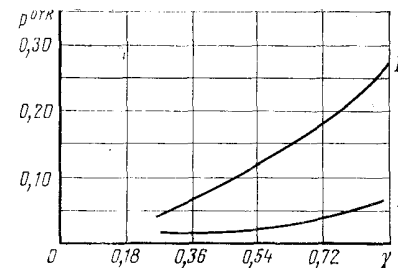


Рис. 5.4. Функции отказов на однопутных (I) и двухпутных (II) подходах к стыковым станциям с учетом отказов по технологическому и техническому комплексам

Значения функции отказов в зависимости от степени заполнения графика движения приведены на рис. 5.4. При этом учитывались отказы в связи с приоритетным пропуском поездов по отношению к остальным грузовым поездам, неприем поездов стыковой станцией по причинам, связанным с ее технологией и путевым развитием, неприем поездов отделением дороги и дорогой, а также прочие технологические отказы (по коммерческому браку и др.). Кроме того, учитывались отказы по всем элементам технического комплекса (локомотивам, вагонам, пути, устройствам АТС и энергоснабжения).

Основными мерами повышения эксплуатационной надежности работы стыковых пунктов являются:

повышение надежности технических устройств и подвижного состава (применение автоблокировки, электрической централизации, диспетчерского контроля, укладка бесстыкового пути и др.);

ликвидация диспропорций в развитии пропускной способности (повышение пропускной способности осуществляется на целых направлениях);

увеличение глубины информации и повышение ее достоверности при планировании работы стыковых пунктов за счет расширения зоны сбора информации до оптимальных размеров;

пропуск поездов через стыковые пункты без смены локомотивов и локомотивных бригад;

оптимизация мест расположения стыковых пунктов на полигоне дороги и сети с учетом не только исторически сложившихся условий экономического развития района, административно-территориального разделения страны, но и технических средств и технических условий работы взаимодействующих станций и узлов;

установление единой унифицированной нормы массы поезда (или пропуск поездов через стыковой пункт без изменения массы до первой технической станции);

строительство путевых емкостей на стыковых станциях и станциях, расположенных на подходах к стыковому пункту, рассчитанных на максимальные объемы работы.

Из-за функциональной усложненности работы стыковой станции надежность ее работы несколько ниже надежности обычной станции. Поэтому она должна учитываться при обосновании путевого развития парков стыковой станции.

## НАГРУЗКА НА СТАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ПОДСИСТЕМЫ

### 6.1. Транспортные потоки и их характеристики

При разработке технологии, обосновании путевого развития, разработке мер по повышению эксплуатационной надежности различных типов станций необходимо анализировать, рассчитывать, планировать и прогнозировать транспортные потоки. Транспортные потоки определяют нагрузки на транспортные системы, и от их объемов зависят мощность станций, депо, участков, полигонов, уровень эксплуатационной надежности работы, потребность в подвижном составе, топливе, материалах и других ресурсах.

Для исследования надежности станций, их систем и подсистем нужно предварительно установить величины потоков поездов на входах и выходах станций, а также оценить изменение потоков в их подсистемах, рассчитать местные вагонопотоки, которые поступают в районы грузовой работы. Чем больше поток, тем выше нагрузка системы. Поэтому в проектировании и эксплуатации станции можно рассматривать две задачи. Первая — расчет оптимальной величины транспортного потока при существующей технической оснащённости станции и вторая — установление оптимальной мощности станции для пропуска заданных или прогнозируемых потоков. Для расчета путевой мощности необходимо знать параметры транспортного потока — математическое ожидание, дисперсию и др.

На сети выделяют узлы (пункты) — источники транспортных потоков или пункты отправления, а также узлы (пункты) — места назначения потока. Эти пункты называют также пунктами стока. Потоки могут быть с единственным пунктом отправления (источником) и с единственным пунктом назначения (стоком). В большинстве случаев при рассмотрении плана формирования, графика движения поездов, разработке технологии и путевого развития станций имеют место так называемые многотерминальные (мультитерминальные) потоки со многими пунктами отправления и назначения. Многотерминальные потоки образуются путем слияния, объединения однотерминальных потоков. Это слияние происходит на основе допустимости для транспортных потоков принципа аддитивности — сложения транспортных потоков. Принцип аддитивности, однако, нельзя применять механически, например, для разнородных транспортных потоков. Так, пассажирские поезда следует предварительно «привести» к грузовым по степени влияния на использование пропускной способности. Нельзя механически складывать поток пассажирских поездов с потоком грузов.

Обозначим величину транспортного потока через  $N$  и запишем принцип аддитивности транспортного потока:

$$N_1 + N_2 + N_3 + \dots + N_n = \sum_{i=1}^n N_i; i=1, 2, \dots, n, \quad (6.1)$$

где  $n$  — число транспортных потоков.

Многотерминальные потоки можно привести к одотерминальным, если «объединить» многие пункты отправления и соответственные назначения (укрупненные пункты отправления и назначения), предполагая, что суммарный поток начинается в укрупненном пункте отправления и заканчивается в укрупненном пункте назначения.

Существует ряд задач, в которых изучают параметры потока грузовых поездов при известном числе пассажирских поездов или параметры потока местных поездов при известном числе пассажирских и других грузовых поездов, либо параметры потока поездов со скоростными грузами («холодных» поездов) при неизменных условиях пропуска остальных категорий поездов и т.д. Поток поездов в этих случаях является многотерминальным, многопродуктивным. Он представляет собой композицию многих более простых потоков и имеет особенности, связанные с большой массой и скоростью транспортных единиц, особенностями регулирования, пропуска, возникновения и погашения поездопотоков на станциях и в узлах. Знание его распределения и параметров необходимо при расчетах мощности, обосновании технологии и управления работой транспортных систем.

В общем виде в качестве нагрузки рассматривают транспортный поток — поток поездов, вагонов, грузов в зависимости от того, какую систему станции и какой вид станции рассматривают. Анализ потока поездов можно осуществлять по принципу «поток — время» и «поток — расстояние». Временные и пространственные показатели имеют важное значение. Они взаимосвязаны между собой. Временные показатели потока — интервалы — оказывают прямое воздействие на станционные системы и определяют режимы движения поездов на подходах и выходах станций. Эти режимы влияют на скорость продвижения потока. О мощности потока можно судить лишь в том случае, если известны величина транспортного потока и отрезок времени, в течение которого поток пропущен. Под интенсивностью потока поездов понимают число поездов, пропущенных в единицу времени. Можно рассматривать интенсивности потока за тот или иной отрезок времени как фактически реализованные или интенсивности как прогнозируемые величины. Так, часовой темп поступления поездов может характеризоваться такой последовательностью чисел: 5, 3, 0, 4, 6, 6, 4, 0, 2, 1, 3, 4. Это значит, что в течение 12 ч поезда на станцию поступали с часовым темпом 5, 3, 0, 4 и т.д. Интенсивность оказывает решающее влияние на технологию и управление станцией, использование ее мощностей, эксплуатационную надежность.

Если обозначить поток за период времени  $t$  как  $N(t)$ , то средняя интенсивность потока в принятую единицу времени (час, сутки)

$$r(t) = \frac{N(t)}{t}. \quad (6.2)$$

Поскольку интенсивность потока — величина переменная, изменяющаяся под воздействием множества факторов, необходимо знать распределение интенсивностей при известной средней интенсивности  $r(t)$  или известном математическом ожидании  $M(t)$ .

Транспортный поток однозначно определен, если известны  $r(t)$  или  $M(t)$ , а также вид распределения (закон распределения) интенсивностей и характеристики этого закона. Интенсивность — это величина потока, поступающего в единицу времени  $T$ . В качестве единицы времени можно принимать временные отрезки 0,25; 0,5; 0,75; 1,0 ч или 2; 3; 4 ч, либо большие по длительности отрезки времени. Причем существуют такие периоды времени  $T$ , в течение которых станционные системы будут в наибольшей степени заполнены поездами.

Закон распределения одного и того же транспортного потока (потока поездов, местных передач и любого другого потока) видоизменяется с изменением величины отсчета  $T$ . Чем меньше единица времени  $T$ , тем больше «левая» асимметрия распределения. С увеличением единицы отсчета распределение «выравнивается», приближаясь с увеличением  $T$  к нормальному. Это очень важное свойство интенсивности транспортных потоков.

Пространственной характеристикой потока является его плотность — число транспортных единиц (поездов), приходящееся на единицу длины линии. На участке на каждый момент времени  $t_i$  будет находиться  $N_i$  поездов. Тогда плотность потока на момент  $t_i$

$$\lambda(t_i) = \frac{N_i(t_i)}{l}; \quad i=1, 2, \dots, n, \quad (6.3)$$

где  $l$  — длина участка.

Поскольку на каждый момент времени  $t_i$  поезда на участке распределены неравномерно, можно рассчитать среднюю плотность на некотором временном интервале:

$$\bar{\lambda}(t_i) = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda(t_i)}{n}. \quad (6.4)$$

Увеличение плотности потока поездов до некоторого уровня приводит к неудовлетворительным режимам движения, снижению скорости продвижения потока, задержкам приема поездов. При возникновении отказов из-за чрезмерно высокой плотности потока в течение интервалов времени  $t_{отк j}$  реализуемая пропускная способность равна нулю, и чем больше таких отрезков времени, тем ниже общая реализуемая пропускная способность.

## 6.2. Трансформация потока в станционных системах и подсистемах

Поток поездов, накапливаемых и формируемых на станции составов, групп вагонов, предназначенных для передачи в районы грузовой работы, можно однозначно определить (задать) двумя способами: распределением интенсивности потока, т. е. распределением числа событий, происходящих в интервале времени  $T$  произвольной длины (этот интервал времени при статистическом исследовании потоков поездов изменялся в широком диапазоне), и распределением длительности интервалов между событиями — прибытием поездов, их расформированием, накоплением, формированием и т. д. Обычно используют оба способа задания потока с алгоритмизированной программной машинной системой обработки статистических наблюдений и аппроксимацией теоретическими законами [20]. При первом способе поток поездов, составов, групп вагонов как транспортный поток характеризуют набором функций распределения в отрезках времени  $T_i$ .

Поток поездов, таким образом, однозначно определяет распределение интенсивности  $r(t_i)$ . Обозначим интенсивность в периоде  $T_i$  через  $r_i$ , а среднюю величину потока в периоде  $T_i$  как  $rT_i$ , где  $r$  — средняя часовая интенсивность потока ( $N_c : 24$ ). Кроме того, потоки поездов (составов) характеризуют также дисперсией  $D(rT_i)$  или, при задании потока, распределением интервалов между поездами  $D(I)$ , средним квадратичным отклонением  $\sigma$ , коэффициентами вариации  $v = \frac{\sigma}{rT}$ , асимметрии, эксцесса и другими параметрами распределения. Если исследуют поток на железнодорожном участке, то в число характеристик включают также плотность потока  $\lambda(t)$ .

Изменение параметров потока под воздействием таких операций (фаз обслуживания), как прием поездов на станции, их обработка, расформирование, образование новых составов (в сортировочном парке), окончание формирования, подготовка к отправлению, отправление, будем называть его трансформацией. Если поток прошел через  $k$  фаз, то с ним произошла  $k$ -кратная трансформация. Обозначим число трансформаций индексом  $j$ . Трансформация потока может приводить к существенным изменениям его параметров. Если для исходного потока принять  $j=0$  и обозначить трансформацию на фазе его обработки, то последовательность видоизменений параметров потока можно записать в виде

$$N_0 = N_0 \{(rT_i)_0, D_0(rT_i), \sigma_0, v_0, \dots\} \rightarrow N_1 \{(rT_i)_1, D_1(rT_i), \sigma_1, v_1, \dots\} \rightarrow N_2 \{(rT_i)_2, D_2(rT_i), \sigma_2, v_2, \dots\} \rightarrow \dots \rightarrow N_k \{(rT_i)_k, D_k(rT_i), \sigma_k, v_k, \dots\}. \quad (6.5)$$

Параметры потока под воздействием трансформаций, отказов и при приеме и пропуске могут быть существенно отличны от параметров исходного потока. Воздействие фаз обработки снижает или

повышает его неравномерность, и эти воздействия на различных фазах могут быть взаимно компенсированы, погашены или, наоборот, усилены. Поэтому при расчете устройств обработки потока (парков, горловин, сортировочных устройств, обосновании числа бригад ПТО и т. д.) необходимо знать именно те параметры, которые сложатся на входе соответствующей фазы обработки.

### 6.3. Законы распределения транспортного потока и основные параметры

Закон распределения устанавливают двумя способами: на основе известных сведений об изучаемом процессе выявляют и исследуют его характерные особенности и изучают степень их влияния на процесс и друг на друга или собирают и обрабатывают статистические данные, устанавливают примерный вид кривой статистического распределения, а затем подбирают несколько теоретических законов, имеющих подобные кривые плотностей вероятностей, из которых на основе критериев согласия выбирают распределение, наилучшим образом сглаживающее статистический ряд. Второй, эмпирический способ более трудоемок, но широко распространен в математической статистике, так как в большинстве случаев трудно выявить основные закономерности исследуемого явления и их взаимосвязь. В полной мере это относится и к транспортным потокам, имеющим сложную структуру и большое число взаимодействующих факторов.

Для аппроксимации числа транспортных единиц в единицу времени обычно используют биномиальный, нормальный и пуассоновский законы. Для сглаживания распределения интервалов между транспортными единицами применяют распределение Эрланга, в том числе обобщенное или сумму показательных, гамма-распределение, несколько реже экспоненциальное и геометрическое распределения. Математические выражения этих законов, а также их основных параметров распределения представлены в табл. 6.1, где приняты следующие обозначения:  $r$  — среднечасовая интенсивность потока поездов (составов);  $x$  — расчетное число поездов (составов) за время  $T$ ;  $\sigma$  — среднее квадратичное отклонение;  $W_T$  — максимально возможный поток поездов за время  $T$  (пропускная способность);  $I_{\min}$  — минимальный интервал между поездами по условию технической вооруженности участка;  $t$  — расчетное значение интервала между поездами;  $m$  — величина переменной — интервал  $t$ , выраженной в числе минимальных интервалов;  $k$  — параметр Эрланга;  $\alpha, \beta$  — параметры гамма-распределения;  $\Gamma(\alpha)$  — гамма-функция от  $\alpha$ .

Нормальный закон наиболее распространен в природе и различных областях человеческой деятельности. Ему подчиняются случайные величины, представляющие собой сумму большого числа независимых или слабо зависимых, также случайных величин. Дисперсии их малы по сравнению с дисперсией всей совокупности.

Виды распределений

| Закон распределения                                        | Дифференциальная форма                                         | Интегральная форма                                                                | Числовые                        |                                     |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
|                                                            |                                                                |                                                                                   | Математическое ожидание $M$     | Дисперсия $D = \sigma^2$            |
| Нормальный (Гаусса)                                        | $\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-rT)^2}{2\sigma^2}}$ | $\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-rT)^2}{2\sigma^2}}$   | $rT$                            | $\sigma^2$                          |
| Биномиальный (Бернулли)                                    | $\binom{W_T}{x} p^x q^{W_T-x}$                                 | $\sum_{i=0}^x \binom{W_T}{i} p^i q^{W_T-i}$                                       | $rT$                            | $rTq$                               |
| Пуассона                                                   | $\frac{(rT)^x}{x!} e^{-rT}$                                    | $e^{-rT} \sum_{i=0}^x \frac{(rT)^i}{i!}$                                          | $rT$                            | $rT$                                |
| Экспоненциальный (показательный)                           | $ie^{-rt}$                                                     | $1 - e^{-rT}$                                                                     | $\frac{1}{r}$                   | $\frac{1}{r^2}$                     |
| Геометрический (Ферри)                                     | $pq^{m-1}$                                                     | $1 - q^m$                                                                         | $\frac{1}{r}$                   | $\frac{q}{r^2}$                     |
| Эрланга                                                    | $\frac{(r, k)^k}{(k-1)!} t^{k-1} e^{-krt}$                     | $1 - e^{-krt} \left[ 1 + \sum_{i=1}^{k-1} \frac{(krt)^i}{i!} \right]$             | $\frac{1}{r}$                   | $\frac{1}{kr^2}$                    |
| Обобщенный Эрланга 1-го порядка (сумма двух показательных) | $\frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1} \times (e^{-r_1 t} - e^{-r_2 t})$   | $1 - \frac{r_2 e^{-r_2 t} - e^{-r_1 t}}{r_2 - r_1}$                               | $\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}$ | $\frac{1}{r_1^2} + \frac{1}{r_2^2}$ |
| Гамма-распределение                                        | $\frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} e^{\beta t} t^{\alpha-1}$ | $\frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t \times e^{\beta t} t^{\alpha-1} dt$ | $\frac{\alpha}{\beta}$          | $\frac{\alpha}{\beta^2}$            |

Примечание. ЗР — закон распределения.

Таблица 6.1

## транспортных потоков

| характеристики                |                                                                 |                                                     |                                                           |                                                             | Примечания                                                                                                                                                                                                                            |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Третий<br>центральный $\mu_3$ | Четвертый<br>центральный<br>момент $\mu_4$                      | Коэффициент<br>вариации<br>$r = \frac{\sigma}{\mu}$ | Коэффициент<br>асимметрии<br>$A = \frac{\mu_3}{\sigma^3}$ | Коэффициент<br>эксцесса<br>$E = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3$ |                                                                                                                                                                                                                                       |
| 0                             | $3\sigma^4$                                                     | $\sigma/rT$                                         | 0                                                         | 0                                                           | Предельный случай ЗР(2)<br>при $W \rightarrow \infty$<br>Предельный случай ЗР(3)<br>при $r \rightarrow \infty$<br>Предельный случай ЗР(6)<br>при $k \rightarrow \infty$<br>Предельный случай ЗР(8)<br>при $\alpha \rightarrow \infty$ |
| $rTq(q-p)$                    | $\frac{rTq(1-3rTq-6pq)}{rTq(1-3rTq-6pq)}$                       | $\sqrt{\frac{q}{rT}}$                               | $\frac{1-2p}{\sigma}$                                     | $\frac{1-2p}{\sigma} - \frac{6}{W_T}$                       | $p = \frac{rT}{W_T}$ ; $q = 1-p$                                                                                                                                                                                                      |
| $rT$                          | $rT(3rT+1)$                                                     | $\frac{1}{\sqrt{rT}}$                               | $\frac{1}{\sqrt{rT}}$                                     | $\frac{1}{\sqrt{rT}}$                                       | Предельный случай ЗР(2)<br>при $p \rightarrow 0$ , $W_T \rightarrow \infty$                                                                                                                                                           |
| $\frac{2}{r^3}$               | $\frac{9}{r^4}$                                                 | 1                                                   | 2                                                         | 6                                                           | Предельный случай ЗР(5)<br>при $p=r=0$<br>Частный случай ЗР(6)<br>при $k=1$<br>Частный случай ЗР(8)<br>при $\alpha=0$ ; $\beta=r$                                                                                                     |
| $\frac{(1+q)q}{r^3}$          | $\frac{q(9q+p^2)}{r^4}$                                         | $\sqrt{q}$                                          | $\frac{1+q}{\sqrt{q}}$                                    | $6 + \frac{p^2}{q}$                                         | $m = \frac{t}{I_{\min}}$ ; $p = rI_{\min}$ ;<br>$q = 1-p$                                                                                                                                                                             |
| $\frac{2}{k^2 r^3}$           | $\frac{3(k+2)}{k^3 r^4}$                                        | $\frac{1}{\sqrt{k}}$                                | $\frac{2}{\sqrt{k}}$                                      | $\frac{6}{k}$                                               | Частный случай ЗР(8)<br>при $\alpha=k$ ; $\beta=rk$                                                                                                                                                                                   |
| —                             | —                                                               | $\frac{\sqrt{r_1^2+r_2^2}}{r_1+r_2}$                | —                                                         | —                                                           | Смесь двух ЗР(4)<br>$r_{1,2} = \frac{1 \pm \sqrt{2\sigma^2-1}}{1-\sigma^2} r$                                                                                                                                                         |
| $\frac{2\alpha}{\beta^3}$     | $\frac{3(\alpha+1)}{\beta^4} \times \frac{(\alpha+3)}{\beta^4}$ | $\frac{1}{\sqrt{\alpha}}$                           | $\frac{2}{\sqrt{\alpha}}$                                 | $\frac{6}{\alpha}$                                          | —                                                                                                                                                                                                                                     |

Нормальный закон является предельным для целого ряда других законов теории вероятностей.

С помощью биномиального закона распределения решают многие практические задачи. В его выражение входят два независимых параметра — число испытаний  $W_T$  и  $P$  — вероятность появления события при одном испытании. При использовании этого закона для аппроксимации транспортных потоков можно учитывать последствие, возникающее вследствие необходимости разграничивать транспортные единицы расстоянием и временем. При определенных условиях, указанных в табл. 6.1, биномиальный закон сводится к нормальному или пуассоновскому распределению.

Законом Пуассона характеризуют так называемые простейшие потоки, обладающие стационарностью, ординарностью и отсутствием последствия. Иногда его называют законом редких явлений. Он получил широкое распространение в математической статистике и особенно в теории массового обслуживания, имеет простое математическое выражение, в которое входит один параметр — математическое ожидание, дает хорошую сходимость между теоретическими и статистическими распределениями темпа движения поездов в малые периоды времени.

С пуассоновским тесно связан экспоненциальный закон: если число требований в единицу времени характеризует закон Пуассона, то распределение интервалов между транспортными единицами в простейшем потоке распределено по экспоненциальному закону.

Аналогичную связь можно установить между геометрическим и биномиальным распределениями. Однако при этом промежуток времени между требованиями измеряют целочисленным количеством минимальных интервалов. Как известно, в транспортных потоках распределение величины интервала является непрерывным. Поэтому применение геометрического распределения в качестве аппроксимирующего может быть допущено лишь при определенной степени условности. Геометрическое распределение неустойчиво, и поэтому его не используют для сглаживания потоков поездов с двух и более участков.

Одним из основных законов теории массового обслуживания является закон Эрланга. Применяют его для потоков с ограниченным последствием, характеризуют двумя параметрами: средней интенсивностью потока в единицу времени  $r$  и целочисленным коэффициентом Эрланга  $k$ . Кривая распределения вероятностей по форме близка к статистической, что и обусловило применение этого закона в качестве аппроксимирующего для интервалов между поездами. Обобщенный закон Эрланга по сравнению с предыдущим имеет более широкий спектр кривых, что позволяет повысить степень сглаживания статистических данных. Наиболее часто применяют обобщенный закон Эрланга 1-го порядка (сумма двух показательных). Аналогичными качествами обладает и гамма-распределение, вследствие чего его также часто применяют для аппроксимации транспортных потоков.

# ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПАРКОВ СОРТИРОВОЧНЫХ, УЧАСТКОВЫХ, ПАССАЖИРСКИХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И ДРУГИХ СТАНЦИЙ

## 7.1. Формализация процессов в подсистемах станций

Между станциями, участками, депо, подъездными путями и другими звеньями перевозочного конвейера существуют постоянно реализуемые взаимосвязи. По железным дорогам постоянно, непрерывно во времени следуют локомотивы и поезда. Это постоянно меняет состояние технологических систем и подсистем. Отсюда и сложность технологии и управления этими системами и подсистемами: затруднения, задержки в работе одних систем вызывают соответствующие изменения в других системах.

В работе станций также существуют постоянные технологические и информационные взаимосвязи между элементами: входными и выходными участками, парками, сортировочными устройствами. Формализовать работу различных категорий станций и их технологических линий по транзитным, перерабатываемым и местным вагонопотокам, а также технологию каждого элемента необходимо с учетом функциональных связей между ними, обоснованного размещения этих элементов на линии, в системе и подсистеме.

Станция как технологическая система состоит из нескольких регулярно взаимодействующих элементов: входных участков ВхУ, парков прибытия, подгорочных, сортировочных, транзитных, отправления, сортировочных устройств и горок Г, вытяжных путей, выходных участков ВыхУ и др. Все они объединены во взаимосвязанные подсистемы, которые имеют четкие функции. В свою очередь каждую подсистему можно разделить на функциональные элементы: бригады и группы ПТО и ЦТК, обрабатывающие поезда и документы по прибытии, горочные локомотивы, локомотивы вытяжных путей формирования, бригады и группы ПТО и ЦТК, обрабатывающие поезда, вагоны и документы по отправлению. Структура этих систем и подсистем, их технология наряду с отличительными особенностями имеет много общих признаков.

Между подсистемами станции и их элементами существуют функциональные связи, которые разделяют на прямые и обратные. Функционально они взаимосвязаны, но не идентичны с прямыми и обратными связями между системой и управлением. Прямые связи проявляются в том, что воздействие предыдущих элементов (подсистем) изменяет состояния последующих (передача требований — заявок от одного обслуживающего элемента к другому). Обратные связи приводят к изменению состояния предыдущих элементов (подсистем) под воздействием последующих. Они являются результатом отказа в работе последующих элементов и подсистем (рис. 7.1).

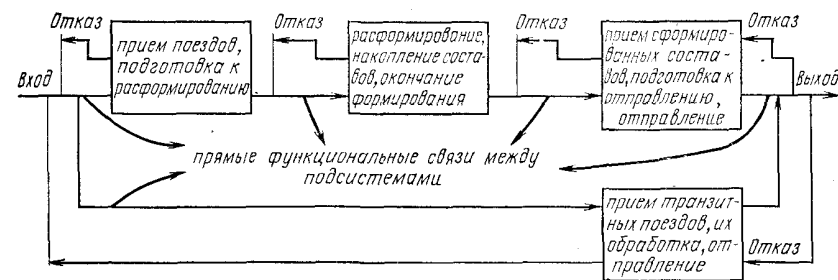


Рис. 7.1. Прямые и обратные связи между подсистемами

Как правило, действие обратной связи вызывает задержку выполнения технологических операций, возрастание простоев вагонов, составов, поездов, нарушение поточности выполнения технологического процесса. Обратные связи — следствие недостатка пропускной и перерабатывающей способности отдельных элементов, некомплексного их развития, а также результат ошибок в оперативном планировании и управлении. Чем реже и меньше по времени проявление обратных связей, тем выше эксплуатационная надежность как отдельных подсистем, так и всей системы в целом.

Станция, таким образом, представляет собой комплекс нескольких технологических линий, значительного числа взаимодействующих систем, подсистем и их элементов, объединенных в одно целое множеством функциональных технологических прямых и обратных связей, возникающих при реализации технологического (производственного) процесса. Эти связи в свою очередь обуславливают значительное число информационных потоков между управляемым процессом в системах станции и управляемыми системами и подсистемами.

Представление станции в виде композиции взаимодействующих элементов — бригад ПТО и ЦТК, парков, каналов, горки, вытяжных путей и других обслуживающих каналов — позволяет создать модель работы на основе типовых операторов. При этом каждое требование предыдущего канала (будем называть это требование сигналом) является входным для последующего<sup>1</sup>. Это полностью учитывает прямые и обратные связи между обслуживающими каналами.

Всякий обслуживающий канал станции можно рассматривать как унифицированный элемент — агрегат. Он характеризуется в каждый момент времени  $T$  входным  $X$  и выходным  $U$  сигналами и состоянием  $Z$ . Формальное описание агрегата рассматривается в теории сложных систем [10].

<sup>1</sup> Входной сигнал агрегата — поступающие на обработку поезда, составы, подачи вагонов и др. — в зависимости от типа станции; выходной — обработанные поезда, составы, передачи, группы вагонов и др.

Состояние агрегата в момент  $t \in T$  обозначают как  $Z(t) \in Z$ , а входные и выходные сигналы в этом случае можно записать в виде  $X(t) \in X$ ,  $U(t) \in U$ . Аналогично можно записать состояние агрегата в момент  $t + 0$  как  $Z(t + 0)$ . Переход агрегата из состояния  $Z(t_1)$  в состояние  $Z(t_2)$  при условии, что  $t_2 > t_1$ , определяет динамические свойства самого агрегата и входные сигналы.

Допустим, что поведение агрегата в случае воздействия входного сигнала  $X_n$  описывают оператором  $V$ . Тогда состояние  $Z(t_n + 0)$ , где  $t_n$  — момент времени поступления в агрегат входного сигнала  $X_n$ , определяют из выражения

$$Z(t_n + 0) = V[t_n, Z(t_n), X_n]. \quad (7.1)$$

Это — общее описание системы с входом и выходом и исходное условие реализации оператора  $V$ .

Если в интервале  $t_n, t_n + 1$  не поступило ни одного сигнала, то состояние агрегата в момент времени  $t \in (t_n, t_n + 1)$  можно записать в виде

$$Z(t) = U[t_n, Z(t_n + 0), t]. \quad (7.2)$$

Совокупность операторов  $V$  и  $U$  рассматривают как оператор перехода агрегатов в новое состояние.

Обозначим через  $t^*$  момент выдачи агрегатом выходного сигнала  $Y$ . Тогда механизм получения этого выходного сигнала определяется оператором выходов:

$$Y = G[t^*, Z(t^*)]. \quad (7.3)$$

Совокупность множеств моментов времени  $T$ , сигналов и состояний  $Z$  и  $Z^{(U)}$ , операторов  $V$ ,  $U$ ,  $G$  полностью задает агрегат как динамическую систему. С помощью этих операторов можно описать работу любой станции.

Рассмотрим изменение состояния агрегата при воздействии на него входных сигналов. При взаимодействии двух агрегатов  $A_n$  — входных участков и  $A_s$  — парка приема, бригад ПТО и горки выходной сигнал одного из них является входным для другого [ $Y_{A_n}(t) = x_{A_s}(t)$ ]. В систему  $S_i$  поступают заявки на обслуживание (прием поездов), которые в момент  $t_{j-1} \in T$  образуют поток однородных событий. Заявку, поступившую в момент  $t_{j-1}$ , характеризует случайный параметр  $a_j$ . Если канал обслуживания заявки свободен, то заявка принимается к обслуживанию. В противном случае она направляется в очередь (заявка поступает в очередь при неприеме поездов и задержках их на подходе).

При свободности канала обслуживания агрегата  $n(t) = 0$ . Время, оставшееся до окончания обслуживания заявки, находящейся на обслуживании,  $z_1(t) = 0$ . В том случае, когда заявки находятся на обслуживании или в очереди, а также при наличии отказа в приеме на обслуживание [ $n(t) > 1$ ] требуются дополнительные координаты состояния системы  $z_{1+2k}(t)$  при  $k = 1, 2, 3, \dots$ , где  $k$  — номер заявки в очереди. Время ожидания заявки —  $n_{1+2k}(t)$ .

В момент  $t_j$  поступает новая заявка. Если агрегат дает отказ в приеме на обслуживание [ $n(t) > 0$ ], то заявка поступает в очередь. При этом  $z_1(t)$  не изменяется, а  $n(t)$  увеличивается на единицу. Так формализуют и однозначно определяют на каждый момент времени  $t$  состояние каналов, систем и подсистем станций. Это позволяет исследовать критические состояния систем и подсистем станций.

## 7.2. Изменение состояний парков станций во времени. Уравнение баланса работы подсистем и станций

Работа станций и выполнение ими установленных заданий во многом зависят от изменения состояний их парков во времени. Состояние станции на момент времени  $t$  — число составов и вагонов в парках на этот момент времени. Динамика поведения системы во времени дает возможность точно констатировать время выхода обслуженной заявки и заранее включить ее в работу последующих систем, зная их поведение на такое воздействие. Однако при нескольких технологических элементах в подсистемах и системе в целом, а также при многих каналах обслуживания в каждом элементе для определения состояния недостаточно знать только время наступления событий: требуются также количественные характеристики выполнения работ. Изменения внутреннего состояния станции как системы можно прогнозировать и планировать на последующие моменты времени. В самом общем виде уравнения состояния системы можно записать в форме:

$$\begin{cases} \bar{z} = \bar{f}(z, x, t); \\ \bar{y} = \bar{g}(z, x, t), \end{cases} \quad (7.4)$$

где  $\bar{z} = z(t)$  — вектор состояния системы, представляющей матрицу-столбец порядка  $n \times t$ ;  $\bar{x} = x(t)$  — вектор управления, состоящий из входных переменных (представляет матрицу-столбец порядка  $\gamma \times 1$ );  $t$  — время, ограничиваемое периодом планирования.

При этом векторы-столбцы  $\bar{f}$  и  $\bar{g}$  выражают нелинейные зависимости и, следовательно, выходной вектор  $\bar{y}(t)$  совпадает с вектором управляемых переменных. Вектор состояния, выраженный совместной системой дифференциальных уравнений, будет иметь вид

$$\bar{z}_i = \bar{f}_i(\bar{z}_1, \dots, \bar{z}_n; x_1, \dots, x_n; t), i = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (7.5)$$

Для станции в отрезке времени  $t, t_k$  процесс изменения состояния системы может быть описан выражением

$$z(t) = z_1(t_1), z_2(t_2), z_3(t_3), \dots, z_i(t_i), z_k(t_k), \quad (7.6)$$

где  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_i, t_k$  — фиксированные значения времени изменения состояний системы и перехода в одно из последующих состояний  $z_1, z_2, \dots, z_i, z_k$ ;  $z_k(t_k)$  — состояние системы на конечный момент периода  $T = \sum_{i=1}^k t_i$ .



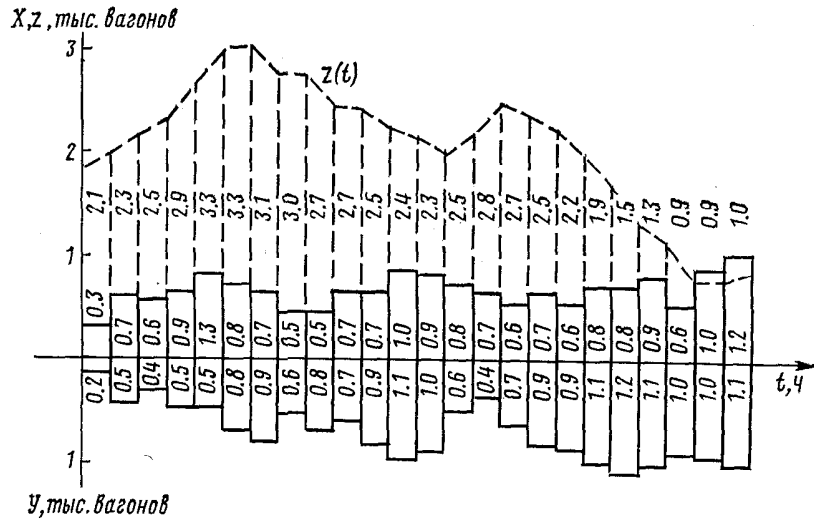


Рис. 7.2. Графическая интерпретация решения уравнения баланса работы станции

вые 2 ч прибыло 1000, а убыло 700 вагонов, рабочий парк станции возрос до 2300 вагонов, за последующие 2 ч состояние системы изменилось, рабочий парк составил 2900 вагонов, а в конце суточного периода — 1000 вагонов. Практически за данные сутки рабочий парк станции не превысил уровня 3300 вагонов, являющегося критическим по обеспечению надежности ее работы. Следует отметить, что для станционных систем необходимо определять конкретные значения  $z(t)$ ,  $x(t)$ ,  $y(t)$  для каждой из подсистем на каждый принятый к расчету период  $T_i$ .

Аналогично определяют состояния пассажирских, технических, грузовых и других станций, грузовых дворов, контейнерных терминалов, подъездных путей и др. Значения модулей могут быть заданы, нормированы, определены аналитически или установлены имитационным моделированием.

### 7.3. Максимальное насыщение транспортной системы

Ранее в общем виде были определены состояния транспортных систем с входом и выходом. В единицах транспортного потока (поездах, составах, вагонах и т. д.) в зависимости от интенсивности подвода и вывода (обслуживания)  $z(t)$  они изменяются во времени (рис. 7.3), причем  $z(t) \geq 0$ .

Рассмотрим временной интервал работы системы  $t_0, t_K$ , равный  $T_K$ , заданный точками  $t_0, t_1, t_2, \dots, t_K$ . Пусть  $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$  — длина интервала, в течение которого состояние системы изменяется

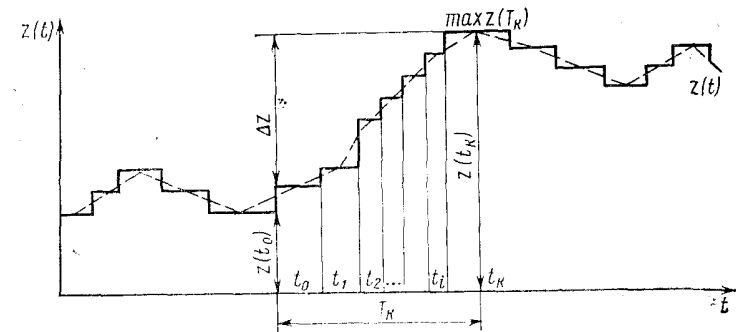


Рис. 7.3. Процесс заполнения транспортной системы — состояние  $z(t)$

( $\Delta t_i \geq 0$ ). Изменение состояния системы происходит за счет входного или выходного модуля, причем  $\sum_{i=1}^K \Delta t_i = (t_0, t_K) = T_K$ , а средний интервал поступления транспортных единиц

$$\bar{T}(\Delta t_i) = \frac{\Delta t_i}{N(\Delta t_i)}. \quad (7.18)$$

И наоборот, интенсивность поступления транспортных единиц в систему

$$r_i(\Delta t_i) = N(\Delta t_i) = \frac{1}{\bar{T}(\Delta t_i)}; \quad (7.19)$$

интенсивность работы агрегата по обслуживанию

$$\mu_i(\Delta t_i) = \frac{1}{\tau(\Delta t_i)}, \quad (7.20)$$

а коэффициент загрузки агрегата

$$\rho_i(\Delta t_i) = \frac{\bar{\tau}_i}{\bar{T}_i} = \frac{r_i}{\mu_i}, \quad (7.21)$$

где  $\bar{\tau}_i$  — средний интервал времени обслуживания на промежутке  $\Delta t_i$ .

Функционирование агрегата (транспортной подсистемы или системы) на отрезке времени  $(t_0, t_K) = T$  определяют значения:

$$\begin{matrix} \Delta t_0 & \Delta t_1 & \Delta t_2 & \dots & \Delta t_K \\ r_0 & r_1 & r_2 & \dots & r_K. \end{matrix}$$

На этом отрезке времени будет изменяться загрузка системы  $\rho_i$  и величина простоя транспортных единиц в системе  $\delta$ , т. е.

$$\begin{matrix} \rho_0 & \rho_1 & \rho_2 & \dots & \rho_K \\ \delta_0 & \delta_1 & \delta_2 & \dots & \delta_K. \end{matrix}$$

Выражая состояние системы  $z(t)$  в виде транспортных единиц, получаем

$$z(\Delta t_i) = z(\Delta t_{i-1}) + \frac{\Delta t_i}{\bar{T}_i} - \frac{\Delta t_i}{\tau} = z(\Delta t_{i-1}) + (\rho_i - 1) \Delta t_i \mu_i = \\ = z(\Delta t_{i-1}) + \Delta t_i (\lambda_i - \mu_i). \quad (7.22)$$

Состояние системы на отрезке  $t_0, t_K$  будут характеризовать последовательности

$$\begin{matrix} z_0 & z_1 & z_2 & \dots & z_K \\ \delta_0 & \delta_1 & \delta_2 & \dots & \delta_K. \end{matrix}$$

Для определения надежности системы по степени заполнения, а также для расчета ее емкости необходимо знать так называемое максимальное состояние  $z(t)$ , т. е.  $\max z(t)$ , при котором будет наибольшим приращение простоя транспортных единиц  $\max \sum \delta(t)$  и, следовательно, потребуется максимальная емкость для станций — наибольшее число путей в парках, т. е.  $\max \Pi(t)$ . Период, в течение которого происходит максимальное насыщение системы, будем называть критическим периодом  $t_0, t_K = T_K$ . Этот период показан на рис. 7.3.

Насыщение системы происходит в периоде продолжительности  $T_K$ , в течение которого коэффициент загрузки обслуживающих агрегатов  $\rho_K > 1$ . Это соответствует такому состоянию, когда модуль ввода больше модуля вывода:

$$\sum_{i=1}^K x(\Delta t_i) > \sum_{i=1}^K y(\Delta t_i), \quad i=1, 2, \dots, K.$$

Таким образом, в периоде продолжительностью  $T_K$  происходит заполнение системы (в общем виде необязательно транспортной), причем если в течение некоторого достаточно большого времени работы системы  $T$  коэффициент загрузки  $\rho \ll 1$ , то и период насыщения системы  $T_K \ll T$ . С увеличением  $\rho$  возрастает и период  $T_K$ . При приближении  $\rho$  к 1 период  $T_K$  приближается к  $T$ , а при  $\rho = 1$  в среднем за время  $T$  период  $T_K = \infty$ , что свидетельствует о неработоспособности системы.

К концу периода насыщения системы требуется ее наибольшая емкость, а для транспортных железнодорожных систем — наибольшее число путей в парках, наибольшие площади складов и т. д. Образуются и наибольшие простои подвижного состава, а сама система находится в критическом состоянии  $\max z(T_K)$ . Если имеющаяся емкость системы меньше  $\max z(T_K)$ , то часть входных модулей (транспортных единиц) находится в очереди, т. е. в состоянии отказа по емкости системы.

Рассмотрим состояние максимального насыщения системы более подробно. Один и тот же транспортный поток (входной модуль, нагрузка на транспортную систему) в разные периоды времени  $T_i$

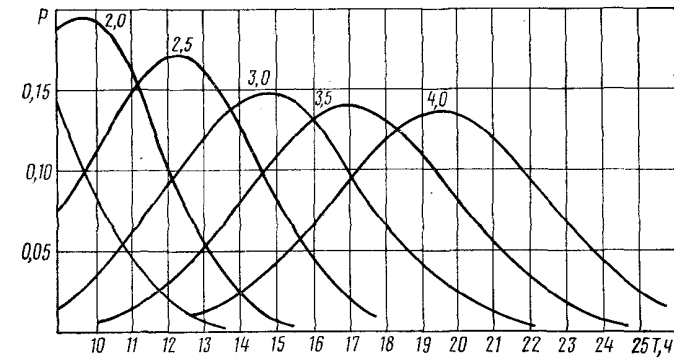


Рис. 7.4. Плотность распределения потока поездов на входе станции

( $T_0 < T_1 < T_2 < \dots < T_i$ ) имеет разные параметры плотности распределения. На рис. 7.4 приведены кривые плотности распределения потока на входе станции в различные периоды. С изменением продолжительности периода меняются и основные параметры потока (математическое ожидание, дисперсия, среднее квадратичное отклонение, коэффициент вариации и др.), так как все они зависят от времени.

Насыщение системы происходит, когда модуль на входе  $x(T_i)$  больше модуля на выходе  $y(T_i)$  за период работы  $t_0, t_K$ , т. е. когда  $\sum_{i=1}^K \Delta t = T_i$ .

Модуль на входе системы в соответствии с уравнением баланса (7.22) составит

$$x(T_i) = \frac{\sum_{i=1}^K \Delta t_i}{\bar{T}_i} = \frac{T_i}{\bar{T}_i} = T_i \bar{r}_i. \quad (7.23)$$

Модуль  $x(T_i)$  представляет собой величину (нагрузку на систему) транспортного потока при условии его сгущенного поступления

$$x'(T_i) = M(T_i) + \beta \sigma(T_i), \quad (7.24)$$

где  $\beta$  — число средних квадратичных отклонений, принятое к расчету в соответствии с плотностью распределения транспортного потока в периоде  $T_i$ .

Вероятность нагрузки на систему в расчетном периоде  $T_i$

$$\left. \begin{aligned} x(T_i) &\leq M(T_i) + \beta \sigma(T_i), \\ P\{x(T_i) \leq M(T_i) + \beta \sigma(T_i)\} &= \int_0^{M(T_i) + \beta \sigma(T_i)} f(x) dx, \end{aligned} \right\} \quad (7.25)$$

а вероятность того, что нагрузка превысит величину  $M(T_i) + \beta\sigma$ ,

$$Q\{x(T_i) > M(T_i) + \beta\sigma\} = 1 - \int_0^{M(T_i) + \beta\sigma(T_i)} f(x) dx. \quad (7.26)$$

Если емкость системы (для парков станций — число путей  $\Pi$ )  $\Pi = z(t_k) = z_0(t_0) + M(T_i) + \beta\sigma(T_i)$ , то  $Q\{x(T_i) > M(T_i) + \beta\sigma(T_i)\}$  представляет собой суммарную вероятность отказа системы по емкости, т. е. по числу путей. Выражение (7.24), таким образом, определяет входной модуль системы, ее расчетную нагрузку.

Выходной модуль системы, зависящий от общей интенсивности обслуживания, когда  $\sum_{i=1}^k \Delta t_i = T_i$ ,

$$y(T_i) = \frac{\sum_{i=1}^k \Delta t_i}{\bar{\tau}_i} = \frac{T_i}{\bar{\tau}_i} = T_i \bar{\mu}_i. \quad (7.27)$$

При насыщении система работает не в стационарном режиме, когда  $y(T_i) < x(T_i)$ .

Для этого режима запишем уравнение баланса

$$z(T_i) = z(t_0) + x(T_i) - y(T_i) = z(t_0) + M(T_i) + \beta\sigma(T_i) - \bar{\mu}T_i.$$

Учитывая, что  $M(T_i) = \bar{r}T_i$ , где  $\bar{r}$  — часовая интенсивность транспортного потока, получим уравнение баланса работы транспортной системы в режиме заполнения

$$z(T_i) = z(t_0) + (\bar{r} - \bar{\mu})T_i + \beta\sigma(T_i). \quad (7.28)$$

Для любого  $T_i$   $z(t_0) = \text{const}$ . Тогда состояние системы в режиме заполнения характеризуется суммой двух функций, одна из которых — уравнение прямой  $z(t_0) + (\bar{r} - \bar{\mu})T_i$ , где  $T_i$  — независимая переменная, и вторая  $\beta\sigma(T_i)$  — представляет собой функцию параболического типа. Эта сумма имеет максимум (рис. 7.5).

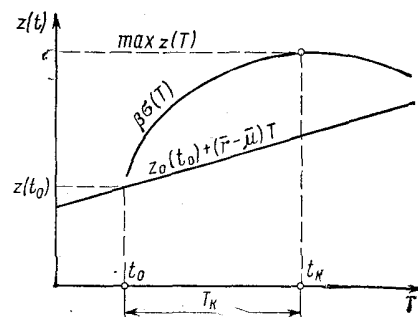


Рис. 7.5. Максимальное состояние транспортной системы (графическое решение уравнения баланса)

На такой методической основе нетрудно уже создать соответствующие номограммы для различных типов систем. При графических методах определения периода максимального насыщения системы (периода  $T_k$ ) строят номограммы для расчета  $T_k$  при различных численных значениях  $\bar{r}$ ,  $\bar{\mu}$ ,  $\beta$ , при аналитических методах  $z(T_i)$  и период  $T_k$  определяют по уравнению баланса (7.28). Рассмотрим аналитические методы применительно к основным паркам участковых, сортировочных и пассажирских станций.

#### 7.4. Расчет периода насыщения основных парков участковых и сортировочных станций

Уравнение баланса характеризует условия работы основных парков участковых, сортировочных и других типов станций. Оно также показывает изменение во времени состояния системы  $z(t)$ , причем максимальному значению  $z(t)$  соответствуют наибольшая потребность в путях и наибольшие приращения простоя поездов (составов, вагонов).

Сгущенный подвод поездов, когда парки приема, отправления, транзитные, приемо-отправочные работают в режиме заполнения, увеличивает число одновременно находящихся в парке составов поездов  $z(t)$  и простои вагонов. Поскольку парк работает не в стационарном режиме, то у каждого последующего вводимого в систему поезда (состава) увеличиваются простои и, следовательно, время занятия пути. Величина этого приращения равна разности интервалов ввода и вывода поездов (составов) из парка  $\bar{I}_{вв} - \bar{I}_в$ .

Интервал сгущенного ввода в периоде  $T$

$$I = \frac{T}{N_p(T)} = \frac{T}{\bar{r}T + \beta\sigma(T) - 1}. \quad (7.29)$$

Интервал вывода  $\bar{I}_в$  характеризует устойчивую интенсивность обслуживания потока каналами ПТО и ЦТК. Он может быть определен статистически или методами технического нормирования операций, моделирования технологии по выводу поездов из парка или в соответствии с графиком отправления поездов. При определении этого интервала учитывают надежность технического, информационно-управляющего комплексов.

Поскольку в режиме заполнения системы  $\bar{I}_{вв} < \bar{I}_в$ , приращение простоя последнего из числа всех прибывших  $\bar{r}T + \beta\sigma(T) - 1$  поездов при заданном значении надежности  $P$  и соответствующем ей числе средних квадратичных отклонений  $\beta$

$$\Sigma\delta = N_p(T) (\bar{I}_в - \bar{I}_{вв}).$$

Интервал ввода в периоде  $T$  можно определить как  $\bar{I}_{вв} = \frac{T}{N_p(T)}$ .

Тогда

$$\Sigma\delta = N_p(T) \bar{T}_B - T,$$

или с учетом того, что  $N_p(T) = \bar{r}T + \beta\sigma(T) - 1$ ,

$$\begin{aligned} \Sigma\delta &= [\bar{r}T + \beta\sigma(T) - 1] (\bar{T}_B - \bar{T}_{B0}) = [\bar{r}T + \beta\sigma(T) - 1] \times \\ &\times \left( \bar{T}_B - \frac{T}{\bar{r}T + \beta\sigma(T) - 1} \right) = \bar{T}_B [\bar{r}T + \beta\sigma(T) - 1] - T = \\ &= \bar{T}_B \bar{r}T - T + \beta \bar{T}_B \sigma(T) - \bar{T}_B. \end{aligned} \quad (7.30)$$

Определим эмпирическим путем величину максимального приращения  $\max \Sigma\delta$ , которой соответствует период  $T_K$  насыщения системы.

На рис. 7.6 приведены плотности распределений транспортного потока для периодов  $T = 1,75; 2,0; 2,25; 2,5; 2,75$  ч. Их величины использованы для расчета числа подводимых поездов  $X(T)$  при значении  $\beta$ , соответствующем надежности  $P = 0,985$ . Так, при  $T = 1,75$  ч  $X(1,75) = 11,9$ ; при  $T = 2,0$  ч  $X(2,0) = 13,3$ ; при  $T = 2,25$  ч  $X(2,25) = 14,5$ .

На основе этих данных в соответствии с приведенными на рис. 7.6 распределениями по формуле (7.30) рассчитаны приращения простоя  $\Sigma\delta$  при интервале вывода  $\bar{T}_B = 10; 11; 12; 13$  мин. Так, при  $\bar{T}_B = 10$  мин и  $X(1,75) = 11,9$  приращение простоя 25,9 мин; при  $X(2,0) = 13,3$  оно уже равно 26,3 мин и т. д.

Графики зависимости  $\Sigma\delta = \Sigma\delta(T)$  представлены на рис. 7.7. Анализ их показывает, что всем значениям интервала вывода соответствуют явно выраженные  $\max \Sigma\delta$  и, следовательно, максимальные состояния системы  $z(t)$ . Например, при  $\bar{T}_B = 10$  мин  $\max \Sigma\delta$  со-

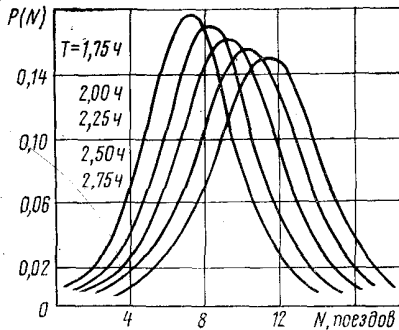


Рис. 7.6. Плотности распределения потока поездов, используемые для расчета их сгущенного подвода

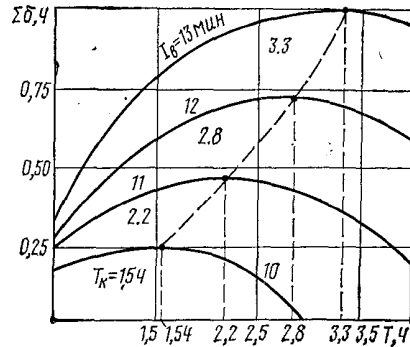


Рис. 7.7. Определение периода насыщения парков станции  $T_K$  по максимальному значению приращения простоя  $\Sigma\delta$

ответствует периоду насыщения системы  $T_K = 1,5$  ч; при  $\bar{T}_B = 11$  мин этот максимум будет при периоде  $T_K = 2,2$  ч; при  $\bar{T}_B = 12$  мин он уже равен 2,8 ч и т. д. (см. рис. 7.7). Как видно из этих графиков (пунктирные линии), с увеличением среднего интервала вывода, т. е. с увеличением коэффициента загрузки  $\rho$ , период насыщения также возрастает.

Определим аналитическим путем продолжительность периода насыщения системы  $T_K$  на основе исследования на максимум приращения простоя  $\Sigma\delta$ . Для этого в выражение (7.30) подставим значение  $\sigma(T)$ , определяемое по эмпирической формуле

$$\Sigma\delta = \bar{T}_B \bar{r}T - T + \beta \bar{T}_B \left[ a (\bar{r}T)^{b + \frac{c}{d+T}} \right] - \bar{T}_B. \quad (7.31)$$

Уравнение (7.31) можно представить в виде

$$\Sigma\delta = T_i \bar{T}_B \bar{r} - T + \beta \bar{T}_B a \bar{r}^{b + \frac{c}{d+T}} T^{b + \frac{c}{d+T}}. \quad (7.31a)$$

Продифференцируем это выражение

$$\begin{aligned} \frac{d(\Sigma\delta)}{dT} &= \bar{T}_B \bar{r} - 1 + \frac{d}{dT} \left( \beta \bar{T}_B a \bar{r}^{b + \frac{c}{d+T}} T^{b + \frac{c}{d+T}} \right) = \\ &= \bar{T}_B \bar{r} - 1 + \beta \bar{T}_B a \left\{ \bar{r}^{b + \frac{c}{d+T}} \ln \bar{r} \left( -\frac{c}{(d+T)^2} \right) T^{b + \frac{c}{d+T}} \right\} + \\ &+ \bar{r}^{-b + \frac{c}{d+T}} \left[ \left( b + \frac{c}{d+T} \right) \left( T^{b + \frac{c}{d+T}} \right) - \right. \\ &\left. - \left( \frac{c}{(d+T)^2} \right) \ln T T^{b + \frac{c}{d+T}} \right] \}. \end{aligned} \quad (7.32)$$

Учитывая, что  $y = T^{b + \frac{c}{d+T}}$ , и продифференцировав  $\frac{dy}{dT}$ , получим:

$$\begin{aligned} \ln y &= \left( b + \frac{c}{d+T} \right) \ln T; \quad \frac{y'}{y} = -\frac{c}{(d+T)^2} \ln T + b + \frac{c}{d+T} \frac{1}{T}; \\ y' &= T^{b + \frac{c}{d+T}} \left( -\frac{c}{(d+T)^2} \ln T + b + \frac{c}{d+T} \frac{1}{T} \right) = \\ &= \left( b + \frac{c}{d+T} \right) \left( T^{b + \frac{c}{d+T} - 1} \right) - \frac{c}{(d+T)^2} \ln T T^{b + \frac{c}{d+T}}. \end{aligned}$$

Сгруппируем элементы выражения (7.32). В связи с тем что первый и четвертый сомножители в первых квадратных скобках образуют значение  $\sigma$ , т. е.  $ar^{b+\frac{c}{d+T}} T^{b+\frac{c}{d+T}}$ , и произведение сомножителей перед вторыми квадратными скобками на последний сомножитель в этих скобках также образует значение  $\sigma$ , а произведения  $ar^{b+\frac{c}{d+T}} T^{b+\frac{c}{d+T}} = \frac{\sigma}{T}$ , получим:

$$\frac{d(\Sigma\delta)}{dT} = \bar{I}_B \bar{r} - 1 + \beta \bar{I}_B \left\{ \sigma \left( -\frac{c}{(d+T)^2} \right) \ln T + \right. \\ \left. + \frac{\sigma}{T} \left( b + \frac{c}{d+T} \right) - \sigma \frac{c \ln T}{(d+T)^2} \right\}. \quad (7.32a)$$

Решим уравнение  $\frac{d(\Sigma\delta)}{dt} = 0$  относительно  $T$ . В развернутом виде это уравнение имеет вид

$$\bar{I}_B \bar{r} + \beta \bar{I}_B \sigma \frac{b(d+T)^2 + c(d+T) - cT \ln \bar{r} - cT \ln T}{T(d+T)^2} - 1 = 0,$$

где  $b, c, d$  — эмпирические коэффициенты.

Тогда период насыщения парка поездами (составами) при сгущенном подводе их за время  $T$ , т. е. числом  $\bar{r} T + \beta \sigma(T)$ , и выводе со средним интервалом  $\bar{I}_B$

$$T_K = \frac{\beta \sigma \bar{I}_B [b(d+T)^2 + c(d+T) - cT \ln \bar{r} - cT \ln T]}{(1 - \bar{I}_B \bar{r})(d+T)^2}. \quad (7.33)$$

Период времени  $T_K$  рассчитывают итерационным способом. Рассмотрим пример расчета.

По данным исследования транспортных потоков, параметры  $b = 0,3$ ;  $c = 3,0$ ;  $d = 15,7$ . Интенсивность транспортного потока в течение месяца составляет  $\bar{r} = 4,17$  поезда в час (100 поездов в сутки), время вывода составов из парка  $\bar{I}_B = 0,217$  ч (13 мин).

Первый шаг. Допустим, что  $T_K = 8$  ч. Тогда:

$$\sigma = 0,9(8 \cdot 4,17) = 0,9(33,36) = 0,9(33,36)^{0,426};$$

$$\lg \sigma = \lg 0,9 + 0,426 \lg 33,36 = 1,9542 + 0,6489 = -0,0458 + 0,6489 = 0,6031;$$

$$\sigma = 4,01 \text{ поезда.}$$

Подставив значение  $\sigma$  в формулу (7.33), получим:

$$T_K = \frac{3 \cdot 0,217 \cdot 4,01 [3 \cdot 15,7 + 0,3(8 + 15,7)^2 - 3 \cdot 8(\ln 8 + \ln 4,17 - 1)]}{(8 + 15,7)^2 (1 - 4,17 \cdot 0,217)} = \\ = \frac{0,651 \cdot 4,01 [47,1 + 168,51 - 24(2,0794 + 1,4279 - 1)]}{561,69(1 - 0,905)} = 7,6 \text{ ч.}$$

Второй шаг. Определяем среднее квадратичное отклонение при  $T_K = 7,6$  ч:

$$\sigma = 0,9(7 \cdot 6 \cdot 4,17) = 0,9(31,69)^{0,429};$$

$$\lg \sigma = \lg 0,9 + 0,429 \lg 31,69 = 0,5981;$$

$$\sigma = 3,96 \text{ поезда;}$$

$$T_K = \frac{3 \cdot 0,217 \cdot 3,96 [3 \cdot 15,7 + 0,3(7,6 + 15,7)^2 - 3 \cdot 7,6(\ln 7,6 + \ln 4,17 - 1)]}{(7,6 + 15,7)^2 (1 - 4,17 \cdot 0,217)} = \\ = 7,7 \text{ ч.}$$

Третий шаг.

$$\sigma = 0,9(7 \cdot 7 \cdot 4,17) = 0,9(32,11)^{0,428};$$

$$\lg \sigma = \lg 0,9 + 0,428 \lg 32,11 = 0,599; \quad \sigma = 3,97 \text{ поезда;}$$

$$T_K =$$

$$= \frac{3 \cdot 0,217 \cdot 3,97 [3 \cdot 15,7 + 0,3(7,7 + 15,7)^2 - 3 \cdot 7,7(\ln 7,7 + \ln 4,17 - 1)]}{(7,7 + 15,7)^2 (1 - 4,17 \cdot 0,217)} = \\ = 7,67 \text{ ч.}$$

Принимаем  $T_K = 7,7$  ч;  $\sigma = 3,97$  поезда.

В табл. 7.1 приведены значения периода насыщения системы  $T_K$  и соответствующие ему значения среднего квадратичного отклонения, которые можно использовать в расчетах путевого развития основных парков участковых и сортировочных станций. Эти данные рассчитаны для суточного потока от 10 до 160 поездов (составов) при коэффициенте загрузки выходного канала  $\rho$  от 0,5 до 0,95 с шагом 0,05. Продолжительность периода  $T_K$  прежде всего зависит от величин интервала вывода и интенсивности транспортного потока, т. е. от степени загрузки системы: при увеличении загрузки период насыщения системы резко возрастает. Так, при интенсивности  $\bar{r} = 3$  поезда/ч (72 поезда в сутки) и интервале вывода  $\bar{I}_B = 12$  мин, т. е. при коэффициенте загрузки выходного канала 0,6, период  $T_K = 1,12$  ч, а при  $\bar{I}_B = 16$  мин ( $\rho = 0,8$ ) этот период уже вырос до  $T_K = 4,17$  ч и при  $\bar{I}_B = 19$  мин ( $\rho = 0,95$ ) составляет 16,42 ч. При  $\rho = 1$  период насыщения  $T_K = \infty$ , что свидетельствует о неработоспособности системы по пропускной способности. В этом случае вся она находится в состоянии отказа. Поэтому загрузки системы, соответствующие  $\rho = 1$ , в практике работы недопустимы.

Большое влияние на величину периода насыщения системы  $T_K$  оказывают параметры транспортного потока — интенсивность и дисперсия. Рассмотрим зависимость для определения периода  $T_K$ ,

если транспортный поток характеризуется средним квадратичным отклонением, определяемым формулой

$$\sigma = a(\bar{r}T)^b, \quad (7.34)$$

где  $a, b$  — параметры, величину которых устанавливают на основе анализа транспортных потоков.

В этом случае уравнение приращения простоя к концу периода заполнения принимает вид

$$\Sigma\delta = \bar{I}_B(\bar{r}T) - T + \beta \bar{I}_B a (\bar{r}T)^b - \bar{I}_B. \quad (7.35)$$

Исследуем уравнение (7.35) на максимум

$$\frac{d(\Sigma\delta)}{dT} = \bar{I}_B \bar{r} + \beta a \bar{I}_B b \bar{r}^b T^{b-1} - 1.$$

Вторая производная —

$$\frac{d^2(\Sigma\delta)}{dT^2} = \beta a \bar{I}_B \bar{r}^b b (b-1) T^{b-2}.$$

Так как  $b < 1$ , то  $b^2 < 1$ . Следовательно, вторая производная отрицательна, а функция  $\Sigma\delta = \Sigma\delta(T)$  при  $\bar{I}_B, \bar{r}, \beta = \text{const}$  имеет максимум. Из уравнения

$$\bar{I}_B \bar{r} + \beta a \bar{I}_B b \bar{r}^b T^{b-1} - 1 = 0 \quad (7.36)$$

определим период  $T_K$ , в течение которого приращение простоя достигает  $\max \Sigma\delta$  и состояние системы по числу составов или поездов также характеризуется максимальным значением.

Преобразуем уравнение (7.36):

$$\begin{aligned} \beta a \bar{I}_B b \bar{r}^b T^{b-1} &= 1 - \bar{I}_B \bar{r}; \\ \ln \beta a \bar{I}_B b \bar{r}^b + (b-1) \ln T &= \ln(1 - \bar{I}_B \bar{r}). \end{aligned}$$

Отсюда:

$$\ln T_K = \frac{\ln(1 - \bar{I}_B \bar{r}) - \ln \beta a b \bar{I}_B \bar{r}^b}{b-1} \quad (7.37)$$

или

$$T_K = e^{\frac{\ln(1 - \bar{I}_B \bar{r}) - \ln \beta a b \bar{I}_B \bar{r}^b}{b-1}}. \quad (7.37a)$$

На рис. 7.8 графически показаны зависимости по формулам (7.33) и (7.37). Параметр  $a$  принят 0,877,  $b = 0,462$ . Анализ показывает, что при небольших уровнях загрузки (до 0,65) разность абсолютных значений времени насыщения парков подвижным составом невелика. При дальнейшем увеличении коэффициента загрузки системы продолжительность периода насыщения  $T_K$ , определяемая по формуле (7.37a), намного превышает значения этой величины, рассчитанные по формуле (7.33). Так, при  $\rho \approx 0,80$  и  $\bar{r} = 1,5$  по-

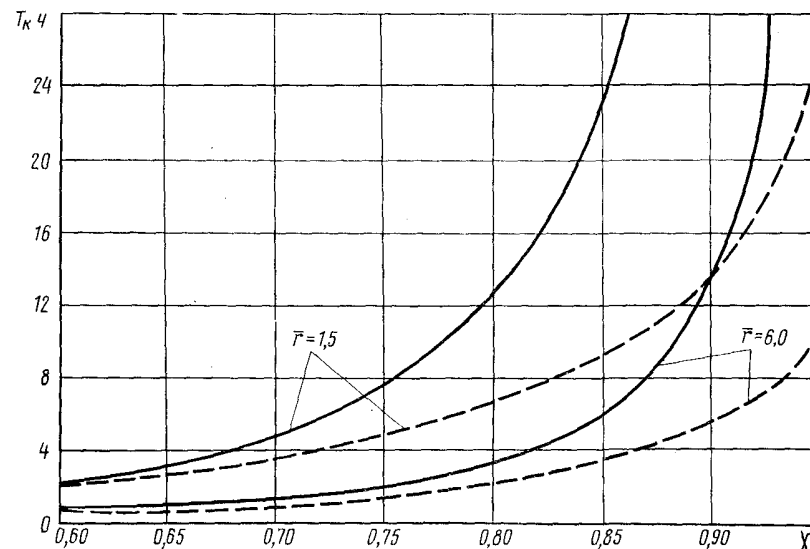


Рис. 7.8. Кривые зависимости периода насыщения парков станций от коэффициента загрузки при разных характеристиках транспортного потока

езда/ч период  $T_K$  по формуле (7.37a) составляет свыше 12 ч, а по формуле (7.37) — около 7 ч (см. рис. 7.8). Поэтому параметры транспортного потока, его дисперсия и среднее квадратичное отклонение оказывают заметное влияние на емкость (число путей) станционных парков (при прочих равных условиях, чем больше период  $T_K$ , тем больше абсолютное число транспортных единиц в системе). А это требует и большей емкости системы, для станционных парков — большего числа путей.

Формулы (7.34) и (7.37), по которым рассчитывают среднее квадратичное отклонение и продолжительность периода насыщения, характерны для плохо управляемого нерегулируемого транспортного потока. При расчетах для парков участковых и сортировочных станций необходимо использовать зависимости (7.29) и (7.33). Численные значения, рассчитанные с их помощью, приведены в форме, удобной для практического пользования, в табл. 7.1. Параметры  $a, b, c$  и  $d$  в формуле (7.33) могут быть в необходимых случаях откорректированы по данным статистических исследований фактических транспортных потоков.

Максимальную величину приращения простоя  $\Sigma\delta$  можно также определить градиентным методом.

**Пример.** Необходимо определить продолжительность периода  $T_K$ , если  $\bar{I}_B = 0,2$  ч;  $\bar{r} = 4,5$  поезда/ч;  $\beta = 3$ .

Таблица 7.1

Значения периода насыщения системы  $T_k$ , ч, и среднего квадратичного отклонения потока  $\sigma$ , поездов (составов)

| N   | $\rho=0,50$ |          | $\rho=0,55$ |          | $\rho=0,60$ |          | $\rho=0,65$ |          | $\rho=0,70$ |          | $\rho=0,75$ |          | $\rho=0,80$ |          | $\rho=0,85$ |          | $\rho=0,90$ |          | $\rho=0,95$ |          |
|-----|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|
|     | $T_k$       | $\sigma$ | $T_k$       | $\sigma$ | $T_k$       | $\sigma$ | $T_k$       | $\sigma$ | $T_k$       | $\sigma$ | $T_k$       | $\sigma$ | $T_k$       | $\sigma$ | $T_k$       | $\sigma$ | $T_k$       | $\sigma$ | $T_k$       | $\sigma$ |
| 10  | 3,40        | 1,06     | 4,49        | 1,19     | 5,83        | 1,33     | 7,49        | 1,47     | 9,62        | 1,61     | 12,49       | 1,76     | 16,65       | 1,93     | 23,57       | 2,13     | 38,50       | 2,41     | 100,90      | 3,04     |
| 15  | 2,88        | 1,08     | 3,19        | 1,24     | 4,21        | 1,39     | 5,48        | 1,55     | 7,11        | 1,71     | 9,27        | 1,88     | 12,33       | 2,07     | 17,23       | 2,28     | 27,09       | 2,56     | 64,67       | 3,13     |
| 20  | 2,33        | 1,10     | 2,50        | 1,26     | 3,33        | 1,44     | 4,39        | 1,61     | 5,74        | 1,79     | 7,53        | 1,98     | 10,05       | 2,18     | 13,87       | 2,41     | 21,53       | 2,70     | 47,86       | 3,24     |
| 25  | 1,50        | 1,11     | 2,06        | 1,29     | 2,77        | 1,47     | 3,68        | 1,66     | 4,86        | 1,86     | 6,42        | 2,06     | 8,60        | 2,28     | 11,94       | 2,52     | 18,20       | 2,82     | 38,43       | 3,34     |
| 30  | 1,27        | 1,12     | 1,75        | 1,30     | 2,38        | 1,50     | 3,19        | 1,70     | 4,24        | 1,91     | 5,64        | 2,13     | 7,58        | 2,36     | 10,54       | 2,62     | 15,93       | 2,93     | 32,47       | 3,44     |
| 35  | 1,10        | 1,13     | 1,53        | 1,32     | 2,09        | 1,52     | 2,82        | 1,73     | 3,78        | 1,95     | 5,05        | 2,19     | 6,82        | 2,43     | 9,50        | 2,71     | 14,33       | 3,03     | 28,38       | 3,54     |
| 40  | 0,97        | 1,13     | 1,36        | 1,33     | 1,87        | 1,54     | 2,54        | 1,76     | 3,42        | 1,99     | 4,59        | 2,24     | 6,23        | 2,50     | 8,70        | 2,79     | 13,09       | 3,13     | 25,39       | 3,64     |
| 45  | 0,87        | 1,14     | 1,22        | 1,34     | 1,69        | 1,55     | 2,31        | 1,78     | 3,12        | 2,03     | 4,22        | 2,29     | 5,75        | 2,56     | 8,05        | 2,86     | 12,10       | 3,22     | 23,12       | 3,73     |
| 50  | 0,78        | 1,14     | 1,11        | 1,34     | 1,54        | 1,56     | 2,12        | 1,80     | 2,88        | 2,06     | 3,91        | 2,33     | 5,35        | 2,62     | 7,51        | 2,93     | 11,29       | 3,30     | 21,32       | 3,82     |
| 55  | 0,72        | 1,14     | 1,02        | 1,35     | 1,42        | 1,58     | 1,96        | 1,82     | 2,68        | 2,09     | 3,65        | 2,37     | 5,02        | 2,67     | 7,06        | 2,99     | 10,62       | 3,37     | 19,86       | 3,90     |
| 60  | 0,66        | 1,15     | 0,94        | 1,35     | 1,31        | 1,59     | 1,82        | 1,84     | 2,50        | 2,11     | 3,43        | 2,40     | 4,73        | 2,71     | 6,68        | 3,05     | 10,05       | 3,45     | 18,65       | 3,99     |
| 65  | 0,61        | 1,15     | 0,87        | 1,36     | 1,22        | 1,59     | 1,70        | 1,85     | 2,35        | 2,13     | 3,23        | 2,46     | 4,48        | 2,76     | 6,34        | 3,11     | 9,55        | 3,52     | 17,62       | 4,06     |
| 70  | 0,57        | 1,15     | 0,81        | 1,36     | 1,15        | 1,60     | 1,60        | 1,87     | 2,22        | 2,15     | 3,06        | 2,43     | 4,25        | 2,80     | 6,04        | 3,16     | 9,12        | 3,58     | 16,74       | 4,14     |
| 75  | 0,53        | 1,15     | 0,76        | 1,37     | 1,08        | 1,61     | 1,51        | 1,88     | 2,10        | 2,17     | 2,91        | 2,49     | 4,06        | 2,84     | 5,78        | 3,21     | 8,74        | 3,64     | 15,98       | 4,21     |
| 80  | 0,50        | 1,15     | 0,72        | 1,37     | 1,02        | 1,62     | 1,43        | 1,89     | 1,99        | 2,19     | 2,77        | 2,52     | 3,88        | 2,87     | 5,55        | 3,26     | 8,40        | 3,70     | 15,30       | 4,28     |
| 85  | 0,47        | 1,16     | 0,68        | 1,37     | 0,96        | 1,62     | 1,36        | 1,90     | 1,90        | 2,21     | 2,65        | 2,54     | 3,72        | 2,91     | 5,34        | 3,31     | 8,09        | 3,76     | 14,71       | 4,35     |
| 90  | 0,45        | 1,16     | 0,64        | 1,38     | 0,91        | 1,63     | 1,29        | 1,91     | 1,81        | 2,22     | 2,54        | 2,56     | 3,58        | 2,94     | 5,14        | 3,35     | 7,81        | 3,81     | 14,18       | 4,42     |
| 95  | 0,42        | 1,16     | 0,61        | 1,38     | 0,87        | 1,63     | 1,23        | 1,92     | 1,74        | 2,24     | 2,44        | 2,59     | 3,45        | 2,97     | 4,97        | 3,39     | 7,56        | 3,87     | 13,69       | 4,48     |
| 100 | 0,40        | 1,16     | 0,58        | 1,38     | 0,83        | 1,64     | 1,18        | 1,93     | 1,66        | 2,25     | 2,35        | 2,61     | 3,33        | 3,00     | 4,81        | 3,43     | 7,33        | 3,92     | 13,26       | 4,54     |
| 105 | 0,39        | 1,16     | 0,56        | 1,38     | 0,79        | 1,64     | 1,13        | 1,93     | 1,60        | 2,26     | 2,26        | 2,62     | 3,21        | 3,03     | 4,66        | 3,47     | 7,11        | 3,97     | 12,86       | 4,60     |
| 110 | 0,37        | 1,16     | 0,53        | 1,39     | 0,76        | 1,64     | 1,09        | 1,94     | 1,54        | 2,27     | 2,18        | 2,64     | 3,11        | 3,05     | 4,52        | 3,50     | 6,92        | 4,01     | 12,50       | 4,66     |
| 115 | 0,35        | 1,16     | 0,51        | 1,39     | 0,73        | 1,65     | 1,04        | 1,95     | 1,48        | 2,28     | 2,11        | 2,66     | 3,02        | 3,08     | 4,39        | 3,54     | 6,73        | 4,06     | 12,16       | 4,72     |
| 120 | 0,34        | 1,16     | 0,49        | 1,39     | 0,70        | 1,65     | 1,01        | 1,95     | 1,43        | 2,29     | 2,04        | 2,68     | 2,93        | 3,10     | 4,27        | 3,57     | 6,56        | 4,11     | 11,85       | 4,78     |
| 125 | 0,33        | 1,16     | 0,47        | 1,39     | 0,68        | 1,65     | 0,97        | 1,96     | 1,39        | 2,30     | 1,98        | 2,69     | 2,84        | 3,12     | 4,16        | 3,60     | 6,40        | 4,15     | 11,57       | 4,83     |
| 130 | 0,31        | 1,16     | 0,44        | 1,39     | 0,65        | 1,66     | 0,94        | 1,96     | 1,34        | 2,31     | 1,92        | 2,71     | 2,76        | 3,15     | 4,06        | 3,64     | 6,26        | 4,19     | 11,30       | 4,88     |
| 135 | 0,30        | 1,16     | 0,44        | 1,39     | 0,63        | 1,66     | 0,91        | 1,97     | 1,30        | 2,32     | 1,86        | 2,72     | 2,69        | 3,17     | 3,96        | 3,67     | 6,12        | 4,23     | 11,05       | 4,94     |
| 140 | 0,29        | 1,17     | 0,42        | 1,40     | 0,61        | 1,66     | 0,88        | 1,97     | 1,26        | 2,33     | 1,81        | 2,73     | 2,62        | 3,19     | 3,87        | 3,70     | 5,98        | 4,27     | 10,81       | 4,99     |
| 145 | 0,28        | 1,17     | 0,41        | 1,40     | 0,59        | 1,67     | 0,85        | 1,98     | 1,22        | 2,34     | 1,76        | 2,75     | 2,56        | 3,21     | 3,78        | 3,72     | 5,86        | 4,31     | 10,59       | 5,04     |
| 150 | 0,27        | 1,17     | 0,40        | 1,40     | 0,57        | 1,67     | 0,82        | 1,99     | 1,19        | 2,35     | 1,72        | 2,76     | 2,50        | 3,23     | 3,70        | 3,75     | 5,74        | 4,35     | 10,39       | 5,09     |
| 155 | 0,26        | 1,17     | 0,38        | 1,40     | 0,55        | 1,67     | 0,80        | 1,99     | 1,16        | 2,35     | 1,67        | 2,77     | 2,44        | 3,25     | 3,62        | 3,78     | 5,63        | 4,38     | 10,19       | 5,13     |
| 160 | 0,26        | 1,17     | 0,37        | 1,40     | 0,54        | 1,67     | 0,78        | 1,99     | 1,13        | 2,36     | 1,63        | 2,78     | 2,38        | 3,26     | 3,54        | 3,80     | 5,53        | 4,32     | 10,01       | 5,18     |
| 165 | 0,25        | 1,17     | 0,36        | 1,40     | 0,52        | 1,67     | 0,76        | 1,99     | 1,10        | 2,37     | 1,59        | 2,79     | 2,33        | 3,28     | 3,47        | 3,83     | 5,43        | 4,46     | 9,83        | 5,23     |

Примем предварительно  $T = 7,5$  ч и продифференцируем уравнение (7.31) по  $T$ :

$$\frac{d(\Sigma\delta)}{dT} = T(T+d)^2(1-\bar{l}_B\bar{r}) - 3\bar{l}_B\sigma[cd + b(T+d)^2 - cT(\ln T + \ln \bar{r} - 1)].$$

Первый шаг. При  $T = 7,5$  ч среднее квадратичное отклонение

$$\sigma = 0,9(7,5 \cdot 4,5)^{0,3 + \frac{3}{15,7+7,5}} = 0,9(33,75)^{0,429} = 4,3 \text{ поезда.}$$

Частная производная уравнения (7.31) при  $T = 7,5$  и  $\sigma = 4,3$  будет  $\frac{d(\Sigma\delta)}{dT} = -3,24$ . Поскольку она отрицательна, уменьшим величину  $T$ .  
Второй шаг. Сократим  $T$  на 0,1 ч. В этом случае

$$\sigma = 0,9(7,4 \cdot 4,5)^{0,3 + \frac{3,0}{15,7+7,4}} = 0,9(33,3)^{0,43} = 4,18 \text{ поезда } (T = 7,4 \text{ ч}).$$

Частная производная уравнения (7.31) при  $T = 7,4$  и  $\sigma = 4,18$   $\frac{d(\Sigma\delta)}{dT} = +8,1$ , т. е. увеличилась; необходимо продолжить расчеты.

Третий шаг.  $T = 7,3$  ч;  $\sigma = 0,9(7,3 \cdot 4,5)^{0,3 + \frac{3,0}{15,7+7,3}} = 0,9(32,85)^{0,43} = 4,0$  поезда;  $\frac{d(\Sigma\delta)}{dT} = +10,1$ .

Четвертый шаг.  $T = 7,2$  ч;  $\sigma = 4,0$  поезда. Частная производная при этих данных  $\frac{d(\Sigma\delta)}{dT} = +2,1$ . Изменение  $\frac{d(\Sigma\delta)}{dT}$  от второго шага (+8,1) к третьему (+10,1) и далее к четвертому (+2,1) свидетельствует о том, что пройден максимум  $\Sigma\delta$  и, следовательно, максимум  $z(t)$ . Следовательно, величина периода насыщения  $T_k$  находится на отрезке времени 7,2—7,3 ч. Графически можно найти значение  $\max T = T_k = 7,28$  ч.

Таким образом, градиентный метод по существу не отличается от метода итераций, но он более трудоемок. В расчетах путевого развития целесообразно использовать приведенные выше табличные данные и номограммы, которые даны в последующих главах при изложении методов определения числа путей.

## 7.5. Период максимального насыщения парков пассажирских и технических станций

Методика исследования текущего состояния основных парков пассажирских и технических станций в режиме насыщения принципиально не отличается от изложенной ранее. Эти парки также рассматривают как системы с входом и выходом, работа которых организована в соответствии с уравнением баланса. Путевое развитие парков также необходимо рассчитывать исходя из продолжительности периода насыщения  $T_k$ , когда в них скапливается наибольшее число пассажирских составов и поездов. Однако при этом необходимо учитывать характеристики транспортного потока пассажирских поездов. Параметры этого потока имеют свои, отличные от по-

тока грузовых поездов, величины дисперсии, среднего квадратичного отклонения, коэффициента вариации.

Максимальное число пассажирских поездов, поступающих за некоторый период  $T$ , можно определить по выражению

$$N_p(T) = \bar{r}_n T + \beta_n \sigma(T), \quad (7.38)$$

где  $\bar{r}_n$  — часовая интенсивность потока пассажирских поездов;  $\beta_n$  — число средних квадратичных отклонений потока пассажирских поездов, определенное на основании плотности распределения этого потока и соответствующее некоторому уровню надежности  $P$ .

Этот уровень надежности

$$P = \int_0^{N_p(T)} f(x) dx, \quad (7.39)$$

где  $f(x)$  — плотность распределения потока пассажирских поездов в периоде времени  $T$ .

Колебания потока пассажирских поездов часто выражают через коэффициент неравномерности

$$K(T) = \frac{N_{\max}(T)}{\bar{r}(T)}, \quad (7.40)$$

где  $N_{\max}(T)$  — максимальное число составов, поступающих в систему за период  $T$ ;  $\bar{r}(T)$  — средняя интенсивность пассажирского потока.

Максимальное число составов, которое поступает в систему за период  $T$ , т. е. значение максимума состояния системы  $z(t)$ , из (7.40) определяем как

$$N_{\max}(T) = k(T) \bar{r}(T). \quad (7.41)$$

На рис. 7.9 приведены графики усредненных значений коэффициента неравномерности потока пассажирских поездов в зависимости от периода  $T$  при разных значениях интенсивности потока пассажирских поездов.

Проведенные исследования [41] показывают, что коэффициент неравномерности потока пассажирских поездов

$$K^p = \left( 1,917 - 0,0436T + \frac{1,874}{T} \right) \left( 1,1684 - 0,1457\bar{r} - \frac{0,0014}{\bar{r}} \right).$$

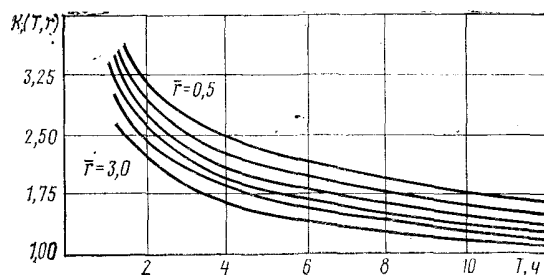


Рис. 7.9. Графики коэффициента неравномерности потока пассажирских поездов (по И. А. Яловому)

В соответствии с формулой (7.30) простой поездов на путях приема пассажирских станций в ожидании обработки

$$\Sigma \delta = N_{\max}(T) \bar{I}_{\text{выб}} - T. \quad (7.42)$$

Если выразить  $N_{\max}(T)$  через интенсивность потока пассажирских поездов  $\bar{r}(T)$  и соответствующую функцию среднего квадратичного отклонения  $\sigma(T)$ , выраженную применительно к потоку пассажирских поездов, то  $N_{\max}(T)$  при заданном уровне надежности  $P$  будет определять формула (7.38).

## ГЛАВА 8

### ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К РАСЧЕТУ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ СОРТИРОВОЧНЫХ СТАНЦИЙ

#### 8.1. Исходные принципы и положения

Теория надежности позволяет исследовать связи между показателями надежности и экономической эффективности, т. е. взаимосвязи между техническими и экономическими параметрами работы системы.

Транспорт должен иметь резерв перевозочной мощности, используемый в периоды резкого возрастания перевозок. Отказы в работе сортировочных станций существенно снижают эффективность использования локомотивов и вагонов, уменьшают их производительность, замедляют доставку грузов, усложняют управление движением поездов. Эти отказы вызваны отсутствием или недостаточной величиной резерва пропускной и перерабатывающей способности, недостатками технологии и управления, неудовлетворительной технологической дисциплиной.

На надежность станций влияют качество оперативного планирования и регулирования локомотивных парков. Если вывоз поездов замедляется, то они скапливаются на станции, пачкообразный вывоз поездов и лавинообразное их движение вызывают задержки на подходах к другим сортировочным станциям.

Информационная связь, достаточная глубина информации, использование ЭВМ в оперативном планировании и управлении, создание АСУЖТ позволяют повысить достоверность оперативных планов и эффективность управления движением. Это в свою очередь будет способствовать повышению эксплуатационной надежности станций. Однако на ряде станций одними организационно-техническими мерами невозможно полностью ликвидировать задержки поездов из-за непряма. Необходимы также реконструктивные меры —

увеличение перерабатывающей способности сортировочных устройств, развитие парков, сооружение новых сортировочных станций.

Важное значение имеют величины стоимости вагоно-часа и локомотиво-часа, которые используют при обосновании экономического уровня надежности работы сортировочных станций.

В расчетах надежности при определении приведенной стоимости 1 вагоно-ч учитывают следующие элементы затрат.

1. Приведенные капитальные затраты по вагонам —

$$\Delta c_{в.ч}^{кв} = \frac{\Delta (1 - \alpha_{рем}) B_{ваг}}{8760},$$

где  $\Delta$  — нормативный коэффициент эффективности,  $\Delta = 0,10$ ;  $\alpha_{рем}$  — часть потребного для перевозок вагонного парка, находящаяся в плановых видах ремонта,  $\alpha_{рем} = 0,07$ ;  $B_{ваг}$  — расчетная стоимость вагона при существующей структуре вагонного парка; 8760 — число часов в году.

С учетом коэффициента месячной неравномерности перевозок стоимость этого элемента затрат составит 4,1 коп. (коэффициент неравномерности 1,1).

2. Для пропорциональной стоимости вагонного хозяйства — приведенные капитальные затраты по вагонному хозяйству —

$$\Delta c_{в.ч}^{квх} = \frac{\Delta (1 + \alpha_{рем}) \alpha_{вх} B_{вх}}{8760},$$

где  $\alpha_{вх}$  — доля стоимости вагонного хозяйства по отношению к стоимости вагонного парка,  $\alpha_{вх} = 0,1$ .

При тех же численных значениях остальных исходных данных второй элемент стоимости 1 вагоно-ч составит 0,37 коп. Если учесть коэффициент месячной неравномерности, то он будет равен 0,41 коп.

3. Реновационные отчисления от стоимости вагонов —

$$\Delta c_{в.ч}^{рkv} = \frac{(1 + \alpha_p) B_{ваг}}{8760 t_{сп}^в},$$

где  $t_{сп}^в$  — срок службы вагонов.

Если исходить из квоты на восстановление 2,8 %, то при среднем сроке службы вагонов 35 лет  $\Delta c_{в.ч}^{рkv} = 1,07$  коп., а с учетом помесячной неравномерности перевозок — 1,17 коп.

4. Реновационные отчисления от стоимости вагонного хозяйства —

$$\Delta c_{в.ч}^{рkvx} = \frac{\alpha_{рем}^{вх} (1 + \alpha_{рем}) \alpha_{вх} B_{ваг}}{8760},$$

где  $\alpha_{рем}^{вх}$  — реновационная квота от устройств вагонного хозяйства,  $\alpha_{рем}^{вх} = 0,04$ .

Четвертая составляющая затрат —  $\Delta c_{в.ч}^{рkvx} = 0,16$  коп., а с учетом неравномерности — 0,18 коп.

5. Временная часть ремонтных расходов, отнесенная на стоимость вагоно-часа,—

$$\Delta c_{в.ч}^{врв} = e_{ваг} \alpha_{ос},$$

где  $e_{ваг}$  — расходная ставка временных затрат на содержание вагонного парка,  $e_{ваг} = 0,47$  коп. на 1 вагоно-осе-ч.

Тогда пятая составляющая затрат при  $\alpha_{ос} = 4$  (число осей учетного вагона) будет 1,88 коп.

6. Стоимость груза в вагоне, отнесенная к 1 вагоно-ч, —

$$\Delta c_{в.ч}^{гр} = \frac{\alpha_{гр} q_{гр} c_{гр} \Delta}{8760},$$

где  $\alpha_{гр}$  — степень использования грузоподъемности вагонов;  $q_{гр}$  — средняя грузоподъемность вагона, т;  $c_{гр}$  — средняя стоимость 1 т груза,  $c_{гр} = 200$  руб.

Шестая составляющая затрат, отнесенная на 1 вагоно-ч, примерно равна 6,8 коп.

Суммарную стоимость по шести составляющим затрат на 1 вагоно-ч (приведенные капитальные затраты по вагонам, вагонному хозяйству, реновационные отчисления, стоимость ремонтных расходов и стоимость груза) при расчете оптимальной надежности работы станций учитывают по-разному. Например, при обосновании эксплуатационной надежности подсистем «ВФ—ПО—ВхУ» или «Г—ПФ—ВФ» стоимость 1 вагоно-ч определяют как сумму составляющих:

$$c'_{в.ч} = [k_n (\Delta c_{в.ч}^{кв} + \Delta c_{в.ч}^{квх} + \Delta c_{в.ч}^{рkv} + \Delta c_{в.ч}^{рkvx}) + \Delta c_{в.ч}^{врв} + \Delta c_{в.ч}^{гр}] \alpha, \quad (8.1)$$

где  $k_n$  — коэффициент месячной неравномерности перевозок;  $\alpha$  — коэффициент, учитывающий дефицитность подвижного состава и возможные потери в народном хозяйстве из-за задержек вывоза груза.

В этом случае долю стоимости, пропорциональную путевому развитию станций, нужно учитывать путем непосредственного расчета. Отказы в работе подсистемы «ВФ—ПО—ВхУ» вызывают увеличение потребного путевого развития подсистем «Г—ПФ—ВФ» и «ВхУ—ПП—Г». Этому увеличению соответствуют затраты, связанные с дополнительной потребностью в путях. Аналогично можно определить затраты на увеличение путей в подсистеме «ВхУ—ПП—Г» в связи с отказами в работе подсистемы «Г—ПФ—ВФ».

При оптимальной эксплуатационной надежности подсистемы «ВхУ—ПП—Г» расходы на увеличение путевого развития, вызванные отказами, могут учитываться непосредственным расчетом или через стоимость, отнесенную на показатель 1 вагоно-ч (1 составо-ч). В этом случае отказы вызывают необходимость увеличения путевого развития промежуточных станций для временного размещения задержанных поездов. Дополнительную потребность в путях на отдельных пунктах, вызванную отказами сортировочных станций, можно определить по максимальной продолжительности времени отказа. Поэтому и связанные с этими путями дополнительные затраты также могут быть рассчитаны непосредственным способом.

Отказы в работе подсистемы «ВхУ—ПП—Г» вызывают, кроме того, дополнительную потребность в путях парка отправления. Связанные с этим потери учитывают при расчете седьмой и восьмой составляющих стоимости 1 вагоно-ч.

7. Доля пропорциональности стоимости путевого развития станций —

$$\Delta c_{в.ч}^{кп} = \frac{\eta_{п} l_{ваг}^{уч} \Delta A_{км}^{п} (1 + \alpha_p)}{10^3 \cdot 8760},$$

где  $\eta_{п}$  — коэффициент пропорциональности между потребной длиной станционных путей и длиной вагонного парка;  $l_{ваг}^{уч}$  — средняя длина вагона;  $A_{км}^{п}$  — средняя стоимость сооружения 1 км станционных путей.

Если принять  $\eta = 3,0$ ;  $A_{км}^{п} = 250$  тыс. руб., то  $\Delta c_{в.ч}^{кп} = 0,0665$  руб. = 6,65 коп.

8. Содержание станционных путей с учетом реновационных отчислений —

$$\Delta c_{в.ч}^{сп} = \frac{\eta_{п} l_{ваг}^{уч} \mathcal{E}_{км}^{п} (1 + \alpha_p)}{10^3 \cdot 8760},$$

где  $\mathcal{E}_{км}^{п}$  — средние годовые затраты на содержание 1 км станционных путей.

Если принять величину  $\mathcal{E}_{км}^{п} = 3000$  руб., то  $\Delta c_{в.ч}^{сп} = 0,00797$  руб. = 0,797 коп.

Последние два элемента затрат составят вторую часть стоимости 1 вагоно-ч:

$$c_{в.ч}'' = k_{п} (\Delta c_{в.ч}^{кп} + \Delta c_{в.ч}^{сп}). \quad (8.2)$$

Если эксплуатационную надежность станции повышают за счет увеличения числа путей в подсистеме «ВхУ—ПП—Г», то при устранении отказов простой составов не сократится: поезда будут задержаны на путях парка прибытия. Задержка поездов на входе вызовет дополнительные простои в парке отправления в связи с более поздним поступлением локомотивов. Поэтому потери, связанные с дополнительными простоями в парке отправления, нужно учитывать при анализе надежности подсистемы «ВхУ—ПП—Г». Численное их значение необходимо определять через стоимость 1 вагоно-ч.

Эксплуатационную надежность подсистемы «ВхУ—ПП—Г» можно повысить не только увеличением числа путей, но и усилением горки, наращиванием производительности каналов ПТО, ЦТК, ИВЦ. Тогда при обосновании надежности потребуются знать эффект от сокращения простоя вагонов в парке прибытия. Кроме того, при обосновании оптимального уровня надежности учитывают затраты, связанные с задержками локомотивов и потерей кинетической энергии на остановки поездов.

## 8.2. Экономические принципы расчета эксплуатационной надежности подсистемы «ВхУ—ПП—Г»

Полный учет потерь и отрицательных факторов, вызванных отказами в работе подсистемы, должен обеспечить высокий уровень эксплуатационной надежности ее работы. К потерям, связанным с отказами в работе подсистемы — задержками поездов на подходах, относят затраты локомотиво-часов поездных локомотивов, энергии на остановку поездов, а также затраты, пропорциональные времени задержек готовых составов попутного или встречного направлений, вызванные задержками поездных локомотивов на входе подсистемы, потери от возможного превышения установленной нормы продолжительности работы локомотивных бригад и связанные с приемом задержанных поездов в неспециализированные парки. Кроме того, следует учитывать и другие затраты, связанные с нарушением режима движения поездов и управления движением. Работа с отказами приводит к резкому снижению достоверности и эффективности текущего планирования работы сортировочных станций с помощью ЭВМ.

Стоимость одного отказа, при котором задержан поезд на время  $t_3$ , только по трем основным видам затрат определим по формуле

$$c_{ан} = (c_{в.ч} m f_1 + c_{л.ч}^{п}) t_3 + e_{кэ} f_2, \quad (8.3)$$

где  $m$  — средний состав груженого поезда, задержка которого происходит в связи с задержками локомотивов;  $f_1$  — соотношение между задержкой состава по отправлению и временем задержки локомотива на входе подсистемы,  $f_1 > 1$ ;  $c_{л.ч}^{п}$  — стоимость 1 поездного локомотиво-ч на участке;  $t_3$  — продолжительность задержки;  $e_{кэ}$  — стоимость энергии, затрачиваемой на одну остановку;  $f_2$  — число остановок, приходящееся на одну задержку.

Стоимость потерь кинетической энергии поездом находим по известной формуле

$$e_{кэ} = 3,8 v_T^2 (P + Q) e_a \cdot 10^{-6},$$

где  $P + Q$  — масса поезда брутто;  $v_T$  — скорость в начале торможения;  $e_a$  — расходная ставка на 1 т · км механической работы, руб.

При  $c_{л.ч}^{п} = 7,62$  руб. (локомотив ВЛ10), составе поезда 45 вагонов,  $e_{кэ} = 6,4$  руб. (масса поезда брутто 3000 т, начальная скорость при торможении 60 км/ч), стоимости 1 вагоно-ч  $c_{в.ч} = 0,238$  руб.,  $f_1 = 1,8$ ,  $f_2 = 1,75$  стоимость 1 ч задержки будет  $(0,238 \cdot 90 \cdot 1,8 + 7,62) 1 + 6,4 + 1,75 = 57,376$  руб. Если стоимость путевого развития не отнесена на стоимость 1 вагоно-ч, то при  $c_{в.ч} = 0,1634$  величина  $c_{ан} = (0,1634 \cdot 90 \cdot 1,8 + 7,62) 1 + 6,4 \cdot 1,75 = 45,291$  руб., а без учета дополнительного простоя в парке отправления, вызванного задержкой локомотива, т. е. при  $f_1 = 1$ ,  $c_{ан} = 33,52$  руб. Таким образом, отказы в работе станции сопряжены со значительными убытками.

Оптимальную надежность работы подсистемы можно установить непосредственным расчетом. В этом случае намечают меры, направ-

ленные на устранение отказов, определяют приведенные затраты на их осуществление, а затем сопоставляют их с потерями от задержек поездов за 1 год эксплуатации. Такие расчеты можно выполнять за несколько шагов, добиваясь на каждом шаге подбора таких мер, приведенные затраты по которым были бы сопоставимы с потерями от задержек поездов. Вариант целесообразен при выполнении условия

$$Z_1 - Z_2 \geq \frac{A}{t_0} + \mathcal{E}_{A_1} - \mathcal{E}_{B.ч}, \quad (8.4)$$

где  $Z_1$  — годовые приведенные потери от задержек поездов;  $Z_2$  — потери от задержек поездов, которые не устраняют рассматриваемые меры;  $A$  — капитальные вложения в принятом варианте;  $\mathcal{E}_{A_1}$  — эксплуатационные расходы;  $t_0$  — нормативный срок окупаемости;  $\mathcal{E}_{B.ч}$  — стоимость вагоно-часов сокращения простоя вагонов, если вариант обеспечивает сокращение простоя.

Определяют общие потери за 1 год, вызванные задержками поездов на подходах:

$$Z = N_{зп_1} c_{зп_1} + N_{зп_2} c_{зп_2} + \dots + N_{зп_n} c_{зп_n} + \Delta E_з, \quad (8.5)$$

где  $N_{зп_1}, N_{зп_2}, \dots, N_{зп_n}$  — число задержек поездов за время работы подсистемы  $t_1, t_2, \dots, t_n$  с размерами движения  $N_1, N_2, \dots, N_n$ ;  $c_{зп_1}, c_{зп_2}, \dots, c_{зп_n}$  — стоимость одной задержки поезда при освоении размеров движения  $N_1, N_2, \dots, N_n$ ;  $\Delta E_з$  — приведенные затраты на дополнительные пути в парке отправления, на предузловых станциях (в этом случае соответствующие расходы не должны учитываться в стоимости 1 вагоно-ч).

Следовательно, для расчета потерь от задержек необходимо знать суточные размеры движения в течение года, т. е. закон распределения этих величин, заданный рядом распределения, гистограммой и т. п. В один разряд можно относить размеры движения с отклонением  $\pm 5$  поездов. Это не повлияет на точность расчетов. Общая последовательность определения потерь от задержек следующая:

|                                       |                                                                                                        |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Размеры движения, поездов/сут         | $N_1, N_2, \dots, N_n, \sum_{i=1}^n N_i$                                                               |
| Продолжительность работы, сут         | $t_1, t_2, \dots, t_n, 365$                                                                            |
| Число задержанных поездов             | $N_{зп_1}, N_{зп_2}, \dots, N_{зп_n}, \sum_{i=1}^n N_{зп_i}$                                           |
| Средняя продолжительность задержки, ч | $t_{зп_1}, t_{зп_2}, \dots, t_{зп_n}$                                                                  |
| Стоимость задержки, руб.              | $c_{зп_1}, c_{зп_2}, \dots, c_{зп_n}$                                                                  |
| Потери от задержек за год, руб.       | $N_{зп_1} c_{зп_1}, N_{зп_2} c_{зп_2}, \dots,$<br>$N_{зп_n} c_{зп_n}, \sum_{i=1}^n N_{зп_i} c_{зп_i}.$ |

Определив потери от задержек поездов на первом шаге, выбирают варианты усиления подсистемы «ВхУ—ПП—Г», которые исключат или сократят задержки. Основные варианты: увеличение числа путей в парке прибытия, усиление сортировочной горки (если каналы ПТО и ЦТК неограничивающие). Из этих вариантов, связанных с капитальными затратами, выбирают тот, который в наибольшей мере сократит задержки поездов или вовсе их ликвидирует и вместе с тем потребует минимальных капиталовложений. Если варианты, каждый в отдельности, не исключают задержки, то может быть принят их комплекс — одновременное усиление парка прибытия и горки. Экономический уровень эксплуатационной надежности на первом шаге

$$p_{эу}^i = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n N^{i+1}}{\sum_{i=1}^n N}, \quad (8.6)$$

где  $\sum_{i=1}^n N^{i+1}$  — сумма задержек поездов, которые вызваны отказами в работе после осуществления мер  $i$ -го шага;  $N$  — общее число принятых за год поездов.

Таким образом, оптимальный уровень надежности после каждого этапа должен повышаться, т. е.  $p_{эу}^{(I)} < p_{эу}^{(II)} < \dots < p_{эу}^{(n)}$ . Задача состоит в том, чтобы максимально увеличить  $p_{эу}$ , обеспечив беспрепятственный прием поездов при условии выполнения установленных технологических норм и параметров. Анализ показывает, что устранение отказов в работе станций позволяет резко уменьшить потери в эксплуатации железных дорог и обеспечить за счет этого высокую эффективность капиталовложений, выделяемых на реконструкцию станций. Так, реконструкция сортировочной станции дороги обеспечила оптимальную надежность сортировочной системы и дала экономии эксплуатационных расходов около 465 тыс. руб. в год. Высокую эффективность капитальных затрат обеспечивает и реконструкция других сортировочных станций.

Оптимальный уровень эксплуатационной надежности подсистемы можно определить также, составив и проанализировав уравнения расходов, вызванных, с одной стороны, отказами в работе станций, и с другой — увеличением ее эксплуатационной надежности. Если суммарную вероятность отказа  $\bar{q}$  рассматривать как среднюю величину из множества ее значений  $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ , соответствующего множеству градаций размеров перерабатываемого потока в течение года  $N_1, N_2, N_3, \dots, N_n$ , то, приняв в расчете среднюю величину потока  $N$ , уравнение расходов запишем в следующем виде:

$$365 \bar{q} N t_з c_{зп} + \Pi^{пн} (\Delta A_{пн} + \mathcal{E}_{пн}) = (\Pi^{пн} - \Pi_{ф}^{пн}) (\Delta A_{пн} + \mathcal{E}_{пн}) + (\Delta A_{гн} + \mathcal{E}_{гн}) - \mathcal{E}_{B.ч}, \quad (8.7)$$

где  $P^{пр}$  — число путей, необходимое для размещения задержанных поездов на отдельных пунктах;  $P^{пн}$ ,  $P_{\phi}^{пн}$  — соответственно расчетное число путей в парке прибытия, при котором вероятность отказа в работе подсистемы из-за ее переполнения при выполнении установленных технологических параметров мала, и фактически имеющееся число путей в парке;  $A_{п}$ ,  $A_{г}$  — капитальные затраты на сооружение одного пути и горки;  $\Delta$  — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений;  $\Theta_{п}$  — эксплуатационные затраты на содержание одного пути;  $\Theta_{в.ч}$  — годовая стоимость вагоно-часов от сокращения простоя вагонов в результате реконструкции сортировочной горки.

Из уравнения (8.7) оптимальный уровень надежности через величину отказов выразим как

$$\bar{q} = \frac{[(P^{пн} - P_{\phi}^{пн})(\Delta A_{п} + \Theta_{п}) + (\Delta A_{г} + \Theta_{г})] - [(P^{пр} - P_{\phi}^{пн})(\Delta A_{п} + \Theta_{п}) + \Theta_{п}]}{365N t_{з} c_{зп}}; \quad (8.8)$$

$$\bar{q} > 0; [(P^{пн} - P_{\phi}^{пн})(\Delta A_{п} + \Theta_{п}) + (\Delta A_{г} + \Theta_{г})] - [P^{пр}(\Delta A_{п} + \Theta_{п}) + \Theta_{п}] \geq 0.$$

Для исследования уравнений (8.7) и (8.8) необходимо определить и изучить входящие в них элементы.

**Средняя задержка поезда  $t_{з}$ .** Необходимо установить функциональную зависимость этой величины от числа путей в парке прибытия  $P_{\phi}^{пн}$  и горочного технологического интервала  $t_{г}$  при заданном объеме работы, т. е. при заданной величине перерабатываемого поездопотока  $N$ . Для этого определим максимальную величину задержки.

Максимальный простой в подсистеме «ВхУ—ПП—Г» с вероятностью, близкой к нулю,

$$t = t_{г}(rT_{к} + 3\sigma_{т} - 1) - T_{к} + T_{техн}, \quad (8.9)$$

где  $T_{к}$  — период насыщения системы поездами, в течение которого возникает наибольший простой;  $rT_{к}$  — среднее число поездов, поступающее в подсистему за время  $T_{к}$  (интенсивность потока);  $\sigma_{т}$  — среднее квадратичное отклонение числа поступающих в подсистему поездов за время  $T_{к}$ ;  $T_{техн}$  — продолжительность занятия подсистемы технологическими операциями.

Как известно, наибольший простой на путях подсистемы равен  $P_{\phi}^{пн} t_{г}$ . Тогда максимальная задержка поезда на подходе

$$\begin{aligned} \max t_{з} &= t - P t_{г} = t_{г}(rT_{к} + 3\sigma_{т} - 1) - T_{к} + T_{техн} - \\ &- P_{\phi}^{пн} t_{г} = t_{г}[(rT_{к} + 3\sigma_{т}) - (P + 1)] + T_{техн} - T_{к}, \end{aligned}$$

или

$$\max t_{з} = t_{г}[(rT_{к} + 3\sigma_{т}) - (P_{\phi}^{пн} + 1)] + T_{техн} - T_{к}. \quad (8.10)$$

Так как загрузку горки выражают в виде  $r t_{г}$ , то вместо  $t_{г}$  правомерно поставить величину  $\frac{\gamma}{r}$ , где  $\gamma$  — коэффициент загрузки

горки (предполагается, что остальные каналы подсистемы не являются ограничивающими). С учетом этого получаем:

$$\max t_{з} = \frac{\gamma}{r} [(\bar{r}T_{к} + 3\sigma_{т}) - (P_{\phi}^{пн} + 1)] + T_{техн} - T_{к}. \quad (8.11)$$

Если заменить  $1/\bar{r}$  на средний интервал подвода поездов за 1 ч и отнести на время задержки продолжительность разгона и замедления  $t_{рз}$ , то

$$\max t_{з} = \bar{r} [(\bar{r}T_{к} + 3\sigma_{т}) - (P_{\phi}^{пн} + 1)] + T_{техн} - T_{к} + t_{рз}. \quad (8.12)$$

На рис. 8.1 показана зависимость  $\max t_{з}$  от числа путей в парке прибытия при загрузке горки 0,85. Так, при  $r = 2,5$  поезда/ч время максимальной задержки 1,2 ч, если в парке 3 пути, 0,55 ч (5 путей), 0,2 ч (6 путей). Число путей в парке и загрузка горки оказывают сильное влияние на продолжительность задержки поездов.

Минимальное время задержки можно определить по потере времени на разгон и замедление при условии, что сама продолжительность стоянки задержанного поезда равна нулю, т. е.  $\min t_{з} = t_{рз}$ .

Среднее время задержки

$$\begin{aligned} t_{з} &= a(\min t_{з}) + b(\max t_{з}); \\ 0 &< a < 1; \quad 0 < b < 1, \end{aligned} \quad (8.13)$$

где  $a$ ,  $b$  — параметры, численное значение которых можно установить из распределения времени задержки поездов.

Распределение времени задержанных поездов по всем подходам представляет собой композицию законов распределения таких ве-

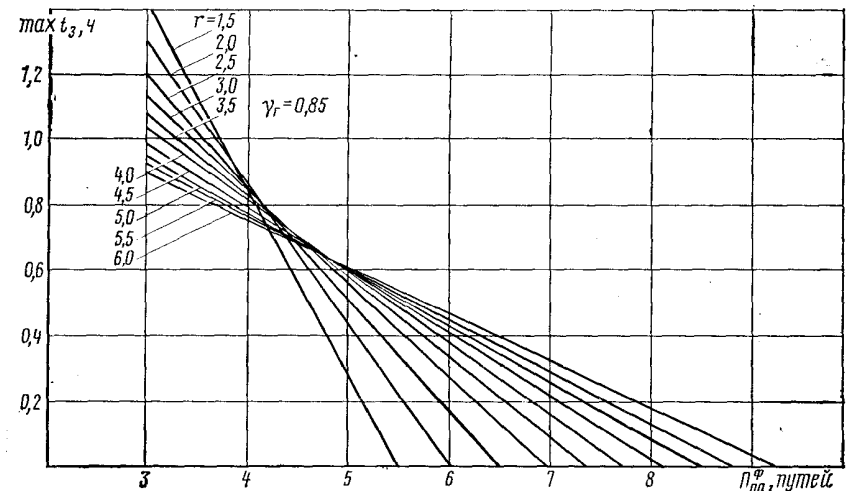


Рис. 8.1. Зависимость максимальной продолжительности задержки поездов на подходе от числа путей в парке прибытия

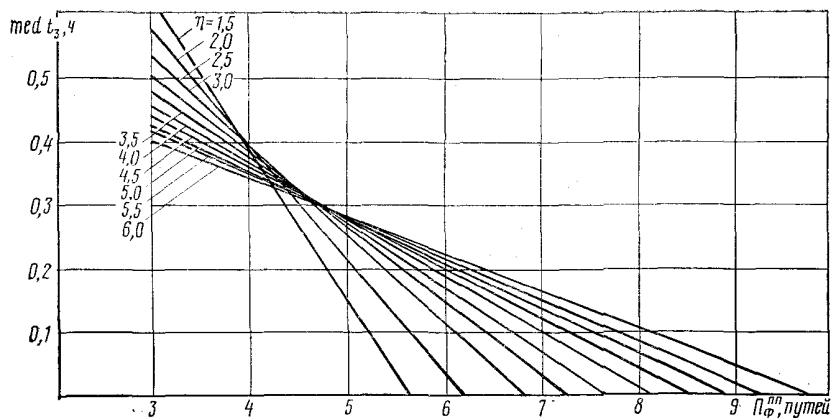


Рис. 8.2. Зависимость средней продолжительности задержки поездов на подходах от числа путей в парке прибытия

личин по каждому подходу в отдельности. Для логарифмически нормального распределения коэффициенты в формуле (8.13) соответственно равны:  $a = 0,58$ ;  $b = 0,42$ . Тогда расчетная формула средней задержки поезда примет вид

$$\bar{t}_3 = t_{p3} + 0,42 \{ \gamma \bar{t} [(rT_K + 3\sigma) - (P_{\Phi}^{np} + 1)] + T_{\text{тех}} - T_K \}. \quad (8.14)$$

На рис. 8.2 приведены графики зависимости  $\bar{t}_3$  от числа путей в парке прибытия  $P_{\Phi}^{np}$  при загрузке горки 0,85. Так, при  $r = 2,5$  поезда/ч и  $P_{\Phi}^{np} = 3$  средняя задержка равна 0,534 ч, при  $P_{\Phi}^{np} = 4$  задержка 0,392 ч, при  $P_{\Phi}^{np} = 5$  задержка 0,216 ч и т. д. Так же, как и максимальное время задержки, среднее время резко повышается при увеличении загрузки сортировочной горки.

Эти параметры необходимы для исследования уравнения расходов (8.8) и анализа оптимального уровня надежности работы подсистемы.

Кроме того, необходимо установить зависимость дополнительного числа путей на отдельных пунктах  $P^{np}$  для обгона задержанных поездов пассажирскими и другими срочными поездами от времени максимальной задержки поезда. Число этих путей определим исходя из подвода за период  $T_K$  такого числа поездов  $(rT_K + 3\sigma)$ , при котором определена максимальная их задержка, т. е.

$$P^{np} = \frac{\{ \gamma \bar{t} [(rT_K + 3\sigma) - (P_{\Phi}^{np} + 1)] + T_{\text{тех}} + t_{p3} - T_K \} (rT_K + 3\sigma)}{T_K}. \quad (8.15)$$

Эта зависимость свидетельствует о взаимосвязи дополнительного числа путей на отдельных пунктах с числом путей в парке прибытия, загрузкой горки, величиной поступающего в подсистему по-

ездопотока, периодом сгущенного подвода поездов, неравномерностью подвода и другими параметрами.

Для абсолютного большинства градаций размеров движения экономический уровень надежности  $P_{\text{эу}}^{\text{опт}} \approx 1$ , а уровень отказов  $q_{\text{эу}}^{\text{опт}} \approx 0$ . Для отдельных градаций  $P_{\text{эу}}^{\text{опт}}$  составляет 0,936—0,997, а уровень отказов  $q_{\text{эу}}^{\text{опт}}$  соответственно 0,064—0,008.

При анализе этих зависимостей мы исходим из того, что в периоде наибольшего сгущения подвода поездов техническая надежность вагонов, локомотивов, пути, устройств АТС и др. обеспечивает полностью работоспособность системы, т. е. вероятность технических отказов в этом периоде принята равной нулю. Однако отказы технических средств, технологические отказы по управляющему и информационному комплексам влияют на продолжительность горочного технологического интервала, продолжительность обработки составов в парке каналами ПТО и ЦТК, что необходимо учитывать при разработке методов обоснования путевого развития парков станций.

### 8.3. Экономический уровень надежности работы подсистемы «Г—ПФ—ВФ»

Отказы в работе подсистемы — прекращение распуска поездов на некоторые промежутки времени — также сопряжены со значительными дополнительными затратами. Исследовать оптимальную надежность функционирования этой подсистемы можно, сопоставив суммарные потери, вызванные отказами в работе, с приведенными расходами, необходимыми для обеспечения безотказной работы. Рассмотрим порядок определения элементов затрат, связанных с отказами.

1. Дополнительные затраты локомотиво-часов на повторную сортировку вагонов

$$B_{\text{л.ч}} = 365 \bar{q} N_{\Phi} \bar{t}_{\text{л}} c_{\text{л.ч}}, \quad (8.16)$$

где  $\bar{t}_{\text{л}}$  — средняя продолжительность занятия локомотива при одном отказе в работе подсистемы.

Если выразить величину  $\bar{t}_{\text{л}}$  через среднее время работы  $\bar{t}_{\text{нп}}$ , в течение которого вагоны распускают на неспециализированные пути, число повторно сортируемых вагонов в среднем на один отказ  $\frac{N_{\Phi} \bar{t}_{\text{нп}}}{24}$   $m_{\Phi}$  и удельные затраты локомотиво-часов  $t_{\text{уд}}^{\text{л}}$  на один повторно сортируемый вагон, то стоимость дополнительных затрат локомотиво-часов

$$B_{\text{л.ч}} = \frac{365 \bar{q} N_{\Phi}^2 \bar{t}_{\text{нп}} m_{\Phi} t_{\text{уд}}^{\text{л}}}{24} c_{\text{л.ч}}. \quad (8.16a)$$

2. Время занятия сортировочной горки повторным роспуском, приходящееся на один расформировываемый состав,

$$\Delta \bar{t}_r = \frac{\bar{q} N_{\Phi}^2 t_{\text{нп}} m_{\Phi} t_{\text{уд}}^r}{24 N_p}, \quad (8.17)$$

где  $t_{\text{уд}}^r$  — удельное время занятия горки, приходящееся на один повторно сортируемый вагон.

Зная величину  $\Delta \bar{t}_r$ , можно определить пропорциональное ей число дополнительных путей

$$\Delta \Pi^{\text{пп}} = \frac{[\Delta \bar{t}_r (r T_K + 3\sigma - 1) + t_r (r T_K + 3\sigma - 1)] - T_K + T_{\text{зп}}}{t_r} = \frac{\Delta \bar{t}_r (r T_K + 3\sigma - 1)}{t_r}. \quad (8.18)$$

Приведенную стоимость дополнительного путевого развития подсистемы «ВхУ—ПП—Г» в связи с отказами в работе подсистемы «Г—ПФ—ВФ» определяем по формуле

$$E_{\Delta \Pi} = \frac{\Delta \bar{t}_r (r T_K + 3\sigma - 1)}{t_r} (\Delta A_{\Pi} + \mathcal{E}_{\Pi}). \quad (8.19)$$

Расчет дополнительной потребности путей в подсистеме «ВхУ—ПП—Г» в связи с отказами в работе подсистемы «Г—ПФ—ВФ» учитывает взаимное влияние в работе подсистем: отказ подсистемы «Г—ПФ—ВФ» вызывает увеличение горочного технологического интервала, а это в свою очередь — увеличение числа путей парка прибытия.

3. Отказы в работе подсистемы «Г—ПФ—ВФ» вызывают также дополнительную затрату вагоно-часов в парках прибытия и формирования. Потери от увеличения простоя в парке прибытия

$$\mathcal{E}_{\text{в.ч}}^{\text{пп}} = 365 N_p t'_{\text{ож}} m_p c_{\text{в.ч}}, \quad (8.20)$$

где  $t'_{\text{ож}}$  — средний простой составов в ожидании расформирования, вызванный увеличением горочного технологического интервала.

Кроме того, возникают потери от некоторого увеличения простоев под накоплением составов, пропорциональные величине  $\Delta t_r$ :

$$\mathcal{E}_{\text{в.ч}}^{\text{пф}} = 365 \Delta t_r N_{\Phi} (m_{\Phi} - m_{\text{зг}}) = 365 \frac{\bar{q} N_{\Phi}^2 m_{\Phi} \bar{t}_{\text{нп}} t_{\text{уд}}^r}{24} z (m_{\Phi} - m_{\text{зг}}), \quad (8.21)$$

где  $z$  — отношение числа формируемых за сутки поездов к числу расформировываемых за тот же период времени;  $m_{\text{зг}}$  — средняя величина замыкающих групп вагонов.

4. В связи с ростом величины горочного технологического интервала сокращается потенциальная перерабатывающая способность сортировочной горки. Суточная величина этого сокращения

$$\Delta n_r = \left( \frac{\Delta \bar{t}_r m_p}{t_r} \right) N_p = \frac{\bar{q} N_{\Phi}^2 \bar{t}_{\text{нп}} m_p m_{\Phi} t_{\text{уд}}^r}{24 t_r}. \quad (8.22)$$

Годовые потери в связи с уменьшением перерабатывающей способности станции определим через себестоимость переработки одного вагона  $e_{\text{пер}}$ . Тогда

$$\mathcal{E}_{\text{пер}} = \frac{365 \bar{q} N_{\Phi}^2 \bar{t}_{\text{нп}} m_p m_{\Phi} t_{\text{уд}}^r}{24 t_r} e_{\text{пер}}. \quad (8.23)$$

Суммарные потери за год, возникающие в связи с отказами в работе подсистемы «Г—ПФ—ВФ», по четырем составляющим

$$\Sigma \mathcal{E}_{\text{от}} = \bar{q} \frac{N_{\Phi}^2 m_{\Phi} \bar{t}_{\text{нп}}}{24} \left\{ 365 \left[ t_{\text{уд}}^r c_{\text{л.ч}} + t_{\text{уд}}^r z (m_{\Phi} - m_{\text{зг}}) c_{\text{в.ч}} + \frac{m_p}{t_r} t_{\text{уд}}^r e_{\text{пер}} + 0,35 \Pi^{\text{пп}} t_{\text{уд}}^r m_p c_{\text{в.ч}} \right] + \frac{t_{\text{уд}}^r}{t_r N_p} (r T_K + 3\sigma - 1) \times \right. \\ \left. \times (\Delta A_{\Pi}^{\text{пп}} + \mathcal{E}_{\Pi}^{\text{пп}}) \right\}. \quad (8.24)$$

Продолжительность работы, в течение которой вагоны направляют на неспециализированные пути, определим по формуле

$$t_{\text{нп}} = a \{ I_{\text{в}} [(r T_K + 3\sigma) - (P_{\text{фн}} + 1)] + \bar{t}_{\text{оф}} - T_K \}, \quad (8.25)$$

где  $a$  — статистический параметр распределения;  $P_{\text{фн}}$  — число путей парка формирования составов, необходимость в которых определяют неравномерностью накопления и другие факторы (разность между общим числом путей в парке формирования и числом назначений плана формирования, а также путей для местных вагонов и других целей).

Для устранения отказов необходимо иметь такое путевое развитие подсистемы «Г—ПФ—ВФ», которое обеспечит практически полное удовлетворение потребностей в сортировочных путях при наибольшем сгущении за период  $T_K$ . Если фактическое число путей составляет  $P_{\text{фн}}$ , то увеличение путевого развития

$$\Delta \Pi = \frac{\gamma_{\text{в}} (r T_K + 3\sigma - 1) - r T_K}{\gamma_{\text{в}}} - P_{\text{фн}}. \quad (8.26)$$

Выразим коэффициент загрузки каналов  $\gamma_{\text{в}} = r I_{\text{в}}$ . Тогда

$$\Delta \Pi = \frac{\gamma_{\text{в}} (r T_K + 3\sigma - 1) - T_K r}{\gamma_{\text{в}}} - P_{\text{фн}}. \quad (8.27)$$

При расчете  $\Delta \Pi$  вначале устанавливают параметры  $\sigma$  и  $T_K$  как функции от  $\gamma$  и  $r$ , а затем и число путей.

Приведенные расходы на создание условий для безотказной работы подсистемы можно рассчитать по формуле

$$E_{\text{бo}} = \left[ \frac{\gamma (rT_K + 3\sigma_T - 1) - rT_K}{\gamma} - P_{\text{фн}} \right] (\Delta A_{\text{п}}^{\text{нф}} + \mathcal{E}_{\text{п}}^{\text{нф}}), \quad (8.28)$$

где  $A_{\text{п}}^{\text{нф}}$  — капитальные затраты на сооружение одного пути в парке формирования;  $\mathcal{E}_{\text{п}}^{\text{нф}}$  — эксплуатационные расходы на содержание пути.

Экономическую оценку надежности работы подсистемы определим, приравняв суммарные потери и расходы по обеспечению безотказной работы подсистемы:

$$\begin{aligned} \bar{q} = & \frac{N_{\text{ф}}^2 m_{\text{ф}} \bar{t}_{\text{пн}}}{24} \left\{ 365 \left[ t_{\text{уд}}^{\text{л}} c_{\text{л.ч}} + t_{\text{уд}}^{\text{л}} z (m_{\text{ф}} - m_{\text{зг}}) c_{\text{в.ч}} + \right. \right. \\ & \left. + \frac{m_{\text{р}}}{t_{\text{г}}} t_{\text{уд}}^{\text{г}} e_{\text{пер}} + 0,35 P^{\text{нп}} t_{\text{уд}}^{\text{г}} m_{\text{р}} c_{\text{в.ч}} \right] + \\ & \left. + \frac{t_{\text{уд}}^{\text{г}}}{t_{\text{г}} N_{\text{р}}} (rT_K + 3\sigma_T - 1) (\Delta A_{\text{п}}^{\text{нп}} + \mathcal{E}_{\text{п}}^{\text{нп}}) \right\} = \\ = & \left[ \frac{I_{\text{в}} (rT_K + 3\sigma_T - 1) - MT_K}{T_{\text{ц}}} - P_{\text{фн}} \right] (\Delta A_{\text{п}}^{\text{нф}} + \mathcal{E}_{\text{п}}^{\text{нф}}). \end{aligned}$$

Подставив значение  $I_{\text{в}}$ , получим:

$$\begin{aligned} \bar{q} = & \frac{N_{\text{ф}}^2 m_{\text{ф}}}{24} 0,39 \{ I_{\text{в}} [(rT_K + 3\sigma_T) - (P_{\text{фн}} + 1)] + \bar{t}_{\text{оф}} - T_K \} \times \\ & \times \left\{ 365 \left[ t_{\text{уд}}^{\text{л}} c_{\text{л.ч}} + t_{\text{уд}}^{\text{л}} z (m_{\text{ф}} - m_{\text{зг}}) c_{\text{в.ч}} + \frac{m_{\text{р}}}{t_{\text{г}}} t_{\text{уд}}^{\text{г}} e_{\text{пер}} + \right. \right. \\ & \left. + 0,35 P^{\text{нп}} t_{\text{уд}}^{\text{г}} m_{\text{р}} c_{\text{в.ч}} \right] + \frac{t_{\text{уд}}^{\text{г}}}{t_{\text{г}} N_{\text{р}}} (rT_K + 3\sigma_T - 1) (\Delta A_{\text{п}}^{\text{нп}} + \mathcal{E}_{\text{п}}^{\text{нп}}) \right\} = \\ = & \left[ \frac{I_{\text{в}} (rT_K + 3\sigma_T - 1) - T_K}{I_{\text{в}}} - P_{\text{фн}} \right] (\Delta A_{\text{п}}^{\text{нф}} + \mathcal{E}_{\text{п}}^{\text{нф}}). \quad (8.29) \end{aligned}$$

Решим уравнение (8.29) относительно  $\bar{q}$ :

$$\begin{aligned} \bar{q} = & \frac{24 \left[ \frac{I_{\text{в}} (rT_K + 3\sigma_T - 1) - T_K}{I_{\text{в}}} - P_{\text{фн}} \right] (\Delta A_{\text{п}}^{\text{нф}} + \mathcal{E}_{\text{п}}^{\text{нф}})}{N_{\text{ф}}^2 m_{\text{ф}} \{ 0,39 [I_{\text{в}} (rT_K + 3\sigma_T) - (P_{\text{фн}} + 1)] + \bar{t}_{\text{оф}} - T_K \} \times} \\ & \times \left\{ 365 \left[ t_{\text{уд}}^{\text{л}} c_{\text{л.ч}} + t_{\text{уд}}^{\text{л}} z (m_{\text{ф}} - m_{\text{зг}}) c_{\text{в.ч}} + \frac{m_{\text{р}}}{t_{\text{г}}} t_{\text{уд}}^{\text{г}} e_{\text{пер}} + \right. \right. \\ & \left. + 0,35 P^{\text{нп}} t_{\text{уд}}^{\text{г}} m_{\text{р}} c_{\text{в.ч}} \right] + \frac{t_{\text{уд}}^{\text{г}}}{t_{\text{г}} N_{\text{р}}} (rT_K + 3\sigma_T - 1) (\Delta A_{\text{п}}^{\text{нп}} + \mathcal{E}_{\text{п}}^{\text{нп}}) \right\} \quad (8.30) \end{aligned}$$

Если допустить  $m_{\text{р}} = m_{\text{ф}} = m$ ;  $z = 1$ ;  $A_{\text{п}}^{\text{нп}} = A_{\text{п}}^{\text{нф}} = A_{\text{п}}$ ;  $N_{\text{ф}} = N_{\text{р}} = N$ ;  $\mathcal{E}_{\text{п}}^{\text{нп}} = \mathcal{E}_{\text{п}}^{\text{нф}} = \mathcal{E}_{\text{п}}$ , а также заменить  $I_{\text{в}}$  на  $\frac{\gamma_{\text{в}}}{r}$ ,  $t_{\text{г}}$  на  $\frac{\gamma_{\text{г}}}{r}$ , то выражение (8.30) примет вид

$$\begin{aligned} \bar{q} = & \frac{\left[ \frac{\gamma_{\text{в}} (rT_K + 3\sigma_T - 1) - T_K r}{\gamma_{\text{в}}} - P_{\text{фн}} \right] (\Delta A_{\text{п}} + \mathcal{E}_{\text{п}})}{24 r^2 m 0,39 \left\{ \frac{\gamma_{\text{в}}}{r} [(rT_K + 3\sigma_T) - (P_{\text{фн}} + 1)] + \bar{t}_{\text{оф}} - T_K \right\} \times} \quad (8.31) \\ & \times \left\{ 365 \left[ t_{\text{уд}}^{\text{л}} c_{\text{л.ч}} + t_{\text{уд}}^{\text{г}} (m_{\text{ф}} - m_{\text{зг}}) c_{\text{в.ч}} + \frac{m_{\text{р}}}{\gamma_{\text{г}}} t_{\text{уд}}^{\text{г}} e_{\text{пер}} + \right. \right. \\ & \left. + 0,35 P^{\text{нп}} t_{\text{уд}}^{\text{г}} m c_{\text{в.ч}} \right] + \frac{t_{\text{уд}}^{\text{г}}}{\gamma_{\text{г}} \cdot 24} (rT_K + 3\sigma_T - 1) (\Delta A_{\text{п}} + \mathcal{E}_{\text{п}}) \right\} \end{aligned}$$

При расчетах величины  $\bar{q}$  должны выполняться следующие ограничения:

$$\frac{\gamma_{\text{в}} (rT_K + 3\sigma_T - 1) - T_K r}{\gamma_{\text{в}}} - P_{\text{оф}} > 0;$$

$$\frac{\gamma_{\text{в}}}{r} [(rT_K + 3\sigma_T) - (P_{\text{ф}} + 1)] + \bar{t}_{\text{оф}} - T_K > 0.$$

На рис. 8.3 приведен график зависимости  $\bar{q} = f(r)$  для разных значений, входящих в расчетную формулу параметров.

Исследования показали, что экономический уровень надежности работы подсистемы «Г—ПФ—ВФ» достаточно высок и с ростом интенсивности потока функция отказов сокращается, а надежность возрастает. Так, при  $r = 2$  состава/ч оптимальный уровень надежности при разных нагрузках составляет не менее 0,87—0,99, т. е. при этой плотности потока можно допускать от 1 до 13 % изменений специализации с использованием частично занятых вагонами других назначений сортировочных путей. При  $r = 3$  состава/ч надежность работы подсистемы возрастает до 0,94—0,98, а при  $r = 6$  составов/ч она еще выше — 0,98.

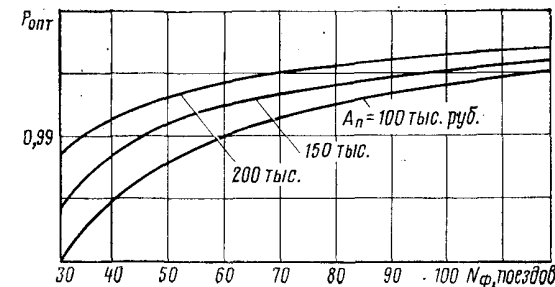


Рис. 8.3. Оптимальный уровень надежности работы подсистемы «Г—ПФ—ВФ»

#### 8.4. Экономический уровень надежности работы подсистемы «ВФ—ПО—ВыхУ»

Отказы в работе подсистемы «ВФ—ПО—ВыхУ» — задержки выставки сформированных составов из подсистемы «Г—ПФ—ВФ» — влияют на работу двух подсистем: «ВхУ—ПП—Г» и «Г—ПФ—ВФ». Это влияние вызывает эксплуатационно-экономические потери, к которым относят затраты на повторную переработку вагонов в связи с вынужденным изменением специализации назначений плана формирования; расходы на увеличение числа путей в подсистеме «ВхУ—ПП—Г» из-за увеличения горочного технологического интервала за счет дополнительной повторной переработки вагонов; дополнительные затраты вагоно-часов в парках прибытия и формирования, вызванные увеличением горочного интервала; потери в использовании потенциальной перерабатывающей способности сортировочной горки.

Таким образом, потери, вызванные отказами в работе подсистемы «ВФ—ПО—ВыхУ», аналогичны потерям в связи с отказами собственно подсистемы «Г—ПФ—ВФ». Однако в этом случае причина их возникновения иная — недостаточное путевое развитие парка отправления. Поэтому при анализе эксплуатационной надежности подсистемы «ВФ—ПО—ВыхУ» и определении ее оптимального экономического уровня будет справедливо уравнение расходов, разработанное для предыдущей подсистемы. В этом случае величину  $t_{\text{пп}}$  — среднюю продолжительность работы, в течение которой роспуск вагонов идет на неспециализированные пути, — определяют исходя из продолжительности отказов подсистемы «ВФ—ПО—ВыхУ».

Максимальная продолжительность отказа этой подсистемы

$$\max t_3^B = I_{\text{ро}} [(rT_K + 3\sigma_T) - (P_{\text{ф}}^{\text{по}} + 1)] - T_K, \quad (8.32)$$

где  $I_{\text{ро}}$  — расчетный интервал отправления;  $P_{\text{ф}}^{\text{по}}$  — число путей в парке отправления подсистемы (без учета ходовых и других дополнительных путей).

Если выразить  $I_{\text{ро}}$  как  $\frac{\gamma_{\text{вх}}}{r}$ , где  $\gamma_{\text{вх}}$  — коэффициент загрузки выходного канала подсистемы, то

$$\max t_3^B = \gamma_{\text{вх}} I_0 [(rT_K + 3\sigma_T) - (P_{\text{ф}}^{\text{по}} + 1)] - T_K, \quad (8.32a)$$

где  $I_0$  — средний интервал отправления поездов.

Среднюю продолжительность отказов можно определить по формуле

$$t_{\text{пп}}^B = b \min t_3^B + a \{ \gamma_{\text{вх}} I_0 [(rT_K + 3\sigma_T) - (P_{\text{ф}}^{\text{по}} + 1)] - T_K \}, \quad (8.33)$$

где  $a, b$  — статистические параметры распределения величины отказов;  $a < 1$ ;  $b < 1$ ;  $a + b = 1$ .

Подсистема работает надежно (при выполнении установленных технологических параметров), если она обеспечивает беспрепятственную выставку составов в периоде  $T_K$ . Тогда стоимость необходимого увеличения числа путей в подсистеме, если всего их  $P_{\text{ф}}^{\text{по}}$ ,

$$\Delta P^{\text{по}} = \left[ \frac{\gamma_{\text{вх}} (rT_K + 3\sigma_T - 1) - r(T_K - T_{\text{зп}})}{\gamma_{\text{вх}}} - P_{\text{ф}}^{\text{по}} \right] (\Delta A_{\text{п}} - \Delta_{\text{п}}), \quad (8.34)$$

где  $T_{\text{зп}}$  — технологическое время занятия отправочного пути.

С учетом уравнения (8.33) и (8.31) запишем уравнение расходов для подсистемы «ВФ—ПО—ВыхУ»:

$$\begin{aligned} & \frac{N_{\text{ф}} m_{\text{ф}}}{24} \{ b \min t_3^B + a \{ \gamma_{\text{вх}} I_0 [(rT_K + 3\sigma_T) - (P_{\text{ф}}^{\text{по}} + 1)] - T_K \} \} \times \\ & \times \left\{ 365 \left[ t_{\text{уд}}^{\text{п}} c_{\text{л.ч}} + t_{\text{уд}}^{\text{г}} z (m_{\text{ф}} - m_{\text{зг}}) c_{\text{в.ч}} + \frac{m_{\text{ф}}}{t_{\text{г}}} t_{\text{уд}}^{\text{г}} e_{\text{пер}} + \right. \right. \\ & \left. \left. + 0,35 P_{\text{пп}}^{\text{пп}} t_{\text{уд}}^{\text{г}} m_{\text{р}} c_{\text{в.ч}} \right] + \frac{t_{\text{уд}}^{\text{г}}}{t_{\text{г}} N_{\text{р}}} (rT_K + 3\sigma_T - 1) (\Delta A_{\text{п}} + \Delta_{\text{п}}) \right\} + \\ & + \left[ \frac{\gamma_{\text{вх}} (rT_K + 3\sigma_T - 1) - r(T_K - T_{\text{зп}})}{\gamma_{\text{вх}}} - P_{\text{ф}}^{\text{по}} \right] (\Delta A_{\text{п}} + \Delta_{\text{п}}). \end{aligned} \quad (8.35)$$

Отсюда экономический приемлемый уровень отказов в подсистеме

$$\begin{aligned} \bar{q} = & \frac{\left[ \frac{\gamma_{\text{вх}} (rT_K + 3\sigma_T - 1) - r(T_K - T_{\text{зп}})}{\gamma_{\text{вх}}} - P_{\text{ф}}^{\text{по}} \right] (\Delta A_{\text{п}} + \Delta_{\text{п}})}{\frac{N_{\text{ф}}^2 m_{\text{ф}}}{24} \{ b \min t_3^B + a \{ \gamma_{\text{вх}} I_0 [(rT_K + 3\sigma_T) - (P_{\text{ф}}^{\text{по}} + 1)] - T_K \} \} \times \\ & \times \left\{ 365 \left[ t_{\text{ур}} c_{\text{л.ч}} + t_{\text{уд}}^{\text{г}} z (m_{\text{ф}} - m_{\text{зг}}) c_{\text{в.ч}} + \frac{m_{\text{р}}}{t_{\text{г}}} t_{\text{уд}}^{\text{г}} e_{\text{пер}} + \right. \right. \\ & \left. \left. + 0,35 P_{\text{пп}}^{\text{пп}} t_{\text{уд}}^{\text{г}} m_{\text{р}} c_{\text{в.ч}} \right] + \frac{t_{\text{уд}}^{\text{г}}}{t_{\text{г}} N_{\text{р}}} (rT_K + 3\sigma_T - 1) (\Delta A_{\text{п}} + \Delta_{\text{п}}) \right\}} \end{aligned} \quad (8.36)$$

При расчетах по формуле (8.36) необходимо учитывать ограничения:

$$\frac{\gamma_{\text{вх}} (rT_K + 3\sigma_T - 1) - r(T_K - T_{\text{зп}})}{\gamma_{\text{вх}}} - P_{\text{ф}}^{\text{по}} > 0;$$

$$b \min t_3^B + a \{ \gamma_{\text{вх}} I_0 [(rT_K + 3\sigma_T) - (P_{\text{ф}}^{\text{по}} + 1)] - T_K \} > 0.$$

Приняв  $m_{\text{р}} = m_{\text{ф}} = m$ ;  $z = 1$ ;  $A_{\text{п}}^{\text{пп}} = A_{\text{п}}^{\text{пф}} = A_{\text{п}}$ ;  $N_{\text{ф}} = N_{\text{р}} = N$ ;  $\Delta_{\text{п}}^{\text{пп}} = \Delta_{\text{п}}^{\text{пф}} = \Delta_{\text{п}}$ ;  $t = \frac{\gamma_{\text{г}}}{r}$ , получим:

$$\begin{aligned} \bar{q} = & \frac{24 \left[ \frac{\gamma_{\text{вх}} (rT_K + 3\sigma_T - 1) - r(T_K - T_{\text{зп}})}{\gamma_{\text{вх}}} - P_{\text{ф}}^{\text{по}} \right] (\Delta A_{\text{п}} + \Delta_{\text{п}})}{Nm \{ b \min t_3^B + a \{ \gamma_{\text{вх}} I_0 [(rT_K + 3\sigma_T) - (P_{\text{ф}}^{\text{по}} + 1)] - T_K \} \} \times \\ & \times \left\{ 365 \left[ t_{\text{уд}}^{\text{п}} c_{\text{л.ч}} + t_{\text{уд}}^{\text{г}} (m - m_{\text{зг}}) c_{\text{в.ч}} + \frac{mr}{\gamma_{\text{г}}} t_{\text{уд}}^{\text{г}} e_{\text{пер}} + \right. \right. \\ & \left. \left. + 0,35 P_{\text{пп}}^{\text{пп}} t_{\text{уд}}^{\text{г}} m c_{\text{в.ч}} \right] + \frac{t_{\text{уд}}^{\text{г}}}{\gamma_{\text{г}} \cdot 24} (rT_K + 3\sigma_T - 1) (\Delta A_{\text{п}} + \Delta_{\text{п}}) \right\}} \end{aligned} \quad (8.37)$$

Например, при  $r = 4$  поезда/ч, фактическом числе путей в парке формирования  $П_{\Phi}^{\text{по}} = 6$  и коэффициенте загрузки выходного канала  $\gamma = 0,8$  экономический уровень надежности составляет 0,965, а при  $r = 6$  поездов/ч и тех же исходных данных — 0,982. Как показали расчеты, с ростом интенсивности потока экономический уровень надежности также возрастает. На наиболее загруженных сортировочных станциях (Свердловск-Сортировочный, Челябинск-Главный, Минск-Товарный, Инская, Ясиноватая, Дебальцево-Сортировочное и др.) экономически выгодно иметь надежное путевое развитие подсистем. Основное направление обеспечения высокой эксплуатационной надежности работы сортировочных станций — интенсификация станционных процессов, улучшение использования путевого развития и повышение производительности выходных каналов подсистем. Этому способствуют также проводимые меры по улучшению дисциплины выполнения графика движения, развитию информационной связи, повышению глубины и достоверности информации, более эффективному использованию ЭВМ в управлении перевозочным процессом.

## ГЛАВА 9

### МЕТОДИКА И ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОГО ПУТЕВОГО РАЗВИТИЯ ОСНОВНЫХ ПАРКОВ УЧАСТКОВЫХ, СОРТИРОВОЧНЫХ И ГРУЗОВЫХ СТАНЦИЙ

#### 9.1. Оптимальное путевое развитие подсистемы «Входные участки — парк прибытия — сортировочная горка»

Сортировочная система станции состоит из регулярно взаимодействующих элементов: входных участков ВхУ, парка прибытия ПП, сортировочной горки Г, парка формирования ПФ, вытяжных путей ВФ, парка отправления ПО и выходных участков ВыхУ, которые объединяют в отдельные подсистемы, имеющие завершённое функциональное назначение. При этом выходящий поток одной подсистемы является входящим для другой. Вот почему важнейшим условием надежности станции является бесперебойная работа всех ее подсистем, а также входящих в них каналов и линий.

Основными технологическими параметрами подсистем сортировочной станции являются время на выполнение технологических операций по приему поездов, подготовке к расформированию и время занятия пути при надвиге состава на горку  $T_{\text{ан}}^{\text{пн}}$ , горочный тех-

нологический интервал  $I_{\text{т}}$ , технологические интервалы по каналам ПТО  $I_{\text{пто}}$ , ПКО  $I_{\text{пко}}$ , ЦТК  $I_{\text{цтк}}$  [39].

Входящий в подсистему поток поездов может поступать в формирование одновременно по нескольким каналам в зависимости от числа подходов, специализированных по направлениям, но для беспрепятственного приема необходимо достаточное число параллельных маршрутов во входной горловине. В этом случае маршруты приема поездов в подсистему являются параллельно работающими элементами.

Заполнение путей приема подсистемы поездами зависит от интенсивностей входного потока перерабатываемых поездов, обслуживания составов бригадами ПТО, ПКО, обработки документов в технической конторе и расформирования составов на горке. Пути приема функционируют как параллельные элементы. Но при выходе нескольких путей может произойти и отказ парка приема в целом.

Число путей надвига определяет возможность параллельного или параллельно-последовательного надвига составов на сортировочную горку. При одном пути — последовательный надвиг составов, при двух и более путях — параллельный надвиг составов на горку. В этом случае отказ одного из путей надвига может привести к невозможности осуществлять параллельный надвиг составов на горку со всех или части путей парка приема.

Сортировочная горка, как правило, — одноканальное обслуживающее устройство. В периоды, когда на горке проводится параллельный роспуск, она является двухканальным обслуживающим устройством.

Каждую отдельно работающую бригаду пунктов технического и коммерческого осмотра рассматривают как отдельный элемент подсистемы. Поэтому она может быть одно- или многоэлементной. Функционально бригады ПТО и ПКО работают параллельно. Время обработки составов в техническом и коммерческом отношении, в связи с тем что в каждом поезде разное число вагонов, характеризует функция надежности, зависящая от числа вагонов в составе  $m$  и работников в одной бригаде  $n$ , т. е.:

$$t_{\text{пто}} = f(m; n);$$

$$t_{\text{пко}} = f(m; n);$$

$$p(t_{\text{пто}}) = p\{T_{\text{пто}} \geq t_{\text{пто}}\};$$

$$p(t_{\text{пко}}) = p\{T_{\text{пко}} \geq t_{\text{пко}}\},$$

где  $t_{\text{пто}}$ ,  $t_{\text{пко}}$  — время обслуживания состава одной бригадой ПТО и одной бригадой ПКО (одним элементом);  $p(t_{\text{пто}})$ ,  $p(t_{\text{пко}})$  — функции надежности выполнения норматива этого времени;  $T_{\text{пто}}$ ,  $T_{\text{пко}}$  — продолжительность безотказной работы всех элементов ПТО и ПКО.

Одновременно с ПТО и ПКО работает техническая контора ТК, операторы которой обрабатывают грузовые документы. Время на обработку зависит от числа документов, оформленных на вагоны состава  $d$ , и числа операторов  $n_0$ , т. е.

$$t_{\text{тк}} = f(d, n_0).$$

Функция надежности этого времени

$$p(t_{\text{ТР}}) = p\{T_{\text{ТР}} > t_{\text{ТР}}\}.$$

Ограничивающим интервалом подсистемы «ВхУ—ПП—Г» является горочный технологический интервал, который оказывает решающее влияние на простои, путевое развитие и эксплуатационную надежность работы станций. Горочный технологический интервал, мин, рассчитывают по формуле

$$I_{\text{Г}} = \frac{T_{\text{Ц}}}{n_{\text{Ц}}},$$

где  $T_{\text{Ц}}$  — продолжительность цикла работы сортировочной горки по расформированию группы составов;  $n_{\text{Ц}}$  — число расформированных за цикл составов поездов.

При параллельном роспуске составов горочный технологический интервал можно рассчитать по формуле

$$I_{\text{Г}} = t'_{\text{Г}}(1 - \kappa) + \kappa t''_{\text{Г}} + \alpha \frac{m_{\text{с}}}{m_{\text{п}}} t_{\text{п}},$$

где  $t'_{\text{Г}}$  — горочный технологический интервал при последовательном роспуске составов;  $t''_{\text{Г}}$  — то же при параллельном роспуске двух составов;  $\kappa$  — коэффициент параллельности;  $\alpha$  — коэффициент повторной сортировки;  $m_{\text{п}}$  — число вагонов в составе при повторной сортировке;  $m_{\text{с}}$  — то же в составе, поступившем в расформирование.

Параметры  $t'_{\text{Г}}$  и  $t''_{\text{Г}}$  определяют графическим моделированием работы сортировочной горки.

Техническую готовность подсистемы «ВхУ—ПП—Г» можно рассматривать как по типам устройств, обеспечивающих перемещение поездов и вагонов на станции — автоматика, телемеханика, связь, путь, контактная сеть, информационная связь и др., так и по месту их расположения — подходы, маршруты приема, пути парка приема, пути надвига и роспуска.

Большинство типов технических средств подсистемы резервируют на уровне самих устройств, т. е. в зависимости от технологической конструкции каналов подсистемы «ВхУ—ПП—Г» (путевого развития). Например, в парке приема 10 путей, следовательно, обеспечено десятикратное дублирование устройств автоматики (параллельное соединение). Дублирования отдельных модулей, блоков, панелей, стоек устройств автоматики на каждом пути нет. Поэтому отказ устройств автоматики на каком-либо пути приводит к отказу этого пути как элемента технологического канала, т. е. невозможности приема поезда на этот путь или надвига состава для расформирования. Задержка приема поездов в парк будет зависеть от густоты потока прибывающих поездов. Если интервалы между поездами достаточно велики, то происходит задержка каждого поезда на время  $\Delta t$ , равное разности времени хода поезда при исправной работе устройств ЭЦ  $t_{\text{х}}^{\text{н}}$  и при их отказе  $t_{\text{х}}^{\text{о}}$ :

$$\Delta t = t_{\text{х}}^{\text{о}} - t_{\text{х}}^{\text{н}}.$$

При большой густоте поступающего потока поездов образуется очередь на подходе. В этом случае к времени задержки каждого поезда прибавляется прогрессивно возрастающее для каждого последующего поезда время ожидания в очереди  $t_{\text{ож}}^{\text{пр}}$ .

Отказы устройств ЭЦ в выходной горловине парка прибытия ведут к снижению скорости надвига на горб горки, увеличению времени занятия пути парка поездом. Технологическое время занятия пути определяется суммарной продолжительностью операций на приготовление маршрута приема, надвиг состава на горб горки, роспуск (с учетом занятия пути приема частью расформируемого состава), а также от момента приготовления маршрута приема поезда до окончания обработки его на пути.

Известно, что время занятия пути приема не должно превышать произведения величины среднего интервала прибытия на общее число путей в парке. В случае длительного отказа это условие будет нарушено, что приведет к заполнению всех путей и задержкам поездов перед входным светофором.

Таким образом, длительные отказы устройств ЭЦ в парке прибытия приводят к задержке поездов на подходе к станции, недоиспользованию последующих элементов станции. При этом задержки на подходе пропорциональны густоте поступающего потока.

Надежность подсистемы «ВхУ—ПП—Г» в целом (предполагается, что технические средства подсистемы работают абсолютно надежно и отказы происходят только по технологическим причинам, определяемым емкостью путей парка прибытия, неравномерностью прибытия поездов и емкостью путей сортировочного парка) определяется формулой

$$P_{\text{пп}} = (1 - q_{\text{вх}})(1 - q_{\text{вых}}), \quad (9.1)$$

где  $q_{\text{вх}}$ ,  $q_{\text{вых}}$  — соответственно вероятности отказа по приему поездов и расформированию их на сортировочной горке.

Отказы технических средств снижают общую надежность подсистемы. Если допустить, что технологические отказы и отказы технических средств — независимые события, то общая надежность функционирования подсистемы

$$P_{\text{пп}}^{\text{о}} = (1 - q_{\text{вых}})(1 - q_{\text{вх}}) P_{\text{тех}}, \quad (9.2)$$

где  $P_{\text{тех}}^{\text{о}}$  — общая надежность технических средств подсистемы.

В цикл операций по обработке поездов в подсистеме «ВхУ—ПП—Г» входят прием поездов, подготовка их к роспуску, надвиг, роспуск с горки. Непосредственное влияние на пропуск поездов здесь оказывают системы технических средств: ЭЦ входного участка и парка прибытия, канал телетайпной связи с ЦТК и пневмопочта. Отказы в этих системах могут происходить независимо друг от друга и любой из них снижает вероятность беспрепятственного пропуска составов, которая определяется из выражения

$$P_{\text{пп}}^{\text{о}} = (1 - q_{\text{вх}}) P_{\text{пп}} P_{\text{тт}} P_{\text{эц}}, \quad (9.3)$$

где  $P_{пв}$  — надежность пневмопочты;  $P_{тт}$  — надежность устройств телетайпной связи;  $P_{эц}$  — эксплуатационная надежность ЭЦ парка прибытия.

Общая надежность горки как одноканальной системы обслуживания с учетом эксплуатационной надежности технических средств

$$P_{ппII}^o = (1 - q_{вых}) P_{г}, \quad (9.4)$$

а надежность всей подсистемы «ВхУ—ПП—Г»

$$P_{пп}^o = P_{псI}^o P_{псII}^o = (1 - q_{вх}) P_{пп} P_{тт} P_{эц} (1 - q_{вых}) P_{г}. \quad (9.5)$$

Коэффициент готовности параллельного резервирования устройств автоматики по технологическим каналам подсистемы «ВхУ—ПП—Г» можно определить по формуле

$$K_{гк}^{ab} = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - K_{гi}); \quad i = 1, 2, 3, \dots, m, \quad (9.6)$$

где  $m$  — число элементов в технологическом канале;  $K_{гi}$  — коэффициент готовности  $i$ -го элемента технологического канала.

При одинаковой надежности элементов технологического канала коэффициент готовности

$$K_{гк}^{ab} = 1 - (1 - K_{гi})^m. \quad (9.7)$$

Последовательное расположение технологических каналов подсистемы обуславливает последовательное соединение технических устройств автоматики. Тогда коэффициент готовности такого соединения

$$K_{гк\Sigma}^{ab} = \prod_{j=1}^n K_{гkj}^{ab}; \quad j = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (9.8)$$

где  $n$  — число технологических каналов в подсистеме «ВхУ—ПП—Г»;  $K_{гkj}^{ab}$  — коэффициент готовности устройств автоматики  $j$ -го технологического канала подсистемы «ВхУ—ПП—Г».

При разной восстанавливаемости технических устройств по технологическим каналам и интенсивности отказов  $\lambda_j$  и восстановления  $\mu_j$  коэффициент готовности устройств автоматики в целом по подсистеме «ВхУ—ПП—Г» можно определить по формуле

$$K_{гк\Sigma}^{ab} = \prod_{j=1}^n \left( 1 + \frac{\lambda_j}{\mu_j} \right)^{-1}, \quad (9.9)$$

а при одинаковой надежности устройств автоматики по всем технологическим каналам

$$K_{гк\Sigma}^{ab} = \frac{1}{\left( 1 + \frac{\lambda_j}{\mu_j} \right)^n}. \quad (9.10)$$

Формулы (9.6) — (9.10) можно использовать и для расчета коэффициента готовности других технических устройств подсистемы «ВхУ—ПП—Г».

В целом техническая готовность подсистемы «ВхУ—ПП—Г» может быть определена по набору коэффициентов готовности используемых технических устройств с учетом наиболее трудных условий их функционирования:

$$K_{пп}^T = \begin{Bmatrix} K_{гк\Sigma}^{ав} \\ K_{гк\Sigma}^{св} \\ K_{гк\Sigma}^{п} \\ K_{гк\Sigma}^{кс} \\ K_{гк\Sigma}^{ис} \end{Bmatrix}, \quad (9.11)$$

где  $K_{гк\Sigma}^{ав}$ ,  $K_{гк\Sigma}^{св}$ ,  $K_{гк\Sigma}^{п}$ ,  $K_{гк\Sigma}^{кс}$ ,  $K_{гк\Sigma}^{ис}$  — коэффициенты готовности устройств СЦБ, связи, пути, контактной сети, информационной связи.

С учетом того, что отказы технических средств подсистемы являются независимыми, коэффициент готовности подсистемы определяется следующим образом:

$$K_{пп}^T = K_{гк\Sigma}^{ав} K_{гк\Sigma}^{св} K_{гк\Sigma}^{п} K_{гк\Sigma}^{кс} K_{гк\Sigma}^{ис}. \quad (9.12)$$

Технологические каналы ПТО, ПКО, ЦТК и маневровые горочные локомотивы целесообразно рассматривать как параллельно-последовательное соединение элементов. Отказ отдельных элементов технологического канала не всегда может привести к отказу всего канала. В то же время отказ технологического канала вызывает отказ всей подсистемы независимо от степени работоспособности остальных каналов. Тогда коэффициент готовности технологических каналов подсистемы

$$K_{пп}^{тх} = [1 - (1 - K_{пто})^{n_1}] [1 - (1 - K_{пко})^{n_2}] [1 - (1 - K_{отк})^{n_3}] \times \\ \times [1 - (1 - K_{мл})^{n_4}], \quad (9.13)$$

где  $K_{пто}$ ,  $K_{пко}$ ,  $K_{цтк}$ ,  $K_{мл}$  — соответственно коэффициенты готовности одной бригады ПТО, ПКО, одного оператора ЦТК, одного маневрового локомотива;  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ ,  $n_4$  — соответственно число бригад ПТО, ПКО, операторов ЦТК, маневровых локомотивов на сортировочной горке.

Общий коэффициент готовности подсистемы «ВхУ—ПП—Г» при условии независимости возникновения в ней технических и технологических отказов определится по формуле

$$K_{ВхУ-ПП-Г}^o = K_{пп}^T K_{пп}^{тх}. \quad (9.14)$$

Теперь рассмотрим порядок расчета путевого развития подсистемы «ВхУ—ПП—Г». Число путей в парке прибытия зависит от

интенсивности поступления поездов в расформирование, мощности сортировочного устройства и других функциональных элементов подсистемы, неравномерности движения, надежности технических и технологических устройств и канала управления. Оно рассчитывается исходя из условий взаимодействия прилегающих участков, парка прибытия и сортировочной горки.

Расчет проводят по времени  $T_K$ , в течение которого подсистема содержит наибольшее число поездов (решают уравнение баланса работы подсистемы за этот период). По уравнению баланса устанавливают подвод поездов в парк прибытия. Число средних квадратичных отклонений принимают при таком уровне значимости, который определяет оптимальную эксплуатационную надежность работы подсистемы.

Число путей в парке прибытия рассчитывают в такой последовательности: определяют исходные параметры — суточное число поездов  $N_{\max}$ , поступающих в расформирование в месяце максимальных перевозок, технологическое время занятия пути поездом  $T_{\text{зп}}$ , расчетное значение горочного технологического интервала  $I_r$ , коэффициенты загрузки горки и готовности роспуска состава по каждому техническому и технологическому каналу и каналу управления; по номограмме или аналитически устанавливают значения периода времени  $T_K$  и  $\sigma$ ; по номограмме, таблицам или аналитически определяют оптимальное число путей.

Для расчета определяют начальное состояние парка перед сгущенным поступлением поездов. Остаток поездов в парке приема на начало периода  $T_K$  — частное от деления технологического времени занятия пути  $T_{\text{зп}}^{\text{пп}}$  на горочный технологический интервал  $I_r$ .

Тогда уравнение баланса работы парка прибытия примет вид

$$N_{\text{п}} = \frac{T_{\text{зп}}^{\text{пп}}}{I_r} + \bar{r}_{\text{п}} T_K + \beta \sigma - \frac{T_K}{I_r}, \quad (9.15)$$

где первый член устанавливает остаток поездов в парке на начало периода  $T_K$ , второй и третий определяют подвод поездов за этот период ( $\bar{r}_{\text{п}}$  — среднее число поездов, перерабатываемых за 1 ч), четвертый — вывод поездов. Величина  $N_{\text{п}}$  — остаток поездов в парке прибытия к концу периода  $T_K$ . Этому остатку должно соответствовать путевое развитие. При этом учитывают дополнительные пути. После преобразований получим:

$$P = \frac{T_{\text{зп}}}{I_r} + \frac{I_r (r T_K + \beta \sigma) - T_K}{I_r} + P_{\text{д}}, \quad (9.16)$$

или

$$P = \frac{I_r (r T_K + \beta \sigma - 1) + T_{\text{зп}}^{\text{пп}} - T_K}{I_r} + f - 1 + P_{\text{х}}. \quad (9.17)$$

Таблица 9.1

Расчет числа путей в подсистеме «ВхУ—ПП—Г»

| Уровень надежности 100%                                    | Уровень надежности 95% |       |          |      |            | Уровень надежности 85% |          |      |            |       | Уровень надежности 75% |      |            |       |            |
|------------------------------------------------------------|------------------------|-------|----------|------|------------|------------------------|----------|------|------------|-------|------------------------|------|------------|-------|------------|
|                                                            | $I_r$                  | $T_K$ | $\sigma$ | $P$  | $\Delta P$ | $T_K$                  | $\sigma$ | $P$  | $\Delta P$ | $T_K$ | $\sigma$               | $P$  | $\Delta P$ | $T_K$ | $\Delta P$ |
| При $\bar{r} = 1,5$ состава/ч, $N = 36$ поездов            |                        |       |          |      |            |                        |          |      |            |       |                        |      |            |       |            |
| 0,50                                                       | 0,333                  | 1,06  | 1,12     | 2,28 | 0,98       | 1,03                   | 2,12     | 0,16 | 1,81       | 0,80  | 0,84                   | 1,81 | 0,47       | 0,64  | 0,75       |
| 0,55                                                       | 0,366                  | 1,48  | 1,31     | 2,49 | 1,37       | 1,20                   | 2,29     | 0,20 | 1,93       | 1,14  | 1,00                   | 1,93 | 0,56       | 0,92  | 1,53       |
| 0,60                                                       | 0,399                  | 2,04  | 1,52     | 2,77 | 1,89       | 1,40                   | 2,55     | 0,22 | 2,12       | 1,59  | 1,16                   | 2,12 | 0,65       | 1,31  | 1,60       |
| 0,65                                                       | 0,433                  | 2,76  | 1,74     | 3,13 | 2,57       | 1,60                   | 2,88     | 0,25 | 2,20       | 1,34  | 1,34                   | 2,39 | 0,74       | 1,84  | 1,73       |
| 0,70                                                       | 0,466                  | 3,70  | 1,96     | 3,58 | 3,47       | 1,82                   | 3,29     | 0,29 | 2,31       | 1,53  | 1,53                   | 2,73 | 0,85       | 2,56  | 1,93       |
| 0,75                                                       | 0,499                  | 4,95  | 2,20     | 4,12 | 4,68       | 2,04                   | 3,79     | 0,33 | 2,41       | 1,74  | 1,74                   | 3,16 | 0,96       | 3,57  | 2,21       |
| 0,80                                                       | 0,533                  | 6,69  | 2,45     | 4,77 | 6,36       | 2,28                   | 4,41     | 0,36 | 2,55       | 1,96  | 1,96                   | 3,70 | 1,07       | 5,00  | 2,56       |
| 0,85                                                       | 0,566                  | 9,33  | 2,72     | 5,59 | 8,90       | 2,55                   | 5,18     | 0,41 | 2,67       | 2,21  | 2,21                   | 4,39 | 1,20       | 7,19  | 3,02       |
| 0,90                                                       | 0,599                  | 14,05 | 3,05     | 6,65 | 13,44      | 2,87                   | 6,20     | 0,45 | 2,81       | 2,50  | 2,50                   | 5,30 | 1,35       | 11,08 | 3,62       |
| 0,95                                                       | 0,633                  | 27,71 | 3,56     | 8,29 | 26,34      | 3,35                   | 7,76     | 0,51 | 2,93       | 2,93  | 2,93                   | 6,71 | 1,58       | 21,49 | 4,43       |
|                                                            |                        |       |          |      |            |                        |          |      |            |       |                        |      |            |       | 5,69       |
|                                                            |                        |       |          |      |            |                        |          |      |            |       |                        |      |            |       | 2,50       |
| При $\bar{r}_{\text{п}} = 2,0$ состава/ч, $N = 48$ поездов |                        |       |          |      |            |                        |          |      |            |       |                        |      |            |       |            |
| 0,60                                                       | 0,299                  | 1,60  | 1,56     | 3,21 | 1,47       | 1,43                   | 2,98     | 0,23 | 1,23       | 1,18  | 1,18                   | 2,55 | 0,66       | 0,99  | 1,05       |
| 0,65                                                       | 0,324                  | 2,18  | 1,79     | 3,57 | 2,03       | 1,65                   | 3,30     | 0,27 | 1,72       | 1,37  | 1,37                   | 2,80 | 0,77       | 1,40  | 1,24       |
| 0,70                                                       | 0,349                  | 2,97  | 2,01     | 4,01 | 2,78       | 1,89                   | 3,71     | 0,30 | 2,40       | 1,59  | 1,59                   | 3,14 | 0,87       | 1,97  | 1,41       |
| 0,75                                                       | 0,374                  | 4,03  | 2,31     | 4,58 | 3,80       | 2,14                   | 4,24     | 0,34 | 2,62       | 1,82  | 1,82                   | 3,58 | 1,00       | 2,77  | 1,62       |
| 0,80                                                       | 0,399                  | 5,50  | 2,59     | 5,28 | 5,22       | 2,42                   | 4,90     | 0,38 | 2,81       | 2,07  | 2,07                   | 4,15 | 1,13       | 3,92  | 1,84       |
| 0,85                                                       | 0,424                  | 7,72  | 2,90     | 6,16 | 7,36       | 2,72                   | 5,73     | 0,43 | 3,03       | 2,35  | 2,35                   | 4,89 | 1,27       | 5,66  | 2,08       |
| 0,90                                                       | 0,449                  | 11,60 | 3,26     | 7,33 | 11,10      | 3,07                   | 6,84     | 0,49 | 3,26       | 2,67  | 2,67                   | 5,89 | 1,44       | 8,67  | 2,37       |
| 0,95                                                       | 0,474                  | 21,99 | 3,78     | 9,09 | 21,00      | 3,56                   | 8,53     | 0,56 | 3,41       | 3,12  | 3,12                   | 7,41 | 1,68       | 16,16 | 2,77       |
|                                                            |                        |       |          |      |            |                        |          |      |            |       |                        |      |            |       | 6,32       |
|                                                            |                        |       |          |      |            |                        |          |      |            |       |                        |      |            |       | 2,77       |
| При $\bar{r}_{\text{п}} = 3,0$ состава/ч, $N = 72$ поездов |                        |       |          |      |            |                        |          |      |            |       |                        |      |            |       |            |
| 0,60                                                       | 0,199                  | 1,12  | 1,61     | 4,08 | 1,03       | 1,46                   | 3,84     | 0,24 | 0,84       | 1,19  | 1,19                   | 3,40 | 0,68       | 0,67  | 1,08       |
| 0,65                                                       | 0,216                  | 1,56  | 1,87     | 4,40 | 1,44       | 1,72                   | 4,12     | 0,28 | 1,18       | 1,40  | 1,40                   | 3,60 | 0,80       | 0,97  | 1,28       |
|                                                            |                        |       |          |      |            |                        |          |      |            |       |                        |      |            |       | 3,12       |
|                                                            |                        |       |          |      |            |                        |          |      |            |       |                        |      |            |       | 3,00       |

|                                              |       |       |      |       |       |      |       |      |       |      |       |      |       |      |       |      |
|----------------------------------------------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
| 0,70                                         | 0,233 | 2,16  | 2,16 | 4,84  | 2,02  | 1,99 | 4,52  | 0,32 | 1,66  | 1,64 | 3,91  | 0,93 | 1,38  | 1,33 | 3,35  | 1,49 |
| 0,75                                         | 0,249 | 3,00  | 2,47 | 5,42  | 2,81  | 2,29 | 5,06  | 0,36 | 2,34  | 1,90 | 4,35  | 1,07 | 1,99  | 1,56 | 3,70  | 1,72 |
| 0,80                                         | 0,266 | 4,17  | 2,81 | 6,18  | 3,94  | 2,61 | 5,77  | 0,41 | 3,31  | 2,19 | 4,96  | 1,22 | 2,86  | 1,82 | 4,19  | 1,99 |
| 0,85                                         | 0,283 | 5,94  | 3,18 | 7,16  | 5,65  | 2,97 | 6,70  | 0,46 | 4,77  | 2,51 | 5,77  | 1,39 | 4,21  | 2,12 | 4,89  | 2,27 |
| 0,90                                         | 0,299 | 8,96  | 3,60 | 8,48  | 8,58  | 3,38 | 7,96  | 0,52 | 7,24  | 2,88 | 6,90  | 1,58 | 6,50  | 2,46 | 5,87  | 2,61 |
| 0,95                                         | 0,316 | 16,42 | 4,17 | 10,47 | 15,76 | 3,92 | 9,87  | 0,60 | 12,99 | 3,37 | 8,55  | 1,92 | 11,82 | 2,90 | 7,43  | 3,04 |
| При $r_{\Pi}=4,0$ состава/ч, $N=96$ поездов  |       |       |      |       |       |      |       |      |       |      |       |      |       |      |       |      |
| 0,60                                         | 0,149 | 0,87  | 1,64 | 4,93  | 0,79  | 1,49 | 4,69  | 0,24 | 0,64  | 1,21 | 4,24  | 0,69 | 0,51  | 0,96 | 3,84  | 1,09 |
| 0,65                                         | 0,162 | 1,22  | 1,91 | 5,20  | 1,12  | 1,76 | 4,92  | 0,28 | 0,92  | 1,43 | 4,39  | 0,81 | 0,74  | 1,14 | 3,90  | 1,30 |
| 0,70                                         | 0,174 | 1,72  | 2,23 | 5,62  | 1,60  | 2,06 | 5,29  | 0,33 | 1,31  | 1,68 | 4,66  | 0,96 | 1,08  | 1,36 | 4,08  | 1,54 |
| 0,75                                         | 0,187 | 2,42  | 2,58 | 6,20  | 2,26  | 2,39 | 5,82  | 0,38 | 1,87  | 1,97 | 5,09  | 1,11 | 1,57  | 1,61 | 4,41  | 1,79 |
| 0,80                                         | 0,199 | 3,42  | 2,97 | 7,00  | 3,23  | 2,76 | 6,56  | 0,44 | 2,68  | 2,30 | 5,71  | 1,29 | 2,31  | 1,90 | 4,90  | 2,10 |
| 0,85                                         | 0,212 | 4,93  | 3,40 | 8,05  | 4,69  | 3,17 | 7,56  | 0,49 | 3,92  | 2,66 | 6,57  | 1,48 | 3,45  | 2,24 | 5,63  | 2,42 |
| 0,90                                         | 0,224 | 7,51  | 3,88 | 9,50  | 7,19  | 3,64 | 8,94  | 0,56 | 6,02  | 3,08 | 7,80  | 1,70 | 5,40  | 2,63 | 6,70  | 2,80 |
| 0,95                                         | 0,237 | 13,60 | 4,49 | 11,70 | 13,08 | 4,23 | 11,05 | 0,65 | 10,71 | 3,62 | 9,71  | 1,99 | 9,78  | 3,12 | 8,41  | 3,29 |
| При $r_{\Pi}=5,0$ состава/ч, $N=120$ поездов |       |       |      |       |       |      |       |      |       |      |       |      |       |      |       |      |
| 0,60                                         | 0,119 | 0,71  | 1,67 | 5,78  | 0,64  | 1,50 | 5,54  | 0,24 | 0,53  | 1,23 | 5,08  | 0,70 | 0,42  | 0,95 | 4,67  | 1,11 |
| 0,65                                         | 0,129 | 1,00  | 1,94 | 6,00  | 0,92  | 1,78 | 5,71  | 0,29 | 0,77  | 1,46 | 5,17  | 0,83 | 0,61  | 1,16 | 4,68  | 1,32 |
| 0,70                                         | 0,139 | 1,43  | 2,29 | 6,38  | 1,32  | 2,10 | 6,04  | 0,34 | 1,12  | 1,74 | 5,40  | 0,98 | 0,89  | 1,38 | 4,82  | 1,56 |
| 0,75                                         | 0,149 | 2,04  | 2,67 | 6,96  | 1,90  | 2,47 | 6,56  | 0,40 | 1,63  | 2,06 | 5,81  | 1,15 | 1,31  | 1,65 | 5,10  | 1,86 |
| 0,80                                         | 0,159 | 2,92  | 3,10 | 7,76  | 2,75  | 2,88 | 7,31  | 0,45 | 2,40  | 2,43 | 6,43  | 1,33 | 1,95  | 1,97 | 5,59  | 2,17 |
| 0,85                                         | 0,169 | 4,27  | 3,57 | 8,88  | 4,05  | 3,33 | 8,36  | 0,52 | 3,60  | 2,85 | 7,32  | 1,56 | 2,96  | 2,33 | 6,33  | 2,55 |
| 0,90                                         | 0,179 | 6,56  | 4,11 | 10,43 | 6,28  | 3,85 | 9,84  | 0,59 | 5,69  | 3,34 | 8,64  | 1,79 | 4,69  | 2,77 | 7,47  | 2,96 |
| 0,95                                         | 0,189 | 11,85 | 4,78 | 12,81 | 11,40 | 4,50 | 12,13 | 0,68 | 10,49 | 3,95 | 10,72 | 2,09 | 8,54  | 3,13 | 9,32  | 3,49 |
| При $r_{\Pi}=6,0$ состава/ч, $N=144$ поездов |       |       |      |       |       |      |       |      |       |      |       |      |       |      |       |      |
| 0,60                                         | 0,099 | 0,60  | 1,68 | 6,62  | 0,54  | 1,52 | 6,38  | 0,24 | 0,44  | 1,23 | 5,92  | 0,70 | 0,35  | 0,97 | 5,51  | 1,11 |
| 0,65                                         | 0,108 | 0,85  | 1,97 | 6,78  | 0,78  | 1,80 | 6,49  | 0,29 | 0,65  | 1,48 | 5,95  | 0,83 | 0,51  | 1,16 | 5,45  | 1,33 |
| 0,70                                         | 0,116 | 0,23  | 2,33 | 7,13  | 1,14  | 2,14 | 6,78  | 0,35 | 0,95  | 1,77 | 6,14  | 0,99 | 0,76  | 1,40 | 5,54  | 1,59 |
| 0,75                                         | 0,124 | 1,77  | 2,74 | 7,68  | 1,65  | 2,53 | 7,28  | 0,40 | 1,40  | 2,11 | 6,51  | 1,17 | 1,12  | 1,68 | 5,80  | 1,88 |
| 0,80                                         | 0,133 | 2,57  | 3,20 | 8,50  | 2,41  | 2,97 | 8,03  | 0,47 | 2,10  | 2,50 | 7,12  | 1,38 | 1,70  | 2,02 | 6,26  | 2,24 |
| 0,85                                         | 0,141 | 3,80  | 3,72 | 9,65  | 3,60  | 3,46 | 9,11  | 0,54 | 3,19  | 2,96 | 8,04  | 1,61 | 2,61  | 2,42 | 7,02  | 2,63 |
| 0,90                                         | 0,149 | 5,88  | 4,30 | 11,30 | 5,62  | 4,03 | 10,68 | 0,62 | 5,09  | 3,49 | 9,42  | 1,88 | 4,19  | 2,89 | 8,20  | 3,10 |
| 0,95                                         | 0,158 | 10,64 | 5,03 | 13,85 | 10,24 | 4,74 | 13,13 | 0,72 | 9,42  | 4,16 | 11,65 | 2,20 | 7,68  | 3,48 | 10,18 | 3,67 |

В формуле (9.17) число дополнительных путей представлено в виде суммы величины  $f - 1$ , учитывающей потребность в них из-за возможного совпадения прибытия поездов с разных подходов в интервале  $I_{\Gamma}$  ( $f$  — общее число подходов) и числа ходовых путей.

Заменяя в формуле (9.17) среднее квадратичное отклонение поступления поездов в парк за период  $T_{\kappa}$  коэффициентом вариации  $\vartheta = \frac{\sigma(T_{\kappa})}{\bar{r}_{\Pi} T_{\kappa}}$  и представив обратную величину горочного технологического интервала через интенсивность обслуживания потока  $\mu = \frac{1}{\bar{I}_{\Gamma}}$ , получим расчетные формулы путевого развития подсистемы «ВхУ—ПП—Г»:

$$L_{\Pi\Pi} = [\bar{r}_{\Pi} T_{\kappa} (1 + \beta \vartheta) - 1] - \mu (T_{\kappa} - T_{\text{зн}}^{\Pi\Pi}) + f - 1 + L_{\text{х}} \quad (9.18)$$

при

$$[\bar{r}_{\Pi} T_{\kappa} (1 + \beta \vartheta) - 1] - \mu T_{\kappa} > 0,$$

$$\text{или } L_{\Pi\Pi} = \mu T_{\text{зн}}^{\Pi\Pi} + f - 1 + L_{\text{х}} \quad (9.19)$$

$$\text{при } [\bar{r}_{\Pi} T_{\kappa} (1 + \beta \vartheta) - 1] - \mu T_{\kappa} = 0.$$

Результаты расчета путевого развития подсистемы «ВхУ—ПП—Г» приведены в табл. 9.1. Кроме того, в ней даны значения  $\gamma$ ,  $I_{\Gamma}$ ,  $T_{\kappa}$ ,  $\sigma$ . В расчетах технологическое время занятия пути  $T_{\text{зн}}^{\Pi\Pi} = 0,5$  ч. Ходовые и другие дополнительные пути в табл. 9.1 не учитывались. Эти значения принимают в зависимости от числа подходов к парку прибытия и других местных условий.

При расчете путевого развития парка прибытия по формуле (9.17) исходят из того, что парк приема имеет достаточную надежность работы. Для учета коэффициентов готовности технических и технологических каналов парка прибытия, которые на практике работают с отказами, преобразуем эту формулу:

$$L_{\Pi\Pi} = \frac{I_{\Gamma} \frac{1}{K_{\Gamma}^0} [\bar{r}_{\Pi} T_{\kappa} + \beta \sigma(T_{\kappa}) - 1] - \left[ T_{\kappa} - T_{\text{зн}} \frac{1}{K_{\text{ВхУ—ПП—Г}}^0} \right]}{I_{\Gamma} \frac{1}{K_{\Gamma}^0} + f - 1 + L_{\text{х}}}, \quad (9.20)$$

где  $K_{\Gamma}^0$  — коэффициент готовности сортировочной горки, численно равный произведению коэффициентов готовности технологических каналов  $K_{\Gamma}^{\text{ТХ}}$  и технических средств сортировочной горки  $K_{\Gamma}^{\text{Т}}$ ;  $K_{\text{ВхУ—ПП—Г}}^0$  — коэффициент готовности подсистемы «ВхУ—ПП—Г» в целом (произведение коэффициентов готовности технологических каналов  $K_{\text{ВхУ—ПП—Г}}^{\text{ТХ}}$  и технических средств  $K_{\text{ВхУ—ПП—Г}}^{\text{Т}}$  подсистемы «ВхУ—ПП—Г» в целом,

или по формуле (9.18)

$$P_{пп} = [\bar{r}_{пп} T_K (1 + \beta_{пп} \Phi) - 1] - \mu \frac{1}{K_{г}^0} \left( T_K - T_{зп} \frac{1}{K_{ВхУ-ПП-Г}^0} \right) + \beta - 1 + P_x. \quad (9.21)$$

Таким образом, коэффициент готовности сортировочной горки  $K_{г}^0$  оказывает влияние на число путей в парке прибытия через ограничивающий параметр подсистемы — горочный технологический интервал  $I_{г}$ , а коэффициент готовности подсистемы в целом  $K_{ВхУ-ПП-Г}^0$  влияет через параметр  $T_{зп}^{пп}$ .

В связи с тем что часть поездов на направлениях имеет повышенную массу и длину, в парке необходимо предусматривать пути увеличенной длины. Число таких путей

$$P_{пп}^{дл} = P_{пп}^i P^{дл}, \quad (9.22)$$

где  $P^{дл}$  — вероятность поступления длинносоставных поездов за время  $T_K$ .

В связи с тем что с каждого направления возможен подход длинносоставных поездов с вероятностью  $P_i^{дл}$ , можно записать:

$$P_{пп}^{дл} = P_{пп} \sum_{i=1}^n P_i^{дл}. \quad (9.23)$$

С учетом жесткой специализации путей парка приема по направлениям, примыкающим к парку, число путей в каждом пучке  $P_{пучка}$  парка может быть рассчитано по формуле (9.21), а с учетом длинносоставных — по формуле (9.23). Тогда общее число путей в парке прибытия

$$P'_{пп} = \sum_{i=1}^k P_i^{пучка}, \quad (9.24)$$

где  $k$  — число пучков в парке прибытия.

## 9.2. Оптимальное путевое развитие подсистемы «Сортировочная горка — парк формирования — вытяжки формирования»

Подсистема «Г—ПФ—ВФ» обслуживает поступающие в нее вагоны по последовательно соединенным технологическим каналам: путям роспуска сортировочной горки, маршрутам подгорочного парка, путям сортировочного парка, вытяжкам формирования. Резервирование элементов технологических каналов обеспечивает надежную работу подсистемы по формированию составов. Входной поток в подсистему поступает по одному каналу, если сортировочная горка однопутная, или по двум, если на горке два и более пути и возможно осуществление параллельного роспуска составов.

Отказ одного из каналов может привести к снижению скорости роспуска, необходимости изменения специализации путей в СП, повторной сортировке при ограниченном путевом развитии, прекращению параллельного роспуска составов на горке. При выходе из строя отдельных элементов может произойти отказ всей подсистемы.

Пути сортировочного парка, на которых заканчивается процесс расформирования составов, — многоэлементное обслуживающее устройство, обеспечивающее готовность парка к накоплению составов в зависимости от входящего в технологический канал потока. Поскольку замыкающие группы вагонов на каждый технологический канал поступают неравномерно, возможно увеличение времени накопления на путях назначения. Однако даже значительное увеличение этого времени не приводит к возникновению технологического отказа при надежной работе вытяжек формирования. Только технический отказ устройств может вызвать отказ пути как технологического элемента канала (в этом случае невозможно распускать вагоны на этот путь или формировать накопленный на этом пути состав).

Ограничивающий интервал подсистемы «Г—СП—ВФ» — интервал выставки. Величину его определяет процесс окончания формирования поездов на вытяжных путях, которые также являются многоэлементным технологическим каналом. Число вытяжек и неравномерность входящего потока оказывают существенное влияние на простои составов в ожидании окончания формирования. Как технический, так и технологический отказ даже одного вытяжного пути (при длительном процессе восстановления) может привести к полному отказу подсистемы «Г—СП—ВФ».

Технологический интервал  $I_v$  перестановки составов из подсистемы «Г—ПФ—ВФ» определяют делением продолжительности цикла работы маневрового локомотива при перестановке одного состава на число маневровых локомотивов, работающих на вытяжках формирования.

В процессе расформирования-формирования поездов в подсистеме оператор ЦТК ведет пономерный учет накопления вагонов на сортировочных путях. Технологический отказ в его работе, связанный с ошибками, приводит к простоям составов в ожидании окончания формирования. При автоматизации учета накопления с помощью ЭВМ возможны технологические отказы из-за несвоевременности расчетов (недостаточной пропускной способности каналов в часы пик) и технические отказы вычислительного комплекса.

Отказы технических устройств снижают темп или прекращают роспуск поездов с горки. Это уменьшает выходной поток подсистемы «ВхУ—ПП—Г». Уменьшение темпов роспуска приводит к простоям поездов в парке прибытия в ожидании расформирования, заполнению парка и образованию очереди поездов на подходе. При этом влияние отказа на снижение темпов роспуска будет зависеть от длительности отказа и, кроме того, от места расположения отказавшего

элемента. Так, отказ элемента, находящегося перед первой тормозной позицией, вызывает задержку роспуска всех вагонов, в то время как отказ перед третьей тормозной позицией будет задерживать продвижение вагонов только на один подгорочный путь.

Ненадежная работа технических средств снижает производительность вытяжек формирования. Так, отказ светофора или рельсовой цепи вызывает задержку операций по окончании формирования, а отказ стрелки или локомотива — прекращение работы канала формирования. При большой длительности отказа технических средств или совпадении отказа и сгущенного накопления составов происходит полное заполнение путей. Это приводит к прекращению роспуска составов с горки, наступает отказ всей подсистемы, снижается перерабатывающая способность подсистемы «ВхУ—ПП—Г».

Различают два вида отказов каналов окончания формирования: технологический и отказ по техническим причинам (отказ технических средств). Приводя к одинаковым последствиям для состояния подсистемы, они отличаются по причинам, их вызывающим. Технологический отказ наступает, когда темп накопления составов на сортировочных путях больше темпа окончания формирования и вывода их в парк отправления. При этом производительность каналов по окончании формирования не уменьшается, но пути заполняются и увеличивается простой составов в ожидании окончания формирования. Отказ по техническим причинам снижает производительность каналов ОФ, на путях накапливаются необработанные составы.

Для оценки влияния надежности технических средств на эксплуатационную надежность вытяжек представляет интерес анализ важнейших ситуаций [21]:

1. Окончанием формирования заняты все вытяжки. Очевидно, что отказ технических средств любой из вытяжек вызовет задержку или остановку на ней процесса. Следовательно, вероятность беспрепятственного окончания формирования и вывода составов в парк отправления определяет произведение надежностей функционирования технических средств каждой вытяжки. Для трех вытяжных путей имеем

$$p_1^{\text{оф}} = p_{\text{в1}} p_{\text{в2}} p_{\text{в3}}, \quad (9.25)$$

где  $p_{\text{в1}}$ ,  $p_{\text{в2}}$ ,  $p_{\text{в3}}$  — соответственно вероятности безотказной работы технических средств вытяжек I, II и III и прилегающих к ним горловин сортировочного и отправочного парков;

$$p_{\text{в1}} = p'_1 p_1 p''_1; \quad p_{\text{в2}} = p'_2 p_{\text{II}} p''_2; \quad p_{\text{в3}} = p'_3 p_{\text{III}} p''_3.$$

2. Окончанием формирования заняты две вытяжки, а одна свободна и может быть использована как резервная для замены отказавшей вытяжки. При этом возможны три варианта ситуации, каждый из которых равновероятен, если иметь в виду наличие взаимозаменяемой специализации сортировочных путей и за счет этого равномерную их загрузку вагонопотоками (пути, используемые для на-

копления местных вагонов и вагонов с браком, из схемы исключаются).

2а. Заняты первая и вторая вытяжки, третья свободна и может быть резервом для второй вытяжки. Первая вытяжка резервироваться третьей не может, так как этого не позволяет путевое развитие. Надежность вытяжек

$$p_{2a}^{\text{оф}} = p_{\text{в1}} p'_2 [1 - (1 - p_{\text{II}} p''_2) (1 - p_{\text{III}}^{\text{в}} p''_3)]. \quad (9.26)$$

2б. Заняты вторая и третья вытяжки, первая свободна и резервирует вторую вытяжку, третью вытяжку первая резервировать не может по условиям путевого развития. Надежность вытяжек

$$p_{2б}^{\text{оф}} = p_{\text{в3}} p'_2 [1 - (1 - p_{\text{II}} p''_2) (1 - p_{\text{I}}^{\text{в}} p''_1)]. \quad (9.27)$$

2в. Заняты первая и третья вытяжки, вторая свободна и может резервировать или первую или третью вытяжку. Отказ элементов  $p'_1$  или  $p'_3$  вызывает полный отказ вытяжек. То же самое происходит при совместном отказе элементов  $p''_1$  и  $p''_3$ , при отказе первой вытяжки включают последовательно элементы надежности второй и третьей вытяжек  $p_{\text{II}}$ ,  $p_{\text{III}}$ , а при отказе третьей вытяжки — элементы надежности второй и первой вытяжек  $p_{\text{II}}$ ,  $p_{\text{I}}$ . Общая надежность вытяжек в этих случаях

$$p_{2в}^{\text{оф}} = p'_1 p'_3 [1 - (1 - p_a) (1 - p_б)]; \quad (9.28)$$

$$p_a = q_{\text{I}} p_{\text{III}} p''_3 [1 - (1 - p_{\text{I}} p''_1) (1 - p_{\text{II}}^{\text{в}} p''_2)]; \quad (9.29)$$

$$p_б = q_{\text{III}} p_{\text{I}} p''_1 [1 - (1 - p_{\text{III}} p''_3) (1 - p_{\text{II}}^{\text{в}} p''_2)], \quad (9.30)$$

где  $q_{\text{I}}$  и  $q_{\text{III}}$  — вероятности отказов первой и третьей вытяжек;

$$q_{\text{I}} = 1 - p_{\text{I}}; \quad q_{\text{III}} = 1 - p_{\text{III}}. \quad (9.31)$$

3. Занята только одна вытяжка, а две другие свободны и могут заменить ее. При этом включение элементов надежности вытяжек будет параллельным, что повышает общую их надежность.

3а. Занята только первая вытяжка, вторая и третья резервируют ее. Общая надежность вытяжек

$$p_{3a}^{\text{оф}} = p'_1 [1 - (1 - p_{\text{I}} p''_1) (1 - p_{\text{II}}^{\text{в}} p''_2) (1 - p_{\text{III}}^{\text{в}} p''_3)]. \quad (9.32)$$

3б. Занята только вторая вытяжка, первая и третья резервируют ее. Общая надежность вытяжек

$$p_{3б}^{\text{оф}} = p'_2 [1 - (1 - p_{\text{I}}^{\text{в}} p''_1) (1 - p_{\text{II}} p''_2) (1 - p_{\text{III}}^{\text{в}} p''_3)]. \quad (9.33)$$

3в. Занята только третья вытяжка, вторая и первая — в резерве. Общая надежность вытяжек

$$p_{3в}^{\text{оф}} = p'_3 [1 - (1 - p_{\text{I}}^{\text{в}} p''_1) (1 - p_{\text{II}}^{\text{в}} p''_2) (1 - p_{\text{III}} p''_3)]. \quad (9.34)$$

4. Вытяжные пути не заняты окончанием формирования, так как на сортировочных путях нет накопленных составов. Поскольку

нет потребности в окончании формирования и перестановке составов в парк отправления, то не будет и сбой в выполнении этих операций.

Надежность вытяжек можно условно принять равной единице:  $p_4^{\text{оф}} = 1$ .

5. На сортировочных путях закончено накопление четырех или большего числа составов. На вытяжках можно обрабатывать только три состава, остальные будут простаивать в ожидании начала обработки. Это состояние соответствует технологическому отказу вытяжек формирования. Вероятность беспрепятственного окончания формирования равна нулю, так как налицо отказ. В то же время процесс окончания формирования на вытяжках продолжается безостановочно, если, конечно, нет отказов технических средств, общая надежность которых, как и в первом случае,

$$p_5^{\text{оф}} = p_1^{\text{оф}} = p_{в1} p_{в2} p_{в3}. \quad (9.35)$$

Таким образом, надежность вытяжек по обеспечению беспрепятственного выполнения операций по окончанию формирования и перестановке составов в парк отправления в значительной мере зависит от обстановки, складывающейся на вытяжках: чем большее число вытяжек занято окончанием формирования, тем меньше их общая надежность. Для оценки полной надежности вытяжек необходимо рассмотреть предпосылки закономерности возникновения той или иной ситуации. Очевидно, что число вытяжек, необходимое для выполнения операций, в каждом случае равно числу составов, накопленных на сортировочных путях за период окончания формирования одного состава, его перестановки и возвращения локомотива. Поток накапливающихся составов — простейший, и вероятность окончания накопления какого-либо числа составов за определенный период времени описывают пуассоновским распределением:

$$p_{(N_H)} = \frac{(rt)^{N_H}}{N_H!} e^{-rt}, \quad (9.36)$$

где  $r$  — средняя интенсивность потока накапливающихся составов на сортировочных путях;  $N_H$  — число накопившихся поездов, вероятность появления которого определяется за время  $t$ .

Подставив в формулу (9.36) вместо  $t$  период  $\bar{T}_{\text{оф}}$  и задав его величину в часах и интенсивность  $\bar{r}$  в поездах за 1 ч, а также интересующее нас число накопленных составов  $N_H$ , можно вычислить вероятность возникновения любой из ситуаций по формуле, предложенной А. М. Жидковым:

$$p_{(N_H)} = \frac{(\bar{r}\bar{T}_{\text{оф}})^{N_H}}{N_H!} e^{-\bar{r}\bar{T}_{\text{оф}}}. \quad (9.37)$$

Если, например,  $\bar{r}_H = 3$  поезда/ч,  $\bar{T}_{\text{оф}} = 0,5$  ч, то вероятность того, что за время  $\bar{T}_{\text{оф}}$  на сортировочных путях не будет накоплен ни один состав, т. е. вытяжки формирования будут свободны,  $p_{(0)} = 0,223$ , вероятность появления одного состава  $p_{(1)} = 0,336$ , вероятность занятия двух вытяжек  $p_{(2)} = 0,250$  и т. д.

Для каждого случая, когда заняты две или одна вытяжка, можно рассмотреть три варианта в зависимости от того, по какой стрелочной улице выходной горловины необходимо вести окончание формирования (на какой группе путей окончено накопление состава). Каждый из этих вариантов равновероятен:

$$\left. \begin{aligned} p'_{(1)} &= p''_{(1)} = p'''_{(1)} = \frac{p_{(1)}}{3}; \\ p'_{(2)} &= p'_{(2)} = p'''_{(2)} = \frac{p_{(2)}}{3}. \end{aligned} \right\} \quad (9.38)$$

Очевидно, что при неравенстве числа путей в группах вероятности окончания накопления составов на той или иной группе путей пропорциональны числу путей в группах:

$$\begin{aligned} p'_{(1)} : p''_{(1)} : p'''_{(1)} &= n_1 : n_2 : n_3; \\ p'_{(1)} + p'_{(1)} + p'''_{(1)} &= p_{(1)}, \end{aligned} \quad (9.39)$$

где  $n_1, n_2, n_3$  — число путей в группах, примыкающих соответственно к первой, второй и третьей стрелочным улицам выходной горловины сортировочного парка.

Зная вероятности того или иного варианта, можно определить вероятность технологического отказа вытяжек  $q_{\text{техн}(1)}^{\text{оф}}$ . Очевидно, что она равна вероятности окончания накопления на путях четырех и более составов. Тогда вероятность технологического отказа

$$q_{\text{техн}(1)}^{\text{оф}} = p_{(>3)} = 1 - (p_{(0)} + p_{(1)} + p_{(2)} + p_{(3)}), \quad (9.40)$$

или на основе рассчитанных вероятностей

$$q_{\text{техн}(1)}^{\text{оф}} = 1 - (0,223 + 0,336 + 0,250 + 0,125) = 0,066.$$

Другая причина, вызывающая технологический отказ, — окончание накопления на одной группе путей за время  $\bar{T}_{\text{оф}}$  более одного состава. Так как каждая группа путей имеет выход на вытяжку через одну вершину (стрелку), то одновременно заканчивать формирование более одного состава невозможно. Появление на одной группе путей более одного состава возможно в первой, второй и пятой ситуациях. Зная вероятности возникновения ситуаций и накопления более одного состава на одной из групп путей, по формуле полной вероятности можно вычислить вероятность технологического отказа. При этом пятую ситуацию можно не рассматривать, так как в ней технологический отказ будет в любом случае.

Очевидно, что вероятности накопления на одной группе путей более одного состава внутри каждой ситуации составят:

для первой ситуации

$$p_{(2,3)}^V = \frac{C_{(2,3)}}{C_{(1,2,3)}};$$

для второй

$$p_{(2)}^V = \frac{C_{(2)}}{C_{(1,2)}},$$

где  $C_{(1,2)}$ ,  $C_{(1,2,3)}$  — общее число событий, заключающихся в окончании накопления на любой из групп путей одного или двух составов;  $C_{(2)}$ ,  $C_{(2,3)}$  — число событий, заключающихся в окончании накопления на любой из групп путей двух составов.

При этом ввиду равномерной средней загрузки путей вагонопотоками события, заключающиеся в накоплении на любой из их групп того или иного числа составов, внутри каждой ситуации равновероятны и образуют полную группу, т. е.

$$C_{(2,3)} = C_{(1,2,3)} - C_{(1)}; \quad C_{(2)} = C_{(1,2)} - C_{(1)},$$

где  $C_{(1)}$  — число событий, заключающихся в окончании накопления на любой из групп путей не более одного состава.

Общее число событий в каждой ситуации определяем как число перестановок из  $n$  элементов по  $m$ :

$$A_n^m = n(n-1) \dots [n-(m-1)],$$

где  $n$  — число путей;  $m$  — число составов, накапливающихся за период  $\bar{T}_{\text{оф}}$  на этих путях в данной ситуации.

Общее число событий:  
для первой ситуации

$$C_{(1,2,3)} = A_{24}^3 = 24 \cdot 23 \cdot 22 = 12144;$$

для второй ситуации

$$C_{(1,2)} = A_{24}^2 = 24 \cdot 23 = 552.$$

Для расчетов необходимо по каждой ситуации определить число событий, заключающихся в накоплении на любой из групп путей не более одного состава. С этой целью рассмотрим вторую ситуацию как более простую. На сортировочных путях за период  $\bar{T}_{\text{оф}}$  накоплены два состава. При этом нас интересуют события, когда эти составы распределены по двум из трех путей. Число таких вариантов, очевидно,

$$A_3^2 = 3 \cdot 2 = 6.$$

В каждом из этих вариантов любой из путей одной группы сочетается с любым путем другой группы. Число таких комбинаций

$$K_2 = n_1 n_2,$$

где  $n_1$ ,  $n_2$  — число путей в первой и второй группах.

Для данной схемы  $n_1 = n_2 = n_3 = 8$ , тогда

$$K_2 = 8 \cdot 8 = 64.$$

Отсюда для второй ситуации

$$C_{(1)} = K_2 A_3^2 = 64 \cdot 6 = 384.$$

Число событий для второй ситуации, когда на любой группе путей накапливают по два состава,

$$C_{(2)} = 552 - 384 = 168.$$

Вероятность этого события внутри второй ситуации

$$p_{(2)}^V = \frac{168}{552} = 0,304.$$

Теперь вернемся к первой ситуации. Нас интересуют события, когда три состава, накапливаемые на сортировочных путях, распределяют по одному на каждую из трех групп путей. Число таких вариантов

$$A_3^3 = 3 \cdot 2 \cdot 1 = 6.$$

В любом из этих вариантов каждый из путей одной группы сочетается с каждым путем второй и третьей групп. Общее число комбинаций путей в каждом из вариантов

$$K_3 = n_1 n_2 n_3.$$

Для данной схемы  $K_3 = 8 \cdot 8 \cdot 8 = 512$ .

Число событий, когда три состава равномерно распределены по трем группам путей,

$$C_{(1)} = K_3 A_3^3 = 512 \cdot 6 = 3072.$$

Определим число событий, когда на любой из групп путей накапливается более одного состава:

$$C_{(2,3)} = 12144 - 3072 = 9072.$$

Вероятность этого события

$$p_{(2,3)}^V = \frac{9072}{12144} = 0,7475.$$

Вероятности технологических отказов в первой и второй ситуациях:

$$q_{\text{техн}(1)}^{\text{оф}} = p_{(2,3)}^V p_{(3)}^V = 0,7475 \cdot 0,125 = 0,0935;$$

$$q_{\text{техн}(2)}^{\text{оф}} = p_{(2)}^V p_{(3)}^V = 0,304 \cdot 0,250 = 0,075.$$

Так как технологические отказы в первой, второй и пятой ситуациях — события несовместимые, то общая вероятность технологического отказа равна сумме вероятностей отказов:

$$q_{\text{техн}}^{\text{оф}} = q_{\text{техн}(1)}^{\text{оф}} + q_{\text{техн}(2)}^{\text{оф}} + q_{\text{техн}(5)}^{\text{оф}} = 0,0935 + 0,075 + 0,066 = 0,2345.$$

Технологический отказ и отказ по техническим причинам — события совместимые. Тогда общая вероятность их появления

$$q^{\text{оф}} = q_{\text{техн}}^{\text{оф}} + q_{\text{тех}}^{\text{оф}} - q_{\text{техн}}^{\text{оф}} q_{\text{тех}}^{\text{оф}}, \quad (9.41)$$

а общая вероятность бесперебойного процесса окончания формирования

$$p^{0\Phi} = 1 - q^{0\Phi}. \quad (9.42)$$

Необходимо отметить, что рассчитанное по такому методу значение эксплуатационной надежности вытяжек формирования будет несколько занижено, так как для упрощения анализа в расчет не были включены варианты путей, используемые в случае отказов элементов  $p_{11}$ ,  $p_1'$ ,  $p_2''$  и  $p_2''$ .

Как видно из расчета, вероятность технологического отказа довольно велика:  $q_{\text{техн}}^{0\Phi} = 0,2345$ . Анализируя причины появления технологического отказа, можно сделать вывод, что они в значительной степени объясняются невозможностью одновременного окончания формирования в одной группе путей более одного состава. Если, например, предусмотреть из горловины через дополнительную стрелку непосредственный выход на вторую вытяжку, то появится возможность снизить вероятность технологического отказа.

Рассмотрим влияние дополнительных выходов из горловины сортировочного парка на соседние вытяжки на изменение вероятности технологического отказа. Предварительно отметим, что устройство дополнительного выхода на соседнюю вытяжку равносильно увеличению групп путей и уменьшению числа путей в каждой группе.

При  $n$  путей и  $r$  их групп число путей в каждой группе равно  $\frac{n}{r}$ . Тогда вероятность накопления на любой из групп путей более одного состава:

для первой ситуации

$$p_{(2,3)}^V = \frac{A_n^3 - k_3 A_r^3}{A_n^3} = 1 - \frac{\frac{n^3}{r^3} r(r-1)(r-2)}{n(n-1)(n-2)} = \frac{(n-r)(3rn-2n-2r)}{r^2(n-1)(n-2)}; \quad (9.43)$$

для второй ситуации

$$p_{(2)}^V = \frac{A_n^2 - k_2 A_r^2}{A_n^2} = 1 - \frac{\frac{n^2}{r^2} r(r-1)}{n(n-1)} = \frac{\frac{n}{r} - 1}{n-1}. \quad (9.44)$$

Для уменьшения вероятности технологического отказа устроим с каждой группы путей дополнительный выход на соседние вытяжки. Теперь число выходов с каждой группы путей на вытяжки удвоилось ( $b = 2$ ), соответственно увеличилось число групп путей ( $br$ ) и уменьшилось число путей в каждой группе  $\frac{n}{br}$ .

Вероятность накопления на любой из групп путей более одного состава:

в первой ситуации

$$p_{(2,3)}^{VI} = \frac{A_n^3 - k_3 A_{br}^3}{A_n^3} = 1 - \frac{\frac{n^3}{b^3 n^3} br(br-1)(br-2)}{r^2 b^2 (n-1)(n-2)} = \frac{b^2 r^2 (n-1)(n-2) - n^2 (r-1)(r-2)}{b^2 r^2 (n-1)(n-2)} = \frac{(n-br)(3brn-2n-2br)}{b^2 r^2 (n-1)(n-2)}; \quad (9.45)$$

во второй

$$p_{(2)}^{VI} = \frac{A_n^2 - k_2 A_{br}^2}{A_n^2} = 1 - \frac{\frac{n^2}{b^2 r^2} br(br-1)}{n(n-1)} = \frac{\frac{n}{br} - 1}{n-1}. \quad (9.46)$$

Теперь сравним соотношение вероятностей в каждой ситуации для первой и второй схем путевого развития:

$$\frac{p_{(2,3)}^V}{p_{(2,3)}^{VI}} = \frac{\frac{n}{r} - 1}{n-1} : \frac{\frac{n}{br} - 1}{n-1} = \frac{(n-r)br}{r(n-br)} = \frac{(n-r)}{(n-br)} b. \quad (9.47)$$

Следовательно, при увеличении числа выходов с каждой группы сортировочных путей в  $b$  раз вероятность технологического отказа во второй ситуации снижается также более чем в  $b$  раз.

Соотношение вероятностей для первой ситуации

$$\frac{p_{(2,3)}^V}{p_{(2,3)}^{VI}} = \frac{(n-r)(3rn-2n-2r)}{r^2(n-1)(n-2)} : \frac{(n-br)(3brn-2n-2br)}{b^2 r^2 (n-1)(n-2)} = \frac{(n-r)(3rn-2n-2r)}{(n-br)(3brn-2n-2br)} b^2. \quad (9.48)$$

Анализ этой формулы сложен, поэтому рассмотрим результат после подстановки числовых данных:

$$\frac{p_{(2,3)}^V}{p_{(2,3)}^{VI}} = \frac{(24-3)(3 \cdot 3 \cdot 24 - 2 \cdot 24 - 2 \cdot 3)}{(24-2 \cdot 3)(3 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 24 - 2 \cdot 24 - 2 \cdot 2 \cdot 3)} 2^2 = 2,015 \approx b.$$

Таким образом, вероятность отказа уменьшается в число раз, близкое к  $b$ .

Следовательно, увеличение числа выходов с каждой группы путей на соседние вытяжки пропорционально уменьшает вероятность технологического отказа в окончании формирования. Однако при этом увеличивается число элементов технических средств (стрелок), что ведет к повышению вероятности отказа по техническим причинам, т. е. существует оптимальный вариант с учетом вероятности общего отказа и потерь от него.

Анализ эксплуатационной надежности вариантов путевого развития горловины сортировочного парка, вытяжек и оценка возможных потерь от отказов позволяют выбрать оптимальную схему района сортировочной системы.

Для подсистемы «Г—ПФ—ВФ» коэффициент технической готовности определяют для пути, устройств сигнализации и связи, контактной сети, информационно-технических средств по рассмотренной выше методике. В целом для подсистемы коэффициент готовности (с учетом независимости отказов технических средств)

$$K_{пф}^T = K_{гк\sigma}^{T_{ав}} K_{гк\sigma}^{CВ} K_{гк\sigma}^{П} K_{гк\sigma}^{КС} K_{гк\sigma}^{ИС} \quad (9.49)$$

Технологические каналы подсистемы, ЦТК и маневровые локомотивы на вытяжных путях целесообразно рассматривать как последовательное соединение, а элементное соединение маневровых средств — как параллельное. Тогда коэффициент готовности технологических каналов подсистемы «Г—ПФ—ВФ»

$$K_{пф}^{ТХ} = [1 - (1 - K_{ЦТК})] [1 - (1 - K_{МЛ})^{n_b}], \quad (9.50)$$

где  $K_{ЦТК}$ ,  $K_{МЛ}$  — соответственно коэффициенты готовности оператора ОТК, одного маневрового локомотива;  $n_b$  — число маневровых локомотивов на вытяжках формирования.

Общий коэффициент готовности подсистемы «Г—ПФ—ВФ» при условии независимости возникновения в ней технических и технологических отказов определяем по формуле

$$K_{Г-ПФ-ВФ}^0 = K_{пф}^T K_{пф}^{ТХ} \quad (9.51)$$

Путевое развитие подсистемы «Г—ПФ—ВФ» рассчитывают исходя из уравнения баланса работы подсистемы в период наибольшего сгущения накопления составов  $T_K$ . Начальное состояние подсистемы характеризует число одновременно накапливаемых составов. Анализ показывает, что распределение этого параметра имеет наиболее вероятное значение при числе занятых путей, равном числу назначений плана формирования.

Число составов поездов, накопленных за период  $T_K$  при сгущенном поездообразовании,

$$N_H = \bar{r}_H T_K + \beta \sigma(T_K), \quad (9.52)$$

где  $\bar{r}_H$  — плотность потока накапливаемых составов поездов.

Число составов, которое будет выведено из парка за период  $T_K$ ,

$$N_B = \frac{T_K}{I_B}. \quad (9.53)$$

Тогда состояние подсистемы к концу периода  $T_K$  (без учета первого из числа сгущенно накопившихся составов) определяет выражение

$$P = P_H + \frac{I_B (\bar{r}_H T_K + \beta \sigma(T_K) - 1) - T_K}{I_B}, \quad (9.54)$$

где  $I_B$  — интервал вывода составов из подсистемы;  $P_H$  — число назначений плана формирования с учетом назначений порожних и угловых вагонов.

С учетом путей для местных вагонов  $P_M$  и специальных  $P_{спец}$  получаем:

$$P = P_H + \frac{I_B (\bar{r}_H T_K + \beta \sigma(T_K) - 1) - T_K}{I_B} + P_M + P_{спец}. \quad (9.55)$$

Введем в формулу (9.55) коэффициент вариации  $\vartheta$ :

$$\vartheta = \frac{\sigma(T_K)}{\bar{r}_H T_K}$$

и коэффициент интенсивности обслуживания подсистемой  $\mu$ :

$$\mu = \frac{1}{I_B}.$$

Тогда расчетная формула путевого развития будет иметь вид

$$P = [\bar{r}_H T_K (1 + \beta \vartheta) - 1] - \mu (T_K) + P_K + P_M + P_{спец} \quad (9.56)$$

при

$$[\bar{r}_H T_K (1 + \beta \vartheta) - 1] - \mu T_K > 0,$$

или

$$P = P_K + P_M + P_{спец} \quad (9.57)$$

при

$$[\bar{r}_H T_K (1 + \beta \vartheta) - 1] - \mu T_K = 0.$$

**Пример.** Требуется определить число путей в парке формирования при надежности его работы  $P_{пф} = 1$ . Исходные данные: число формируемых поездов  $N_{пф} = 84$ ;  $\bar{r}_H = 3,5$  состава/ч, число назначений плана формирования  $P_K = 22$ ; интервал выставки составов  $I_B = 0,2$  ч; число путей для местных вагонов  $P_M = 2$ , для специальных целей  $P_{спец} = 4$ . По табл. 9.2 при  $\bar{r}_H = 3,5$  состава/ч;  $T_K = 4,0$  ч  $\sigma(T_K) = 2,9$  состава. Тогда

$$\begin{aligned} P_{пф}^{пт} &= 22 + \frac{0,2 (3,5 \cdot 4,0 + 3 \cdot 2,9 - 1) - 4,0}{0,2} + 2 + 4 = \\ &= 22 + 4,5 + 2 + 4 = 33 \text{ пути.} \end{aligned}$$

Таким образом, всего в парке формирования при принятых исходных данных необходимо предусмотреть не менее 33 путей, из них 27 будут использованы для накопления и окончания формирования составов. На одно назначение плана формирования будет  $27 : 22 = 1,23$  пути.

Результаты расчетов путевого развития подсистемы без учета величины  $\Sigma k$  приведены в табл. 9.2. Для определения числа путей необходимо к данным таблицы прибавить значения  $\Sigma k = P_K + P_M + P_{спец}$ . Элементы этой суммы определены заданием на проектирование и, следовательно, известны. Расчеты проведены при условии, что обеспечивается эксплуатационная надежность работы подсистемы «Г—ПФ—ВФ» на уровне 100 %.

На практике часто возникают технологические отказы, связанные с несовпадением темпов поездообразования, окончания формирования и обработки составов. Возникающие в результате таких технологических отказов дополнительные простои требуют для обеспечения полной эксплуатационной надежности увеличения чис-

Таблица 9.2

Расчет числа путей в подсистеме «Г—ПФ—ВФ»

| Уровень надежности 100% |   | Уровень надежности 95% |    | Уровень надежности 90% |    | Уровень надежности 85% |    | Уровень надежности 80% |    | Уровень надежности 75% |    |
|-------------------------|---|------------------------|----|------------------------|----|------------------------|----|------------------------|----|------------------------|----|
| γ                       | П | П                      | ΔП | П                      | ΔП | П                      | ΔП | П                      | ΔП | П                      | ΔП |

При  $\bar{r}=1,5$ 

|      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,60 | 1,52 | 1,30 | 0,22 | 1,08 | 0,44 | 0,87 | 0,65 | 0,67 | 0,85 | 0,48 | 1,05 |
| 0,65 | 1,98 | 1,72 | 0,26 | 1,47 | 0,51 | 1,23 | 0,75 | 1,00 | 0,98 | 0,78 | 1,20 |
| 0,70 | 2,51 | 2,22 | 0,29 | 1,93 | 0,58 | 1,66 | 0,85 | 1,39 | 1,12 | 1,14 | 1,37 |
| 0,75 | 3,12 | 2,79 | 0,33 | 2,47 | 0,65 | 2,16 | 0,96 | 1,86 | 1,26 | 1,56 | 1,56 |
| 0,80 | 3,84 | 3,47 | 0,37 | 3,11 | 0,73 | 2,76 | 1,08 | 2,42 | 1,42 | 2,09 | 1,75 |
| 0,85 | 4,70 | 4,30 | 0,40 | 3,90 | 0,80 | 3,51 | 1,19 | 3,12 | 1,58 | 2,74 | 1,96 |
| 0,90 | 5,82 | 5,36 | 0,46 | 4,91 | 0,91 | 4,47 | 1,35 | 4,03 | 1,79 | 3,60 | 2,22 |
| 0,95 | 7,50 | 6,97 | 0,53 | 6,44 | 1,06 | 5,92 | 1,58 | 5,41 | 2,09 | 4,90 | 2,60 |

При  $\bar{r}=2,0$ 

|      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,60 | 1,54 | 1,32 | 0,22 | 1,10 | 0,44 | 0,89 | 0,65 | 0,68 | 0,86 | 0,49 | 1,05 |
| 0,65 | 2,02 | 1,76 | 0,26 | 1,51 | 0,51 | 1,26 | 0,76 | 1,02 | 1,00 | 0,80 | 1,22 |
| 0,70 | 2,59 | 2,29 | 0,30 | 1,99 | 0,60 | 1,71 | 0,88 | 1,43 | 1,16 | 1,17 | 1,42 |
| 0,75 | 3,24 | 2,90 | 0,34 | 2,57 | 0,67 | 2,24 | 1,00 | 1,93 | 1,31 | 1,62 | 1,62 |
| 0,80 | 4,03 | 3,65 | 0,38 | 3,27 | 0,76 | 2,90 | 1,13 | 2,54 | 1,49 | 2,19 | 1,84 |
| 0,85 | 4,99 | 4,56 | 0,43 | 4,13 | 0,86 | 3,71 | 1,28 | 3,30 | 1,69 | 2,90 | 2,09 |
| 0,90 | 6,22 | 5,73 | 0,49 | 5,25 | 0,97 | 4,77 | 1,45 | 4,31 | 1,91 | 3,84 | 2,38 |
| 0,95 | 8,04 | 7,47 | 0,57 | 6,91 | 1,13 | 6,36 | 1,68 | 5,81 | 2,23 | 5,27 | 2,77 |

При  $\bar{r}=3,0$ 

|      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,60 | 1,57 | 1,34 | 0,23 | 1,12 | 0,45 | 0,90 | 0,67 | 0,70 | 0,87 | 0,50 | 1,07 |
| 0,65 | 2,08 | 1,81 | 0,27 | 1,55 | 0,53 | 1,29 | 0,79 | 1,05 | 1,03 | 0,82 | 1,26 |
| 0,70 | 2,68 | 2,38 | 0,30 | 2,07 | 0,61 | 1,77 | 0,91 | 1,48 | 1,20 | 1,21 | 1,47 |
| 0,75 | 3,42 | 3,06 | 0,36 | 2,70 | 0,72 | 2,35 | 1,07 | 2,02 | 1,40 | 1,70 | 1,72 |
| 0,80 | 4,31 | 3,89 | 0,42 | 3,48 | 0,83 | 3,08 | 1,23 | 2,69 | 1,62 | 2,32 | 1,99 |
| 0,85 | 5,41 | 4,93 | 0,48 | 4,46 | 0,95 | 4,01 | 1,40 | 3,56 | 1,85 | 3,12 | 2,29 |
| 0,90 | 6,83 | 6,28 | 0,55 | 5,75 | 1,08 | 5,23 | 1,60 | 4,71 | 2,12 | 4,21 | 2,62 |
| 0,95 | 8,92 | 8,27 | 0,65 | 7,66 | 1,26 | 7,05 | 1,87 | 6,45 | 2,47 | 5,85 | 3,07 |

При  $\bar{r}=4,0$ 

|      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,60 | 1,61 | 1,36 | 0,25 | 1,13 | 0,48 | 0,91 | 0,70 | 0,70 | 0,91 | 0,50 | 1,11 |
| 0,65 | 2,11 | 1,84 | 0,27 | 1,57 | 0,54 | 1,31 | 0,80 | 1,06 | 1,05 | 0,83 | 1,28 |
| 0,70 | 2,75 | 2,43 | 0,32 | 2,11 | 0,64 | 1,81 | 0,94 | 1,51 | 1,24 | 1,23 | 1,52 |
| 0,75 | 3,53 | 3,16 | 0,37 | 2,78 | 0,75 | 2,42 | 1,11 | 2,08 | 1,45 | 1,74 | 1,79 |
| 0,80 | 4,50 | 4,06 | 0,44 | 3,63 | 0,87 | 3,21 | 1,29 | 2,80 | 1,70 | 2,40 | 2,10 |
| 0,85 | 5,71 | 5,20 | 0,51 | 4,70 | 1,01 | 4,22 | 1,49 | 3,74 | 1,97 | 3,28 | 2,43 |
| 0,90 | 7,29 | 6,70 | 0,59 | 6,13 | 1,16 | 5,57 | 1,72 | 5,02 | 2,27 | 4,48 | 2,81 |
| 0,95 | 9,62 | 8,92 | 0,70 | 8,26 | 1,36 | 7,60 | 2,02 | 6,95 | 2,67 | 6,30 | 3,32 |

При  $\bar{r}=5,0$ 

|      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,60 | 1,62  | 1,37 | 0,25 | 1,14 | 0,48 | 0,92 | 0,70 | 0,71 | 0,91 | 0,50 | 1,12 |
| 0,65 | 2,14  | 1,86 | 0,28 | 1,59 | 0,55 | 1,32 | 0,82 | 1,07 | 1,07 | 0,83 | 1,31 |
| 0,70 | 2,80  | 2,47 | 0,33 | 2,14 | 0,66 | 1,83 | 0,97 | 1,53 | 1,27 | 1,25 | 1,55 |
| 0,75 | 3,62  | 3,23 | 0,39 | 2,84 | 0,78 | 2,47 | 1,15 | 2,12 | 1,50 | 1,77 | 1,85 |
| 0,80 | 4,64  | 4,18 | 0,46 | 3,73 | 0,91 | 3,30 | 1,34 | 2,87 | 1,77 | 2,47 | 2,17 |
| 0,85 | 5,94  | 5,41 | 0,53 | 4,89 | 1,05 | 4,38 | 1,56 | 3,88 | 2,06 | 3,40 | 2,54 |
| 0,90 | 7,67  | 7,04 | 0,63 | 6,44 | 1,23 | 5,85 | 1,82 | 5,27 | 2,40 | 4,69 | 2,98 |
| 0,95 | 10,21 | 9,47 | 0,74 | 8,76 | 1,45 | 8,07 | 2,14 | 7,37 | 2,84 | 6,69 | 3,52 |

Окончание табл. 9.2

| Уровень надежности 100% |   | Уровень надежности 95% |    | Уровень надежности 90% |    | Уровень надежности 85% |    | Уровень надежности 80% |    | Уровень надежности 75% |    |
|-------------------------|---|------------------------|----|------------------------|----|------------------------|----|------------------------|----|------------------------|----|
| γ                       | П | П                      | ΔП | П                      | ΔП | П                      | ΔП | П                      | ΔП | П                      | ΔП |

При  $\bar{r}=6,0$ 

|      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,60 | 1,64  | 1,38 | 0,26 | 1,14 | 0,50 | 0,92 | 0,72 | 0,71 | 0,93 | 0,51 | 1,13 |
| 0,65 | 2,18  | 1,89 | 0,29 | 1,60 | 0,58 | 1,33 | 0,85 | 1,08 | 1,10 | 0,84 | 1,34 |
| 0,70 | 2,83  | 2,50 | 0,33 | 2,17 | 0,65 | 1,85 | 0,98 | 1,55 | 1,28 | 1,26 | 1,57 |
| 0,75 | 3,68  | 3,28 | 0,40 | 2,89 | 0,79 | 2,51 | 1,17 | 2,15 | 1,53 | 1,80 | 1,88 |
| 0,80 | 4,75  | 4,28 | 0,47 | 3,82 | 0,93 | 3,37 | 1,38 | 2,93 | 1,82 | 2,51 | 2,24 |
| 0,85 | 6,13  | 5,58 | 0,55 | 5,04 | 1,09 | 4,51 | 1,62 | 3,99 | 2,14 | 3,49 | 2,69 |
| 0,90 | 7,99  | 7,33 | 0,66 | 6,70 | 1,29 | 6,08 | 1,91 | 5,47 | 2,52 | 4,87 | 3,12 |
| 0,95 | 10,72 | 9,94 | 0,78 | 9,20 | 1,52 | 8,47 | 2,25 | 7,74 | 2,98 | 7,02 | 3,70 |

ла сортировочных путей. Дополнительные простои возникают в подсистеме из-за отказа технических средств, надежность которых хотя и достаточно велика (0,94—0,99), но требует резервирования путей.

С учетом коэффициентов готовности технологических каналов и технических устройств подсистемы «Г—ПФ—ВФ» формула расчета путевого развития будет иметь вид

$$P_{\text{ПФ}} = P_{\text{Н}} + \frac{I_{\text{В}} \frac{1}{K_{\text{ВФ}}^0} [\bar{r}_{\text{Н}} T_{\text{К}} + \beta \sigma(T_{\text{К}}) - 1] - T_{\text{Н}}}{I_{\text{В}} \frac{1}{K_{\text{ВФ}}^0}} + P_{\text{М}} + P_{\text{спец.}}, \quad (9.58)$$

$$P_{\text{ПФ}} = [\bar{r}_{\text{Н}} T_{\text{К}} (1 + \beta \theta) - 1] - \mu T_{\text{К}} K_{\text{ВФ}}^0 + P_{\text{Н}} + P_{\text{М}} + P_{\text{спец.}}, \quad (9.59)$$

где  $K_{\text{ВФ}}^0$  — коэффициент готовности вытяжек формирования;  $K_{\text{ВФ}}^0 = K_{\text{ВФ}}^{\text{ТХ}} K_{\text{ВФ}}^{\text{Т}}$ ;  $K_{\text{ВФ}}^{\text{Т}}$  — коэффициент готовности технических средств вытяжек формирования;  $K_{\text{ВФ}}^{\text{ТХ}}$  — коэффициент готовности технологических каналов вытяжек формирования.

Таким образом, на число сортировочных путей влияет ограничивающий параметр — интервал выставки готовых составов в парк отправления (с его увеличением уменьшается коэффициент готовности вытяжек формирования).

### 9.3. Оптимальное путевое развитие подсистемы «Вытяжки формирования — парк отправления — выходные участки»

Завершающая подсистема сортировочной станции — «Вытяжки формирования — парк отправления — выходные участки». Входной поток в подсистему — готовые составы, выставляемые в парк отправления. Выходной поток — отправляемые со станции поезда. Вход-

ной поток в подсистеме обслуживают последовательно соединенные технологические каналы: вытяжки формирования, маршруты перестановки составов, парки и пути парка отправления, маршруты отправления в выходной горловине парка отправления, выходы на примыкающие участки.

Входной поток готовых составов поступает по вытяжкам формирования, которые (при последовательном расположении сортировочного и отправочного парков) являются и выставочными путями. Многоэлементность канала вытяжек формирования обеспечивает возможность параллельной выставки составов. Резервирование вытяжек формирования осуществляется за счет укладки стрелочных переводов. Поэтому при отказе одной из вытяжек формирования составы можно переставлять по оставшимся  $n - 1$  вытяжкам.

Специализация вытяжек формирования по пучкам сортировочного парка, на которых накапливают вагоны на одно направление, и специализация путей парка отправления по направлениям, примыкающим к станциям, позволяет установить параллельные маршруты перестановки готовых составов во входной горловине парка отправления. Стрелочные переводы горловины объединяют в маршруты так, чтобы обеспечить одновременную перестановку составов. Кроме того, стрелочные развязки в горловине позволяют переставлять составы на любой путь отправления при отказе одного из маршрутов. Таким образом, осуществляется резервирование маршрутов перестановки.

На практике составы не всегда переставляют параллельно, так как перед входной горловиной парка отправления на телетайпном посту ЦТК оператор ведет натурную перепись вагонов. Только расположение телетайпных постов по разные стороны входной горловины позволяет обеспечить параллельную перестановку двух готовых составов.

Последующей технологической линией подсистемы «ВФ—ПО—ВыхУ» являются пути парка отправления, на которых подготавливают составы к отправлению. Эти пути — многоэлементное обслуживающее устройство, готовность которого позволяет своевременно выставлять составы. Отказ этого технологического канала может привести к отказу подсистемы «ВФ—ПО—ВыхУ» в целом.

Поезда отправляют по маршрутам выходной горловины парка. Возможность объединения стрелок в параллельные маршруты обеспечивает одновременное отправление поездов на разные направления, примыкающие к станциям. Кроме того, соединение маршрутов стрелочными переводами позволяет их резервировать. Бригады ПТО и ПКО — также параллельно работающие многоэлементные каналы по техническому и коммерческому осмотру составов, подготавливаемых к отправлению. В связи с тем, что готовые составы выставляют в парк отправления неравномерно, возникают их простои в ожидании осмотра и ремонта вагонов. Параллельно каналам технического и коммерческого осмотра работает техническая контора, операторы которой подбирают документы на готовые поезда. Об-

щее время простоя в ожидании каналов ПТО и в процессе обслуживания каналами ПТО  $\Sigma t_{\text{пто}}$  может быть больше, равно или меньше времени по каналам ПКО и ЦКТ, т. е.

$$\Sigma t_{\text{пто}} \cong \Sigma t_{\text{отк}};$$

$$\Sigma t_{\text{пто}} \cong \Sigma t_{\text{пко}}.$$

В зависимости от того, какой канал — ПТО, ПКО или ЦТК — дольше задерживает составы, выходной поток по этому каналу и принимают в качестве входного для последующих обслуживающих элементов.

Основные технологические параметры подсистемы «ВФ—ПО—ВыхУ»: время на выполнение технологических операций по выставке составов, подготовке и отправлению готового поезда из подсистемы  $T_{\text{эл}}^{\text{по}}$ , интервал отправления поезда на каждый участок  $T_0$ , технологические интервалы по каналам ПТО  $I_{\text{пто}}$  и ПКО  $I_{\text{пко}}$ , интервал работы каналов ЦТК  $I_{\text{цтк}}$ . Ограничивающим параметром подсистемы является интервал отправления поездов  $I_0$ .

Отказы ЭЦ на вытяжках формирования приводят к увеличению времени окончания формирования составов с головы поезда и при достаточной продолжительности могут вызвать заполнение подгорочных путей и остановку роспуска составов, что равносильно снижению перерабатывающей способности горки.

Отказы устройств ЭЦ входной горловины парка отправления задерживают выставку сформированных составов, в результате растет время занятия вытяжек готовыми составами, снижается темп окончания формирования составов на подгорочных путях.

Следствие отказа устройств ЭЦ выходной горловины парка отправления и выходного участка — увеличение времени простоя составов в парке. При длительных отказах или большой густоте потока, поступающего в парк, происходит заполнение всех путей и отказ распространяется на подсистему «Г—ПФ—ВФ». Аналогичный сбой работы возможен в случае отказа пневмопочты.

Отказы в работе подсистемы «ВФ—ПО—ВыхУ», в конечном счете, оказывают влияние на работу двух подсистем: «Г—ПФ—ВФ» и «ВыхУ—ПП—Г». Они сопряжены с различными техническими, экономическими и эксплуатационными потерями.

Технические устройства электрической централизации, пути, контактной сети резервируют по конструктивным технологическим каналам подсистемы. Это обуславливает их параллельно-последовательное соединение. В целом по подсистеме «ВФ—ПО—ВыхУ» коэффициент готовности с учетом неравномерности отказов технических средств определяют по величине произведения коэффициентов соответствующих каналов.

Технологические каналы подсистемы ПТО, ПКО, ЦТК также представляют собой в структурном отношении параллельно-последовательное соединение. Резервирование их элементов можно рассматривать как резервирование с дробной кратностью.

В то же время отказ технологического канала вызывает отказ в работе всей подсистемы независимо от степени работоспособности остальных каналов. Коэффициент готовности технологических каналов подсистемы в этом случае

$$K_{\text{ПО}}^{\text{ТХ}} = [1 - (1 - K_{\text{ПТО}})^{n_6}] [1 - (1 - K_{\text{ПКО}})^{n_7}] [1 - (1 - K_{\text{ОТК}})^{n_8}], \quad (9.60)$$

где  $K_{\text{ПТО}}$ ,  $K_{\text{ПКО}}$ ,  $K_{\text{ОТК}}$  — соответственно коэффициенты готовности бригады ПТО, ПКО и оператора ЦТК;  $n_6$ ,  $n_7$ ,  $n_8$  — соответственно число бригад ПТО, ПКО и операторов ЦТК.

Общий коэффициент готовности подсистемы «ВФ—ПО—ВыхУ» при условии независимости возникновения в ней технических и технологических отказов

$$K_{\text{ВФ—ПО—ВыхУ}}^{\text{О}} = K_{\text{ПО}}^{\text{Т}} K_{\text{ПО}}^{\text{ТХ}}. \quad (9.61)$$

Число путей в подсистеме зависит от широкого круга взаимодействующих технологических параметров, определяющих объем работы и функционирование как отдельных каналов, так и подсистемы в целом. Составим уравнение баланса работы подсистемы «ВФ—ПО—ВыхУ» за период  $T_{\text{К}}$ :

$$П_{\text{ПО}} = \frac{T_{\text{ЗП}}}{I_{\text{О}}} + [\bar{r}_{\text{В}} T_{\text{К}} + \beta \sigma (T_{\text{К}}) - 1] - \frac{T_{\text{К}}}{I_{\text{О}}}, \quad (9.62)$$

где  $T_{\text{ЗП}}$  — время занятия отправочного пути технологическими операциями с учетом ввода и вывода составов (поездов);  $I_{\text{О}}$  — расчетный интервал вывода;  $\bar{r}_{\text{В}}$  — интенсивность выставки готовых составов в парк отправления.

Из уравнения (9.62) расчетная формула путевого развития подсистемы «ВФ—ПО—ВыхУ» с учетом дополнительных путей примет вид

$$П_{\text{ПО}} = \frac{I_{\text{О}} [\bar{r}_{\text{В}} T_{\text{К}} + \beta \sigma (T_{\text{К}}) - 1] - T_{\text{К}} + T_{\text{ЗП}}}{I_{\text{О}}} + П_{\text{Д}}. \quad (9.63)$$

Число дополнительных путей

$$П_{\text{Д}} = b - 1 + П_{\text{Х}}, \quad (9.64)$$

где  $b$  — число коротких вытяжных путей, на которых выполняют маневры по окончании формирования с заходом в парк отправления (если вытяжки имеют нормативную длину, то  $b = 1$ );  $П_{\text{Х}}$  — число ходовых и других дополнительных путей в соответствии с ИПСУ.

Заменяв в формуле (9.63) среднее квадратичное отклонение вывода поездов за период  $T_{\text{К}}$  коэффициентом вариации  $\vartheta = \frac{\sigma(T_{\text{К}})}{\bar{r}_{\text{В}} T_{\text{К}}}$ , а обратную величину интервала отправления — интенсивностью обслуживания потока  $\mu = \frac{1}{I_{\text{О}}}$ , получим формулы для расчета путевого развития подсистемы «ВФ—ПО—ВыхУ»:

$$П_{\text{ПО}} = [\bar{r}_{\text{В}} T_{\text{К}} (1 + \beta \vartheta) - 1] - \mu (T_{\text{К}} - T_{\text{ЗП}}^{\text{ПО}}) + П_{\text{Д}} \quad (9.65)$$

при

$$[\bar{r}_{\text{В}} T_{\text{К}} (1 + \beta \vartheta) - 1] - \mu T_{\text{К}} > 0,$$

или

$$П_{\text{ПО}} = \mu T_{\text{ЗП}}^{\text{ПО}} + П_{\text{Д}} \quad (9.66)$$

при

$$[\bar{r}_{\text{В}} T_{\text{К}} (1 + \beta \vartheta) - 1] - \mu T_{\text{К}} \leq 0.$$

В табл. 9.3 приведены результаты расчетов числа путей отправления (без дополнительных) при различных значениях плотности потока отправляемых поездов и коэффициента загрузки выходного канала (величина которого равна произведению  $\bar{r}_{\text{В}} I_{\text{О}}$  при условии полного обеспечения надежности работы подсистемы «ВФ—ПО—ВыхУ»).

Таблица 9.3

Расчет числа в подсистеме «ВФ—ПО—ВыхУ»

| Уровень надежности 100% |       | Уровень надежности 95% |              | Уровень надежности 90% |              | Уровень надежности 85% |              | Уровень надежности 80% |              | Уровень надежности 75% |              |
|-------------------------|-------|------------------------|--------------|------------------------|--------------|------------------------|--------------|------------------------|--------------|------------------------|--------------|
| $\gamma$                | $\Pi$ | $\Pi$                  | $\Delta \Pi$ | $\Pi$                  | $\Delta \Pi$ | $\Pi$                  | $\Delta \Pi$ | $\Pi$                  | $\Delta \Pi$ | $\Pi$                  | $\Delta \Pi$ |

При  $\bar{r} = 1,5$  состава/ч,  $T_{\text{ЗП}} = 0,75$  ч

|      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,60 | 3,40 | 3,17 | 0,23 | 2,96 | 0,44 | 2,75 | 0,65 | 2,55 | 0,85 | 2,36 | 1,04 |
| 0,65 | 3,71 | 3,45 | 0,26 | 3,20 | 0,51 | 2,96 | 0,75 | 2,73 | 0,98 | 2,51 | 1,20 |
| 0,70 | 4,11 | 3,82 | 0,29 | 3,54 | 0,57 | 3,26 | 0,85 | 3,00 | 1,11 | 2,74 | 1,37 |
| 0,75 | 4,62 | 4,29 | 0,33 | 3,97 | 0,65 | 3,66 | 0,96 | 3,36 | 1,26 | 3,06 | 1,56 |
| 0,80 | 5,24 | 4,88 | 0,36 | 4,52 | 0,72 | 4,17 | 1,07 | 3,83 | 1,41 | 3,50 | 1,74 |
| 0,85 | 6,03 | 5,62 | 0,41 | 5,22 | 0,81 | 4,83 | 1,20 | 4,44 | 1,59 | 4,06 | 1,97 |
| 0,90 | 7,07 | 6,61 | 0,46 | 6,16 | 0,91 | 5,72 | 1,35 | 5,28 | 1,79 | 4,85 | 2,22 |
| 0,95 | 8,68 | 8,15 | 0,53 | 7,62 | 1,06 | 7,10 | 1,58 | 6,59 | 2,09 | 6,08 | 2,60 |

При  $\bar{r} = 2,0$  состава/ч

|      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,60 | 4,05 | 3,82 | 0,23 | 3,60 | 0,45 | 3,39 | 0,66 | 3,18 | 0,87 | 2,99 | 1,06 |
| 0,65 | 4,34 | 4,07 | 0,27 | 3,81 | 0,53 | 3,57 | 0,77 | 3,33 | 1,01 | 3,10 | 1,24 |
| 0,70 | 4,73 | 4,43 | 0,30 | 4,13 | 0,60 | 3,85 | 0,88 | 3,57 | 1,16 | 3,31 | 1,42 |
| 0,75 | 5,25 | 4,90 | 0,35 | 4,57 | 0,68 | 4,24 | 1,01 | 3,93 | 1,32 | 3,62 | 1,63 |
| 0,80 | 5,91 | 5,52 | 0,39 | 5,14 | 0,77 | 4,77 | 1,14 | 4,41 | 1,50 | 4,06 | 1,85 |
| 0,85 | 6,75 | 6,32 | 0,43 | 5,89 | 0,86 | 5,48 | 1,27 | 5,06 | 1,69 | 4,66 | 2,09 |
| 0,90 | 7,88 | 7,40 | 0,48 | 6,91 | 0,97 | 6,44 | 1,44 | 5,97 | 1,91 | 5,51 | 2,37 |
| 0,95 | 9,61 | 9,05 | 0,56 | 8,49 | 1,12 | 7,94 | 1,67 | 7,39 | 2,22 | 6,85 | 2,76 |

При  $\bar{r} = 3,0$  состава/ч

|      |       |       |      |       |      |      |      |      |      |      |      |
|------|-------|-------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,60 | 5,33  | 5,09  | 0,24 | 4,87  | 0,46 | 4,65 | 0,68 | 4,45 | 0,88 | 4,25 | 1,08 |
| 0,65 | 5,55  | 5,27  | 0,28 | 5,00  | 0,55 | 4,75 | 0,80 | 4,51 | 1,04 | 4,28 | 1,27 |
| 0,70 | 5,91  | 5,59  | 0,32 | 5,28  | 0,63 | 4,98 | 0,97 | 4,69 | 1,22 | 4,42 | 1,49 |
| 0,75 | 6,42  | 6,06  | 0,36 | 5,70  | 0,72 | 5,35 | 1,07 | 5,02 | 1,40 | 4,70 | 1,72 |
| 0,80 | 7,12  | 6,70  | 0,42 | 6,29  | 0,83 | 5,89 | 1,23 | 5,51 | 1,61 | 5,13 | 1,99 |
| 0,85 | 8,05  | 7,57  | 0,48 | 7,11  | 0,94 | 6,65 | 1,40 | 6,21 | 1,84 | 5,77 | 2,28 |
| 0,90 | 9,32  | 8,78  | 0,54 | 8,25  | 1,07 | 7,73 | 1,59 | 7,21 | 2,11 | 6,71 | 2,61 |
| 0,95 | 11,26 | 10,64 | 0,62 | 10,03 | 1,23 | 9,42 | 1,84 | 8,81 | 2,15 | 8,22 | 3,04 |

Окончание табл. 9.3

| Уровень надежности 100% |       | Уровень надежности 95% |             | Уровень надежности 90% |             | Уровень надежности 85% |             | Уровень надежности 80% |             | Уровень надежности 75% |             |
|-------------------------|-------|------------------------|-------------|------------------------|-------------|------------------------|-------------|------------------------|-------------|------------------------|-------------|
| $\gamma$                | $\Pi$ | $\Pi$                  | $\Delta\Pi$ | $\Pi$                  | $\Delta\Pi$ | $\Pi$                  | $\Delta\Pi$ | $\Pi$                  | $\Delta\Pi$ | $\Pi$                  | $\Delta\Pi$ |

При  $\bar{r}=4,0$  состава/ч

|      |       |       |      |       |      |       |      |       |      |      |      |
|------|-------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|------|------|
| 0,60 | 6,60  | 6,36  | 0,24 | 6,13  | 0,47 | 5,91  | 0,69 | 5,70  | 0,90 | 5,50 | 1,10 |
| 0,65 | 6,74  | 6,46  | 0,28 | 6,18  | 0,56 | 5,93  | 0,81 | 5,68  | 1,06 | 5,44 | 1,30 |
| 0,70 | 7,05  | 6,72  | 0,33 | 6,40  | 0,65 | 6,09  | 0,96 | 5,79  | 1,26 | 5,51 | 1,54 |
| 0,75 | 7,54  | 7,16  | 0,38 | 6,78  | 0,76 | 6,42  | 1,12 | 6,08  | 1,46 | 5,74 | 1,80 |
| 0,80 | 8,24  | 7,81  | 0,43 | 7,38  | 0,86 | 6,96  | 1,28 | 6,55  | 1,79 | 6,15 | 2,09 |
| 0,85 | 9,23  | 8,73  | 0,50 | 8,23  | 1,00 | 7,75  | 1,48 | 7,27  | 1,96 | 6,81 | 2,42 |
| 0,90 | 10,61 | 10,04 | 0,56 | 9,47  | 1,14 | 8,91  | 1,70 | 8,35  | 2,26 | 7,81 | 2,80 |
| 0,95 | 12,75 | 12,08 | 0,67 | 11,42 | 1,33 | 10,76 | 1,99 | 10,11 | 2,64 | 9,47 | 3,28 |

При  $\bar{r}=5,0$  состава/ч

|      |       |       |      |       |      |       |      |       |      |       |      |
|------|-------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
| 0,60 | 7,86  | 7,62  | 0,24 | 7,39  | 0,47 | 7,17  | 0,69 | 6,96  | 0,90 | 6,76  | 1,10 |
| 0,65 | 7,92  | 7,63  | 0,29 | 7,36  | 0,56 | 7,10  | 0,82 | 6,84  | 1,08 | 6,60  | 1,32 |
| 0,70 | 8,16  | 7,83  | 0,33 | 7,50  | 0,66 | 7,19  | 0,97 | 6,89  | 1,27 | 6,60  | 1,56 |
| 0,75 | 8,62  | 8,23  | 0,39 | 7,84  | 0,78 | 7,47  | 1,15 | 7,12  | 1,50 | 6,77  | 1,85 |
| 0,80 | 9,33  | 8,87  | 0,46 | 8,42  | 0,91 | 7,99  | 1,34 | 7,56  | 1,77 | 7,15  | 2,18 |
| 0,85 | 10,35 | 9,82  | 0,53 | 9,30  | 1,05 | 8,79  | 1,56 | 8,29  | 2,06 | 7,81  | 2,54 |
| 0,90 | 11,82 | 11,21 | 0,61 | 10,61 | 1,21 | 10,02 | 1,80 | 9,43  | 2,39 | 8,86  | 2,96 |
| 0,95 | 14,17 | 13,42 | 0,75 | 12,71 | 1,46 | 12,01 | 2,16 | 11,32 | 2,85 | 10,64 | 3,53 |

При  $\bar{r}=6,0$  состава/ч

|      |       |       |      |       |      |       |      |       |      |       |      |
|------|-------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
| 0,60 | 9,12  | 8,88  | 0,24 | 8,64  | 0,48 | 8,42  | 0,70 | 8,21  | 0,91 | 8,00  | 1,12 |
| 0,65 | 9,09  | 8,80  | 0,29 | 8,52  | 0,57 | 8,26  | 0,83 | 8,00  | 1,09 | 7,66  | 1,43 |
| 0,70 | 9,27  | 8,93  | 0,34 | 8,60  | 0,67 | 8,28  | 0,99 | 7,96  | 1,31 | 7,68  | 1,59 |
| 0,75 | 9,68  | 9,28  | 0,40 | 8,89  | 0,79 | 8,51  | 1,17 | 8,15  | 1,53 | 7,79  | 1,89 |
| 0,80 | 10,38 | 9,90  | 0,48 | 9,44  | 0,94 | 8,99  | 1,39 | 8,56  | 1,82 | 8,14  | 2,24 |
| 0,85 | 11,42 | 10,87 | 0,55 | 10,33 | 1,09 | 9,80  | 1,62 | 9,29  | 2,13 | 8,78  | 2,64 |
| 0,90 | 12,97 | 12,33 | 0,64 | 11,70 | 1,27 | 11,08 | 1,89 | 10,47 | 2,50 | 9,87  | 3,10 |
| 0,95 | 15,43 | 14,68 | 0,75 | 13,94 | 1,49 | 13,20 | 2,23 | 12,48 | 2,95 | 11,76 | 3,67 |

Число путей в подсистеме рассчитано с учетом увеличения его на величину  $\Delta\Pi$  в связи с несовпадением темпов поступления составов в подсистему в период времени  $T_K$  и отправления поездов на участок. Однако увеличение числа путей в подсистеме может потребоваться и из-за технических отказов в ее работе, когда, например, не совпадают темпы поступления составов в подсистему в период  $T_K$  и обработки их в каналах ПТО  $q_{\text{пто}}$ , ПКО  $q_{\text{пко}}$ , ЦТК  $q_{\text{цтк}}$  и отправления на выходные участки  $q_{\text{выху}}$ . Поэтому для обеспечения полной надежности работы подсистемы «ВФ—ПО—ВыхУ» рассчитанное число путей необходимо увеличить. Кроме того, формула (9.63) предусматривает надежность технических средств на уровне 100 %, а в действительности она составляет 0,94—0,99. Обеспечение оптимальной надежности требует увеличения числа путей в парке отправления.

С учетом коэффициентов готовности технологических каналов и технических устройств подсистемы «ВФ—ПО—ВыхУ» формула расчета путевого развития примет вид

$$\Pi_{\text{по}} = \frac{I_0 \frac{1}{K_{\text{ВыхУ}}^0} [\bar{r}_B T_K + \beta \sigma(T_K) - 1] - T_K + T_{\text{зп}}^{\text{по}} + \frac{1}{K_{\text{ВФ—ПО—ВыхУ}}^0}}{I_0 \frac{1}{K_{\text{ВыхУ}}^0} + \Pi_{\text{д}}}, \quad (9.67)$$

или с учетом формулы (9.65)

$$\Pi_{\text{по}} = [\bar{r} T_K (1 + \beta_B \theta) - 1] - \mu K_{\text{ВыхУ}}^0 \left( T_K - T_{\text{зп}}^{\text{по}} \frac{1}{K_{\text{ВФ—ПО—ВыхУ}}^0} \right) + \Pi_{\text{д}}, \quad (9.68)$$

где  $K_{\text{ВыхУ}}^0$  — коэффициент готовности выходных участков, равен произведению коэффициентов готовности технологических каналов и технических средств;  $K_{\text{ВФ—ПО—ВыхУ}}^0$  — коэффициент готовности подсистемы в целом (величина его равна произведению между коэффициентов готовности технологических каналов и технических средств подсистемы в целом).

Таким образом, коэффициент готовности выходных участков  $K_{\text{ВыхУ}}^0$  влияет на число путей в парке отправления через ограничивающий параметр подсистемы — интервал отправления поездов  $I_0$ , а коэффициент готовности подсистемы в целом влияет через параметр  $T_{\text{зп}}^{\text{по}}$ .

#### 9.4. Оптимальное путевое развитие подсистемы «Входные участки — транзитный парк — выходные участки»

Подсистема «Входные участки—транзитный парк—выходные участки» («ВхУ—ТрП—ВыхУ») в зависимости от схемы сортировочной станции может работать как самостоятельно, так и в рамках комплекса приема или отправления поездов. Входной и выходной потоки из подсистемы — транзитные поезда.

Подсистема работает безотказно, если нет задержек поездов на подходах. Резервирование элементов технологических фаз повышает ее эксплуатационную надежность до уровня, обеспечивающего прием поездов в период их сгущенного поступления.

Одновременный прием входного потока поездов с разных подходов обеспечивают параллельные маршруты во входной горловине, устанавливаемые в зависимости от последовательности заполнения путей и характера подвода поездов. Отказ в этой технологической фазе означает, что в транзитный парк невозможно принять одновременно два и более поездов. Это приводит к задержкам поездов на подходе и образованию очереди в обслуживании.

Основная технологическая фаза подсистемы — пути транзитного парка, на которых обрабатывают составы транзитных поездов.

Они являются многоэлементным обслуживающим устройством, готовность которого позволяет беспрепятственно принимать поезда с входных участков. Число путей — функция многих переменных. Емкость их рассчитывают по периоду максимального насыщения подсистемы транзитными поездами. Отказ группы элементов технологической фазы может привести к отказу работы подсистемы в целом.

Многоэлементность маршрутов отправления в выходной горловине подсистемы позволяет одновременно отправлять транзитные поезда на разные участки. Отказ этой технологической фазы — отсутствие возможности параллельного отправления поездов из-за нарушения специализации путей по примыкающим направлениям и враждебности маршрутов.

В подсистеме работают многоэлементные технологические каналы технического и коммерческого осмотра составов — ПТО и ПКО. Неравномерность прибытия транзитных поездов в подсистему и неодинаковое время технического и коммерческого осмотра составов, т. е. несовпадение темпов поступления транзитных поездов и их обслуживания, вызывают дополнительные простои в ожидании осмотра и ремонта вагонов. Время обработки составов характеризует функция надежности. В качестве расчетного при определении интервала отправления поездов принимают выходной поток по ограничивающему каналу — ПТО или ПКО.

Основными технологическими параметрами подсистемы «ВхУ—ТрП—ВыхУ» являются время на выполнение технологических операций по приему транзитных поездов, подготовке их к отправлению и отправление поезда из подсистемы  $T_{\text{зп}}^{\text{трп}}$ , интервал отправления транзитного поезда на участок  $\bar{I}_0^{\text{тр}}$ , технологические интервалы по каналам ПТО  $I_{\text{пто}}$  и ПКО  $I_{\text{пко}}$ .

Ограничивающий параметр подсистемы — интервал отправления транзитных поездов  $I_0^{\text{тр}}$ , который рассчитывают делением уровня использования пропускной способности примыкающих участков  $\gamma_0$  на интенсивность отправления на участок транзитных поездов  $\lambda_{\text{тр}}$ .

Коэффициент готовности технологических каналов подсистемы определяют по формуле

$$K_{\text{трп}}^{\text{тх}} = [1 - (1 - K_{\text{пто}})^{n_9}] [1 - (1 - K_{\text{пко}})^{n_{10}}], \quad (9.69)$$

где  $K_{\text{пто}}$ ,  $K_{\text{пко}}$  — коэффициенты готовности соответственно одной бригады ПТО и одной бригады ПКО;  $n_9$ ,  $n_{10}$  — число бригад соответственно ПТО и ПКО.

Общий коэффициент готовности подсистемы «ВхУ—ТрП—ВыхУ» при условии независимости возникновения в ней технических и технологических отказов равен произведению технического и технологического коэффициентов готовности  $K_{\text{трп}}^{\text{т}}$  и  $K_{\text{трп}}^{\text{тх}}$ .

Основные обслуживающие технические устройства — средства сигнализации и связи, пути, контактная сеть, информационная техника. Резервируют технические устройства по конструктивным технологическим каналам подсистемы. Поэтому они обеспечивают па-

раллельное резервирование по элементам технологических каналов и последовательное по технологическим фазам.

Коэффициент готовности технических устройств подсистемы «ВхУ—ТрП—ВыхУ» с учетом независимости отказов технических средств

$$K_{\text{трп}}^{\text{т}} = K_{\text{гкз}}^{\text{ав}} K_{\text{гкз}}^{\text{св}} K_{\text{гкз}}^{\text{п}} K_{\text{гкз}}^{\text{кс}} K_{\text{гкз}}^{\text{ис}}, \quad (9.70)$$

где  $K_{\text{гкз}}^{\text{ав}}$ ,  $K_{\text{гкз}}^{\text{св}}$ ,  $K_{\text{гкз}}^{\text{п}}$ ,  $K_{\text{гкз}}^{\text{кс}}$ ,  $K_{\text{гкз}}^{\text{ис}}$  — соответственно коэффициенты готовности устройств сигнализации и связи, пути, контактной сети, информационно-технических средств.

Число путей в подсистеме рассчитывают по уравнению баланса в периоде времени  $T_{\text{к}}$ :

$$P_{\text{тр}} = \frac{T_{\text{зп}}^{\text{трп}}}{I_0^{\text{тр}}} + [\bar{r}_{\text{тр}} T_{\text{к}} + \beta \sigma(T_{\text{к}}) - 1] - \frac{T_{\text{к}}}{I_0^{\text{тр}}}. \quad (9.71)$$

Первый член формулы  $\frac{T_{\text{зп}}^{\text{трп}}}{I_0^{\text{тр}}}$  характеризует остаток транзитных поездов на начало периода  $T_{\text{к}}$ , второй  $[\bar{r}_{\text{тр}} T_{\text{к}} + \beta \sigma(T_{\text{к}}) - 1]$  — подвод транзитных поездов за период времени  $T_{\text{к}}$ , третий —  $\frac{T_{\text{к}}}{I_0^{\text{тр}}}$  — вывод транзитных поездов, где  $I_0^{\text{тр}}$  — расчетный интервал отправления транзитных поездов, равный отношению уровня использования пропускной способности отдельно взятого участка  $\gamma_0$  к интенсивности отправления на участок транзитных поездов  $r_{\text{тр}}$ .

Из этого уравнения с учетом ходовых и других дополнительных путей получим:

$$P_{\text{тр}} = \frac{I_0^{\text{тр}} [\bar{r}_{\text{тр}} T_{\text{к}} + \beta \sigma(T_{\text{к}}) - 1] - T_{\text{к}} + T_{\text{зп}}^{\text{трп}}}{I_0^{\text{тр}}} + P_{\text{д}}. \quad (9.72)$$

Число дополнительных путей определяют аналогично подсистеме «ВхУ—ПП—Г».

Заменив среднее квадратичное отклонение подвода транзитных поездов коэффициентом вариации  $\theta = \frac{\sigma(T_{\text{к}})}{r_{\text{тр}} T_{\text{к}}}$  и обратную величину интервала отправления транзитных поездов  $I_0^{\text{тр}}$  интенсивностью обслуживания, получим расчетные формулы путевого развития подсистемы «ВхУ—ТрП—ВыхУ»:

$$P_{\text{тр}} = [\bar{r}_{\text{тр}} T_{\text{к}} (1 + \beta \theta) - 1] - \mu (T_{\text{к}} - T_{\text{зп}}^{\text{трп}}) + P_{\text{д}} \quad (9.73)$$

при

$$[\bar{r}_{\text{тр}} T_{\text{к}} (1 + \beta \theta) - 1] - \mu T_{\text{к}} > 0,$$

или

$$P_{\text{тр}} = \mu T_{\text{зп}}^{\text{трп}} + P_{\text{д}} \quad (9.74)$$

при

$$[\bar{r}_{\text{тр}} T_{\text{к}} (1 + \beta \theta) - 1] - \mu T_{\text{к}} = 0.$$

В табл. 9.4 приведены результаты расчета путевого развития подсистемы без учета дополнительных путей при условии полной эксплуатационной надежности работы подсистемы. Однако практика показывает, что такую надежность технические и технологические комплексы не обеспечивают. Включение в расчетные формулы коэффициентов готовности технологических каналов и технических устройств учитывает дополнительные простои, возникающие в подсистеме из-за их отказа.

Таблица 9.4

Расчет количества путей в транзитных парках сортировочных станций

| Загрузка<br>выходного<br>канала $\gamma$ | Оптимальное количество путей при разных размерах движения |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                                          | $\lambda=0,25$                                            | $\lambda=0,50$ | $\lambda=0,75$ | $\lambda=1,00$ | $\lambda=1,25$ | $\lambda=1,50$ | $\lambda=1,75$ | $\lambda=2,00$ | $\lambda=2,25$ | $\lambda=2,50$ | $\lambda=2,75$ | $\lambda=3,00$ |
| 0,50                                     | 1,10                                                      | 1,50           | 1,88           | 2,27           | 2,65           | 3,02           | 3,42           | 3,80           | 4,17           | 4,55           | 4,93           | 5,31           |
| 0,55                                     | 1,35                                                      | 1,74           | 2,10           | 2,46           | 2,82           | 3,16           | 3,51           | 3,86           | 4,20           | 4,57           | 4,91           | 5,26           |
| 0,60                                     | 1,61                                                      | 2,01           | 2,38           | 2,72           | 3,06           | 3,39           | 3,72           | 4,04           | 4,36           | 4,68           | 5,00           | 5,32           |
| 0,65                                     | 1,90                                                      | 2,33           | 2,71           | 3,05           | 3,38           | 3,71           | 4,02           | 4,33           | 4,64           | 4,94           | 5,24           | 5,54           |
| 0,70                                     | 2,23                                                      | 2,70           | 3,09           | 3,45           | 3,79           | 4,11           | 4,42           | 4,73           | 5,03           | 5,32           | 5,61           | 5,90           |
| 0,75                                     | 2,60                                                      | 3,12           | 3,55           | 3,93           | 4,28           | 4,62           | 4,94           | 5,24           | 5,55           | 5,84           | 6,13           | 6,42           |
| 0,80                                     | 3,03                                                      | 3,61           | 4,09           | 4,50           | 4,89           | 5,24           | 5,58           | 5,90           | 6,22           | 6,53           | 6,83           | 7,12           |
| 0,85                                     | 3,56                                                      | 4,21           | 4,75           | 5,21           | 5,64           | 6,03           | 6,40           | 6,75           | 7,09           | 7,42           | 7,74           | 8,05           |
| 0,90                                     | 4,32                                                      | 5,02           | 5,62           | 6,15           | 6,62           | 7,07           | 7,49           | 7,88           | 8,26           | 8,63           | 8,98           | 9,33           |
| 0,50                                     | 0,98                                                      | 1,25           | 1,52           | 1,77           | 2,03           | 2,28           | 2,54           | 2,79           | 3,04           | 3,29           | 3,54           | 3,79           |
| 0,55                                     | 1,23                                                      | 1,51           | 1,77           | 2,01           | 2,25           | 2,49           | 2,72           | 2,96           | 3,19           | 3,42           | 3,65           | 3,88           |
| 0,60                                     | 1,51                                                      | 1,81           | 2,07           | 2,31           | 2,55           | 2,77           | 2,99           | 3,22           | 3,43           | 3,65           | 3,87           | 4,08           |
| 0,65                                     | 1,81                                                      | 2,14           | 2,42           | 2,67           | 2,91           | 3,13           | 3,35           | 3,57           | 3,78           | 3,99           | 4,19           | 4,39           |
| 0,70                                     | 2,14                                                      | 2,52           | 2,83           | 3,09           | 3,34           | 3,57           | 3,80           | 4,02           | 4,23           | 4,44           | 4,64           | 4,84           |
| 0,75                                     | 2,51                                                      | 2,95           | 3,30           | 3,59           | 3,87           | 4,12           | 4,35           | 4,58           | 4,80           | 5,01           | 5,22           | 5,43           |
| 0,80                                     | 2,95                                                      | 3,46           | 3,85           | 4,19           | 4,49           | 4,77           | 5,04           | 5,28           | 5,52           | 5,75           | 5,97           | 6,18           |
| 0,85                                     | 3,49                                                      | 4,07           | 4,53           | 4,92           | 5,27           | 5,59           | 5,88           | 6,17           | 6,43           | 6,69           | 6,93           | 7,17           |
| 0,90                                     | 4,25                                                      | 4,89           | 5,41           | 5,87           | 6,28           | 6,65           | 7,00           | 7,33           | 7,64           | 7,94           | 8,22           | 8,49           |

С учетом коэффициентов готовности технологических каналов и технических устройств подсистемы «ВхУ—ТрП—ВыхУ» формула расчета путевого развития будет иметь вид

$$P_{\text{тр}} = \frac{I_{\text{о}}^{\text{тр}} \frac{1}{K_{\text{о}}^{\text{о}}} [\bar{r}_{\text{тр}} T_{\text{к}} + \beta \sigma (T_{\text{к}}) - 1] - T_{\text{к}} + T_{\text{зп}}^{\text{тр}} \frac{1}{K_{\text{ВхУ—ТрП—ВыхУ}}^{\text{о}}}}{I_{\text{о}}^{\text{тр}} \frac{1}{K_{\text{о}}^{\text{о}}} + P_{\text{д}}}, \quad (9.75)$$

$$P_{\text{тр}} = [\bar{r}_{\text{тр}} T_{\text{к}} (1 + \beta \theta) - 1] - \mu (T_{\text{к}} - T_{\text{зп}}^{\text{тр}} \times \frac{1}{K_{\text{ВхУ—ТрП—ВыхУ}}^{\text{о}}}) K_{\text{ВхУ}}^{\text{о}} + P_{\text{д}}, \quad (9.76)$$

где  $K_{\text{ВхУ}}^{\text{о}}$  — коэффициент готовности выходных участков;  $K_{\text{ВхУ—ТрП—ВыхУ}}^{\text{о}}$  — коэффициент готовности подсистемы в целом.

Таким образом, коэффициент готовности выходных участков  $K_{\text{ВхУ}}^{\text{о}}$  влияет на число путей в транзитном парке через ограничивающий параметр подсистемы — интервал отправления поездов  $I_{\text{о}}$ , а коэффициент готовности подсистемы в целом — через параметр  $T_{\text{зп}}^{\text{тр}}$ .

## 9.5. Особенности расчетов путевого развития участковой станции

Надежность работы участковой станции во многом определяют ее расположение на полигоне, развитие технических средств, система управления. На число путей такой станции влияют многие факторы, в том числе месторасположение, техническое оснащение, технологическая значимость (расформирование-формирование местных и транзитных поездов, пополнение или отцепка вагонов от транзитных поездов, формирование сборных и вывозных поездов, выполнение большого объема грузовой работы на подъездных путях), технология работы участка (вывозное, транзитное грузовое, пассажирское движение), заполнение пропускной способности участка, методы управления движением поездов, пропуск длинносоставных поездов и поездов повышенной массы и др.

В приемо-отправочном парке следует рассчитывать число путей для приема поездов, следующих в расформирование, транзитных поездов со сменой или без смены локомотивов и бригад, поездов своего формирования. Часть путей должна быть повышенной длины для приема и отправления длинносоставных поездов. Число путей для приема поездов в расформирование можно рассчитать по формуле

$$P_{\text{рф}}^{\text{поп}} = r_{\text{рф}} T_{\text{зп}}^{\text{рф}} + \frac{I_{\text{выв}}^{\text{рф}} (r_{\text{рф}} T_{\text{к}}^{\text{рф}} + \beta \sigma_{\text{т}} - 1) - T_{\text{к}}^{\text{рф}}}{I_{\text{выв}}^{\text{рф}}} + f - 1 + P_{\text{х}}, \quad (9.77)$$

где  $r_{\text{рф}}$  — интенсивность потока поездов, следующих в расформирование на участковую станцию;  $T_{\text{зп}}^{\text{рф}}$  — технологическое время занятия пути разборочным поездом;  $I_{\text{выв}}^{\text{рф}}$  — расчетный интервал вывода поездов в расформирование;  $f$  — число подходов к парку;  $P_{\text{х}}$  — число ходовых путей.

Число путей для приема транзитных поездов в приемо-отправочном парке

$$P_{\text{тр}}^{\text{поп}} = \frac{I_{\text{о}}^{\text{тр}} [\bar{r}_{\text{тр}} T_{\text{к}}^{\text{тр}} + \beta \sigma_{\text{т}} - 1] - T_{\text{к}}^{\text{тр}}}{I_{\text{о}}^{\text{тр}}} + r_{\text{тр}} T_{\text{зп}}^{\text{тр}} + f - 1. \quad (9.78)$$

При этом следует учитывать, что при смене локомотивов или прицепке-отцепке вагонов время нахождения транзитных поездов на станции будет возрастать. С учетом этого получим:

$$П_{\text{тр}}^{\text{поп}} = \frac{I_{\text{о}}^{\text{тр}} [r_{\text{тр}} T_{\text{к}}^{\text{тр}} + \beta \sigma_{\text{т}} - 1] - T_{\text{к}}^{\text{тр}}}{I_{\text{о}}^{\text{тр}}} + r_{\text{тр}} T_{\text{зп}}^{\text{тр}} (1 - \rho) (1 + \kappa) + f - 1, \quad (9.79)$$

где  $\rho$  — вероятность отцепки или прицепки вагонов к транзитному поезду;  $\kappa$  — доля времени, на которую увеличится период занятия пути маневровыми операциями с транзитными поездами.

Число путей, предназначенных для поездов своего формирования,

$$П_{\text{сф}}^{\text{поп}} = \frac{I_{\text{о}}^{\text{сф}} (r_{\text{сф}} T_{\text{к}}^{\text{сф}} + \beta \sigma_{\text{сф}} - 1) - T_{\text{к}}^{\text{сф}}}{I_{\text{о}}^{\text{сф}}} + r_{\text{сф}} T_{\text{зп}}^{\text{сф}}. \quad (9.80)$$

Для приемо-отправочного парка в целом участковой станции число путей будет представлено суммой результатов расчетов по формулам (9.77), (9.79), (9.80):

$$П_{\text{поп}} = П_{\text{рф}}^{\text{поп}} + П_{\text{тр}}^{\text{поп}} + П_{\text{сф}}^{\text{поп}}. \quad (9.81)$$

В приемо-отправочный парк участковой станции за период  $T_{\text{к}}$  могут одновременно поступать как транзитные поезда, так и следующие в расформирование. Поэтому для расчета числа путей в парке учитывают объединенный интервал вывода  $I_{\text{об}}$  ( $I_{\text{о}}^{\text{тр}} \in I_{\text{об}}$ ;  $I_{\text{рф}}^{\text{сф}} \in I_{\text{об}}$ ) или вводят коэффициенты совмещенного прибытия  $\kappa_{\text{св}}$ . Кроме того, возможно совпадение периодов  $T_{\text{к}}$  для приема поездов (как транзитных, так и расформируемых) и выставки сформированных поездов. Такая вероятность в практических условиях равна 0,8—0,7 для большой группы участковых станций. С учетом этого расчетное число путей парка ПОП будет уменьшено и составит:

$$П_{\text{поп}}^{\text{уч}} = П_{\text{поп}} \kappa_{\text{св}} \kappa_{\text{пд}}, \quad (9.82)$$

где  $\kappa_{\text{пд}}$  — коэффициент, учитывающий совпадение периодов  $T_{\text{к}}$  для приема поездов в расформирование и выставки в приемо-отправочный парк из сортировочного.

Введем в выражения (9.80) и (9.81) коэффициенты вариации для поездопотоков, проходящих участковую станцию:

$$\sigma_{\text{уч}} = \frac{\sigma(T_{\text{к}})}{\bar{T}_{\text{к}}}$$

и обслуживания поступающих заявок на участковую станцию

$$\mu = \frac{1}{I_{\text{вых}}^{\text{уч}}},$$

где  $I_{\text{вых}}^{\text{уч}}$  — расчетные интервалы вывода поездов из парка.

После преобразований получим:

$$П_{\text{рф}}^{\text{поп}} = [\bar{r}_{\text{рф}} T_{\text{к}}^{\text{рф}} (1 + \beta_{\text{рф}} \sigma) - 1] - \mu_{\text{рф}} (T_{\text{к}}^{\text{рф}} - T_{\text{зп}}^{\text{рф}}) + П_{\text{д}}^{\text{поп}}; \quad (9.83)$$

$$П_{\text{сф}}^{\text{поп}} = [\bar{r}_{\text{сф}} T_{\text{к}}^{\text{сф}} (1 + \beta_{\text{сф}} \sigma) - 1] - \mu_{\text{сф}} (T_{\text{к}}^{\text{сф}} - T_{\text{зп}}^{\text{сф}}); \quad (9.84)$$

$$П_{\text{тр}}^{\text{поп}} = [\bar{r}_{\text{тр}} T_{\text{к}}^{\text{тр}} (1 + \beta \sigma) - 1] - \mu_{\text{тр}} (T_{\text{к}}^{\text{тр}} - T_{\text{зп}}^{\text{тр}}). \quad (9.85)$$

При этом приращение

$$B = [\bar{r}_i T_{\text{к}} (1 + \beta_i \sigma) - 1] - \mu_i T_{\text{к}} > 0. \quad (9.86)$$

Если  $B = 0$ , то общее число путей в приемо-отправочном парке участковой станции

$$П_{\text{поп}} = \mu T_{\text{зп}} + П_{\text{д}} \quad (9.87)$$

и отдельно по потокам

$$П = \mu_{\text{рф}} T_{\text{зп}}^{\text{рф}} + \mu_{\text{сф}} T_{\text{зп}}^{\text{сф}} + \mu_{\text{тр}} T_{\text{зп}}^{\text{тр}} + П_{\text{д}}. \quad (9.88)$$

На участковой станции, как и в подсистемах сортировочной станции, при расчете путевого развития парков необходимо учитывать коэффициенты готовности технических средств и технологической готовности парка. Это увеличивает значение  $T_{\text{зп}}$ . В целом выражения (9.84) и (9.85) для приемо-отправочного парка участковой станции можно привести к следующему виду:

$$\begin{aligned} П_{\text{поп}} = & [\bar{r}_{\text{рф}} T_{\text{к}} (1 + \beta_{\text{рф}} \sigma) - 1] + [\bar{r}_{\text{сф}} T_{\text{к}} (1 + \beta_{\text{сф}} \sigma) - 1] + \\ & + [\bar{r}_{\text{тр}} T_{\text{к}} (1 + \beta_{\text{тр}} \sigma) - 1] - \mu_{\text{рф}} \left( T_{\text{к}} - \frac{T_{\text{зп}}^{\text{рф}}}{\kappa_{\text{рс}}} \right) - \\ & - \mu_{\text{рф}} \left( T_{\text{к}}^{\text{сф}} - \frac{T_{\text{зп}}^{\text{сф}}}{\kappa_{\text{рс}}} \right) - \mu_{\text{тр}} \left( T_{\text{к}}^{\text{тр}} - \frac{T_{\text{зп}}^{\text{тр}}}{\kappa_{\text{рс}}} \right) + П_{\text{д}}. \end{aligned} \quad (9.89)$$

Путевое развитие сортировочного парка рассчитывают так же, как для сортировочной станции.

## 9.6. Особенности расчета путевого развития местных сортировочно-отправочных парков

Сооружение дополнительной горки и специального местного сортировочно-отправочного парка (МСОП) для вагонопотоков местных назначений разгружает основную сортировочную систему. При этом возможны разные варианты организации работы: выполнение операций по подборке вагонов местных назначений в новой технологической линии, формирование сборных поездов и местных передаточных составов в МСОП и т. д. В результате снижается потребность в путевом развитии основного сортировочного парка и парка отправления, что необходимо учитывать при обосновании технико-экономической эффективности сооружения МСОП.

Путевое развитие местного парка должно обеспечивать оптимальную надежность его работы, наилучшие условия технологии

работы по подборке групп, формированию, обработке и отправлению местных поездов. Кроме того, число путей следует устанавливать исходя из достаточно хорошего их использования. Поскольку вагонопотоки местных назначений могут быть и маломощными, возможно объединение отдельных назначений на одном пути до некоторой расчетной величины  $n_p$ , обеспечивающей рациональное использование путей. Общее число путей в МСОП определяют по формуле

$$P_{\text{МСОП}} = z_{\text{ГР}} P_{\text{ГР}} + \frac{N_{\text{М}}}{n_p} + \sum_{m=1}^n P_m \psi_{\text{МСОП}} + \bar{r}_{\text{МСОП}} T_{\text{ЗП}}, \quad (9.90)$$

где  $z_{\text{ГР}}$  — число параллельных пучков группировочных путей;  $P_{\text{ГР}}$  — число путей в одном группировочном пучке;  $N_{\text{М}}$  — общее число местных вагонов, формируемых в МСОП;  $\sum_{m=1}^n P_m$  — дополнительное число путей с учетом неравномерности отправления поездов на каждый  $m$ -й участок;

$$P_m = \sum_{m=1}^n r_m T_{\text{К}} + 3\sigma - 1 - \frac{T_{\text{К}}}{I_{\text{О}}^m}; \quad (9.91)$$

$r_m$  — общее число грузовых поездов, отправляемых на  $m$ -й участок;  $I_{\text{О}}^m$  — расчетный интервал отправления поездов на  $m$ -й участок;  $\psi_{\text{МСОП}}$  — доля поездов, отправляемых из МСОП;

$$\psi_{\text{МСОП}} = \frac{\bar{r}_{\text{МСОП}}}{\sum \bar{r}_m}; \quad (9.92)$$

$\bar{r}_{\text{МСОП}}$  — интенсивность отправления поездов из МСОП на  $m$ -й участок.

Заменив значение среднего квадратического отклонения через коэффициент вариации  $\theta = \frac{\sigma}{r_m T_{\text{К}}}$  и введя значение интенсивности обслуживания  $\mu_m = \frac{1}{I_{\text{О}}^m}$ , получим формулу для расчета путевого развития МСОП

$$P_{\text{МСОП}} = z_{\text{ГР}} P_{\text{ГР}} + \frac{N_{\text{М}}}{n_p} + [\bar{r}_m T_{\text{К}} (1 + \beta \theta) - 1] - \mu (T_{\text{К}} - T_{\text{ЗП}}) \quad (9.93)$$

при

$$[\bar{r}_m T_{\text{К}} (1 + \beta \theta) - 1] - \mu T_{\text{К}} > 0,$$

или

$$P_{\text{МСОП}} = \mu T_{\text{ЗП}} + z_{\text{ГР}} P_{\text{ГР}} + \frac{N_{\text{М}}}{n_p} \quad (9.94)$$

при

$$[\bar{r}_m T_{\text{К}} (1 + \beta \theta) - 1] - \mu T_{\text{К}} = 0.$$

В табл. 9.5 приведено число сортировочно-отправочных путей в МСОП в зависимости от числа вагонов, включаемых в местный поезд. Время занятия сортировочно-отправочного пути  $T_{\text{ЗП}} = 1$  ч, расчетный вагонопоток (с учетом объединения маломощных струй)

$n_p = 300$  вагонов, надежность технических устройств МСОП — 100 %.

Таблица 9.5

Расчет потребного числа сортировочно-отправочных путей в МСОП

| Суточный вагонопоток, вагонов | Средний состав поездов и подач $\bar{m}$ , вагонов |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-------------------------------|----------------------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|                               | 15                                                 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 |
| 300                           | 3                                                  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 2  | 2  |
| 500                           | 4                                                  | 4  | 4  | 4  | 4  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  |
| 700                           | 6                                                  | 5  | 5  | 5  | 5  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  |
| 900                           | 7                                                  | 6  | 6  | 6  | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  |
| 1100                          | 8                                                  | 7  | 7  | 7  | 6  | 6  | 6  | 6  | 6  | 6  |
| 1300                          | 9                                                  | 8  | 8  | 8  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  |
| 1500                          | 11                                                 | 10 | 9  | 8  | 8  | 8  | 8  | 8  | 8  | 7  |
| 1700                          | 12                                                 | 11 | 10 | 9  | 9  | 9  | 9  | 9  | 8  | 8  |
| 1900                          | 13                                                 | 12 | 11 | 10 | 10 | 10 | 9  | 9  | 9  | 9  |
| 2100                          | 14                                                 | 13 | 12 | 11 | 11 | 11 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 2300                          | 15                                                 | 14 | 13 | 12 | 12 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 |
| 2500                          | 16                                                 | 15 | 14 | 13 | 13 | 12 | 12 | 12 | 12 | 11 |
| 2700                          | 18                                                 | 16 | 15 | 14 | 14 | 13 | 13 | 13 | 12 | 12 |
| 2900                          | 19                                                 | 17 | 16 | 15 | 15 | 14 | 14 | 14 | 13 | 13 |
| 3100                          | 20                                                 | 18 | 17 | 16 | 15 | 15 | 15 | 14 | 14 | 14 |

С учетом отказов технологических каналов и технических устройств, обслуживающих формирование местного вагонопотока, выраженных через коэффициент готовности, формула расчета путевого развития будет иметь вид

$$P_{\text{МСОП}} = z_{\text{ГР}} P_{\text{ГР}} + \frac{N_{\text{М}}}{n_p} + \frac{I_{\text{О}}^m \frac{1}{K_{\text{ВыхУ}}^{\text{О}}} (r_m T_{\text{К}} + 3\sigma - 1) - T_{\text{К}}}{I_{\text{О}}^m \frac{1}{K_{\text{ВыхУ}}^{\text{О}}}} - \frac{T_{\text{ЗП}} \frac{1}{K_{\text{МСОП}}^{\text{О}}}}{I_{\text{О}}^m \frac{1}{K_{\text{ВыхУ}}^{\text{О}}}}, \quad (9.95)$$

или с учетом выражения (9.93)

$$P_{\text{МСОП}} = z_{\text{ГР}} P_{\text{ГР}} + \frac{N_{\text{М}}}{n_p} + [\bar{r}_m T_{\text{К}} (1 + \beta \theta) - 1] - \mu K_{\text{ВыхУ}} (T_{\text{К}} - T_{\text{ЗП}}) \frac{1}{K_{\text{МСОП}}^{\text{О}}}, \quad (9.96)$$

где  $K_{\text{ВыхУ}}^{\text{О}}$  — коэффициент готовности выходных участков МСОП;  $K_{\text{МСОП}}^{\text{О}}$  — коэффициент готовности МСОП.

Число группировочных путей и пучков рассчитывают на основе объема работы, устанавливаемого методами прогнозирования.

При большой величине вагонопотока  $N_m$  и значительном числе формируемых поездов для освоения суточного объема работы по подборке групп вагонов может потребоваться более одного пучка группировочных путей. Если для увеличения производительности работы по подсортировке групп вагонов предусматривают два и более пучков группировочных путей, то подборку групп вагонов следует вести параллельно. Интервал  $I_{вг}$ , по истечении которого подбирают группы вагонов в группировочном парке, определяют по графику работы вспомогательной горки. Тогда число параллельно работающих пучков группировочных путей

$$z_{гр} = \frac{N_m I_{вг}}{(24 - T_{п}) \bar{m}} = \frac{n_m I_{вг}}{(24 - T_{п}) \bar{m}}, \quad (9.97)$$

где  $\bar{m}$  — среднее число вагонов в одном местном поезде или подаче;  $n_m$  — число местных поездов и подач, формируемых в сутки;  $T_{п}$  — продолжительность перерывов в использовании сортировочного устройства.

При расчете числа группировочных путей в качестве критерия оптимальности принято время выполнения маневров по рассортировке и последующей сборке (группировке) вагонов в составе по тем или иным признакам. Оптимальное число группировочных путей в МСОП определяют по формуле

$$P_{гр} = \sqrt{\frac{g(2A + Bm)}{2(c + Dm)}}, \quad (9.98)$$

где  $g$  — число групп вагонов в составе формируемого поезда (передачи);  $A$  и  $B$  — коэффициенты, определяемые в соответствии с Руководством по техническому нормированию маневровой работы:  $A = a_x + a_{гв} + a_{км}$ ;  $B = b_{гв} + b_{км} + b_p$ ;  $a_x$  — время холостого заезда с горки на пути МСОП;  $a_{гв}$  — параметр полурейсы груженого выезда на горку;  $a_{км}$  — параметр полурейсы короткого надвига;  $b_{гв}$ ,  $b_{км}$ ,  $b_p$  — соответственно в расчете на один вагон параметры груженого выезда, короткого надвига и роспуска;  $c$  — удвоенная величина усредненного параметра  $a$  на полурейсы сборки вагонов;  $D$  — усредненное значение параметра  $b$ .

Число путей для отсева местных вагонов при расформировании составов на основной горке зависит от числа местных вагонов, поступающих на отсевные пути в единицу времени, и интервала, по истечении которого расформируют местные вагоны на вспомогательной горке. Величину интервала определяет график работы вспомогательной горки. Число путей для отсева

$$P_{отс} = \frac{n_{\max} l_v}{l_{п}} \geq 2, \quad (9.99)$$

где  $n_{\max}$  — максимальное число вагонов местных назначений, поступающих в парк формирования за время технологического интервала на вспомогательной горке;  $l_v$  — длина вагона;  $l_{п}$  — полезная длина отсечного пути.

С учетом того, что для большинства сортировочных станций, особенно с большим вагонопотоком местных назначений, распре-

деление числа местных вагонов в отрезках времени  $I_v$  хорошо аппроксимирует нормальный закон, получаем

$$P_{отс} = \frac{(\bar{n} + 3\sigma_{п}) l_v}{l_{п}} \geq 2, \quad (9.100)$$

где  $\bar{n}$  — среднее число вагонов, поступающих в периоды времени  $I_v$ ;  $\sigma_{п}$  — среднее квадратичное отклонение.

Число отсечных путей в соответствии с принятым ограничением должно быть не менее двух. Это обуславливают технологические условия работы: при роспуске местных вагонов с одного пути на второй должны поступать вагоны из состава, расформировываемого на основной горке.

Рассмотренная методика расчета путевого развития местных сортировочно-отправочных парков учитывает неравномерность процессов накопления и отправления поездов, потребность в путях для выполнения технологических операций с составами поездов и дополнительное число путей, которое рекомендует Инструкция по проектированию станций и узлов. Следовательно, приведенные формулы определения мощности парков достаточно адекватны и могут быть использованы при планировании реконструктивных мероприятий на сортировочных станциях.

## ГЛАВА 10

### МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПУТЕВОГО РАЗВИТИЯ ПАССАЖИРСКИХ И ПАССАЖИРСКИХ ТЕХНИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

#### 10.1. Надежность работы пассажирского комплекса

Пассажирские и пассажирские технические станции в крупных городах представляют собой сложный комплекс взаимодействующих систем и подсистем, работающих по расформированию, формированию, техническому и другим видам обеспечения пассажирских и пригородных поездов. По подводу, выводу и пропуску пассажирских поездов этот комплекс тесно связан с грузовым движением на направлениях.

Совершенствование технологии и путевого развития пассажирского комплекса в узлах, повышение эксплуатационной надежности его работы, улучшение выполнения графика движения пассажирских поездов, обеспечение высокого качества организации пассажирского движения в целом — задачи, которые сейчас не в полной мере решены на ряде узлов сети.

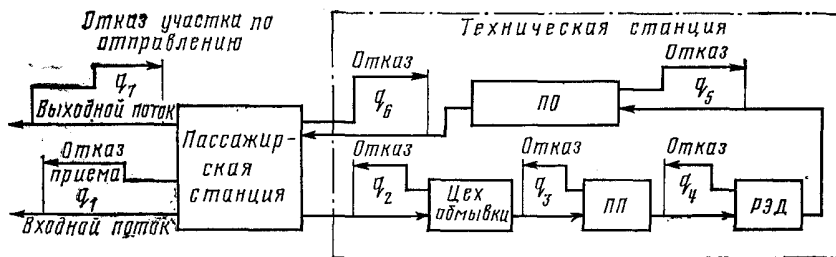


Рис. 10.1. Блок-схема отказов в узлах по пассажирскому комплексу, нарушающих непрерывность и поточность обработки пассажирского транспортного потока

Из-за недостаточного числа путей, невыполнения графика движения по проследованию и других факторов возникают задержки (отказы в приеме) пассажирских поездов на пассажирских станциях, а также отказы в работе пассажирских технических станций, когда задерживают перестановку составов с перронных путей на техническую станцию и с технической станции на пассажирскую. На ряде дорог сети (Московская, Северо-Кавказская, Донецкая, Приднепровская, Белорусская и др.) разрабатывают и успешно осуществляют меры по усилению путевого развития, технического оснащения, совершенствованию технологии и управления на пассажирских и пассажирских технических станциях. Это обеспечивает высокую, а в ряде случаев и практически полную надежность приема, отправления и пропуска пассажирских поездов. Важная роль в обеспечении высокого качества обслуживания пассажиров и надежности работы по отправлению пассажирских поездов принадлежит пассажирским техническим станциям. Недостаточное путевое развитие этих станций, отказы в их работе нередко приводят к вынужденному сокращению технологических норм стоянок пассажирских поездов перед отправлением, а в ряде случаев и к срыву графика отправления пассажирских поездов, что вообще недопустимо.

Блок-схема отказов по пассажирскому комплексу при нарушении непрерывности и поточности обработки пассажирского транспортного потока приведена на рис. 10.1. Отказы возникают на пассажирской и технической станциях по всем элементам технологического процесса. Так, по цеху обмывки отказы  $q_2$  связаны с неисправностью вагономоечной машины и оборудования, занятием машины ранее поданным составом. Отказы  $q_3$  возникают в связи с недостаточным путевым развитием и несовершенной технологией парка прибытия ПП, а также устройств, на которых переформируют составы. Из-за недостаточной производительности работы, сбоев в снабжении, слабой технической оснащенности возникают отказы  $q_4$  по ремонтно-экипировочному депо РЭД. Технические и технологические причины вызывают отказы парка отправления  $q_5$ .

Таким образом, вероятности отказов  $q_2$ ,  $q_3$ ,  $q_4$  и  $q_5$  характеризуют надежность работы основных подсистем технической станции.

Если суммарное влияние этих отказов вызывает задержку обработки состава  $t_{zi}$ , величина которой больше регламентированного резервного времени ожидания перестановки на пассажирскую станцию, то отказ приведет к несвоевременной, с нарушением графика, перестановке состава на перронные пути и возможному срыву графика отправления. Это условие можно записать в виде:

$$\text{состав своевременно переставляют на пассажирскую станцию} \quad t_{zi} \leq t_{pi}; \quad (10.1)$$

$$\text{состав переставляют на пассажирскую станцию с опозданием} \quad t_{zi} > t_{pi}, \quad (10.2)$$

где  $t_{zi}$  — задержка обработки состава в связи с отказами устройств технической станции;  $t_{pi}$  — регламентированный графиком «подвязки» составов простой в парке отправления сверх технологической нормы обработки.

В связи с условием (10.1) на технической станции целесообразно иметь некоторый заранее обоснованный дополнительный регламентированный простой составов, который исключает влияние относительно небольших отказов и сбоев в работе технической станции и повышает надежность своевременной подачи состава на пассажирскую станцию. Этот простой можно рассматривать как резервирование технологической системы технической станции. В случае «жесткой» подвязки, когда состав должен быть подан на перронные пути сразу по истечении технологических норм на его обработку по всем элементам, при любом отказе будет выполнено условие (10.2). Система технической станции будет работать уже без резервирования, и ее надежность можно определять по каждому обрабатываемому на технической станции составу:

$$P(N_{pci}) = \frac{\sum_{i=1}^K t_{mi}}{\sum_{i=1}^K t_{mi} + t_{zi}}, \quad i = 1, 2, \dots, N_{pc}; \quad j = 1, 2, \dots, k; \quad (10.3)$$

$$Q(N_{pci}) = 1 - P(N_{pci}), \quad (10.4)$$

где  $\sum_{i=1}^K t_{mi}$  — продолжительность обработки пассажирского состава по технологическому процессу (без учета времени ожидания перестановки на пассажирскую станцию);  $t_{zi}$  — задержка обработки  $i$ -го состава в связи с отказами элементов технической станции, число которых  $j = 1, 2, \dots, k$ ;  $N_{pc}$  — число обрабатываемых пассажирских составов.

Надежность работы технической станции за некоторый период  $T$ , например за сутки, составит

$$P(N_{pc}, T) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{pc}} \sum_{j=1}^K t_{mi}}{\sum_{i=1}^{N_{pc}} \sum_{j=1}^K t_{mi} + \sum_{i=1}^{N_{pc}} t_{zi}}. \quad (10.5)$$

Задержку перестановки составов на перронные пути могут вызвать также занятие путей пассажирской станции, технические отказы на самой пассажирской станции или выходных участках. Влияние их учитывают вероятностями отказов  $q_6$  и  $q_7$ .

Следовательно, надежность пассажирского комплекса в конечном итоге будет характеризовать уровень выполнения графика движения поездов по отправлению:

$$P_{\text{пк}}(N_{\text{пс}}, T) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{пс}}^0} N_{\text{пс}i}^0 - \sum_{j=1}^{n_3^0} n_3^0}{N_{\text{пс}}^0} = 1 - Q(N_{\text{пс}}, T), \quad \begin{matrix} i=1, 2, \dots, N_{\text{пс}}^0; \\ j=1, 2, \dots, n_3^0, \end{matrix} \quad (10.6)$$

где  $\sum_{i=1}^{N_{\text{пс}}^0} N_{\text{пс}i}^0$  — общее число отправленных поездов;  $\sum_{j=1}^{n_3^0} n_3^0$  — число поездов, отправленных не по графику.

Показателем качества организации пассажирского движения является надежность выполнения графика движения по прибытию пассажирских поездов на конечные пассажирские станции, которую за некоторый период времени  $T$  определяют по формуле

$$P(-N_{\text{пс}}^{\text{пр}}, T) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{пс}}^{\text{пр}}} N_{\text{пс}i}^{\text{пр}} - \sum_{l=1}^{n_3} n_{3l}}{\sum_{i=1}^{N_{\text{пс}}^{\text{пр}}} N_{\text{пс}i}^{\text{пр}}} = 1 - Q(N_{\text{пс}}^{\text{пр}}, T), \quad \begin{matrix} i=1, 2, \dots, N_{\text{пс}}^{\text{пр}}; \\ l=1, 2, \dots, n_3. \end{matrix} \quad (10.7)$$

Надежность пропуска пассажирских поездов зависит, таким образом, от всей системы организации движения поездов на направлениях, надежности подвижного состава и комплекса технических средств транспорта. Важное значение для повышения общей надежности отправления, пропуска и приема пассажирских поездов имеет обеспечение высокого уровня надежности работы пассажирского комплекса по путевому развитию.

## 10.2. Расчет числа путей в прямо-отправочных парках пассажирской станции

Парк прямо-отправочных путей пассажирской станции — система с изменяющейся во времени нагрузкой — потоком отправляемых и принимаемых поездов. Состояние ее —  $z(T)$  — определяет уравнение баланса работы системы за некоторый период

$$z(T) = z(T_0) + x(T) - y(T), \quad (10.8)$$

где  $z(T)$  — состояние системы в конце периода времени  $T$ ;  $z(T_0)$  — начальное состояние системы (на начало периода  $T$ );  $x(T)$  — подвод пассажирских поездов (составов);  $y(T)$  — вывод (отправление) пассажирских поездов или составов.

Путевое развитие парка должно обеспечить пачковый (сгущенный) пропуск пассажирских поездов, причем величина пачки

$$N_{\text{п}}(T) = \bar{\tau}_{\text{п}} T + \beta_{\text{п}} \sigma(T).$$

Обозначим через  $T_{\text{к}}$  период, в течение которого возникает предельное состояние системы  $z(t)$ . Тогда число путей в парке в соответствии с уравнением (10.8) при условии, что начальное состояние парка  $z(T_0) = 0$ ,

$$P = \frac{T_{\text{к}}}{\bar{I}_{\text{пр}}} - \frac{T_{\text{к}}}{\bar{I}_{\text{в}}}. \quad (10.9)$$

Интервал поступления пассажирских поездов сгущенной пачке в течение периода  $T_{\text{к}}$

$$\bar{I}_{\text{пр}} = \frac{T_{\text{к}}}{\bar{\tau}_{\text{п}} T_{\text{к}} + \beta_{\text{п}} \sigma(T_{\text{к}}) - 1}. \quad (10.10)$$

С учетом начального состояния парка, которое можно характеризовать параметрами  $\frac{T_{\text{п}}}{\bar{I}_{\text{в}}}$ , получим

$$P = \frac{[\bar{\tau}_{\text{п}} T_{\text{к}} + \beta_{\text{п}} \sigma(T_{\text{к}}) - 1] \bar{I}_{\text{в}} - T_{\text{к}}}{\bar{I}_{\text{в}}} + \frac{T_{\text{п}}}{\bar{I}_{\text{в}}}. \quad (10.11)$$

В этой формуле простой пассажирских поездов (составов) на путях парка возрастает на величину  $(\bar{\tau}_{\text{п}} T_{\text{к}} + \beta_{\text{п}} \sigma(T_{\text{к}}) - 1) \bar{I}_{\text{в}} - T_{\text{к}}$ , если пассажирские поезда прибывают с большей интенсивностью, чем отправляются. При слабом потоке пассажирских поездов этого роста не будет, средний интервал прибытия поездов  $\bar{I}_{\text{пр}}$  не меньше среднего интервала их отправления  $\bar{I}_{\text{в}}$ , а число путей в парке

$$P = \frac{t_{\text{пр}} + t_{\text{ст}} + t_{\text{от}}}{\bar{I}_{\text{в}}} = \frac{T_{\text{п}}}{\bar{I}_{\text{в}}} = \bar{\mu} T_{\text{п}}, \quad (10.12)$$

где  $t_{\text{пр}}$ ,  $t_{\text{от}}$  — время занятия пути при приеме или отправлении поезда;  $t_{\text{ст}}$  — общее время стоянки пассажирского поезда по технологическому процессу;  $T_{\text{п}}$  — время занятия пути технологическими операциями;  $\bar{\mu}$  — средняя интенсивность отправления поездов.

Необходимо учитывать число путей для пропуска грузовых поездов, если прямо-отправочный парк пассажирской станции сквозного типа, и число ходовых путей. С учетом этого, а также режима работы парка будем иметь:

$$P = \left. \begin{aligned} & \frac{[\bar{\tau}_{\text{п}} T_{\text{к}} + \beta_{\text{п}} \sigma(T_{\text{к}}) - 1] \bar{I}_{\text{в}} - T_{\text{к}}}{\bar{I}_{\text{в}}} + \bar{\mu} T_{\text{п}} + P_{\text{д}}; \\ & [\bar{\tau}_{\text{п}} T_{\text{к}} + \beta_{\text{п}} \sigma(T_{\text{к}}) - 1] - T_{\text{к}} > 0; \end{aligned} \right\} \quad (10.13)$$

$$\left. \begin{aligned} & P = \frac{t_{\text{пр}} + t_{\text{ст}} + t_{\text{от}}}{\bar{I}_{\text{в}}} + P_{\text{д}}; \\ & [\bar{\tau}_{\text{п}} T_{\text{к}} + \beta_{\text{п}} \sigma(T_{\text{к}}) - 1] - T_{\text{к}} = 0, \end{aligned} \right\} \quad (10.14)$$

где  $\bar{r}$  — средняя часовая интенсивность пассажирского потока;  $\beta_{\Pi}$  — число средних квадратичных отклонений, принятое в соответствии с распределением потока пассажирских поездов и обеспечением работы парка с надежностью  $P$ ;  $\sigma(T_K)$  — величина среднего квадратичного отклонения потока пассажирских поездов в течение периода  $T_K$ ;  $P_d$  — число дополнительных путей.

Следует учитывать, что пассажирские поезда из-за недостатка пропускной способности путей подводят на конечные станции и отправляют с начальных пунктов не только в вечерние и утренние часы. Выразив среднее квадратичное отклонение потока пассажирских поездов через коэффициент вариации  $\phi = \frac{\sigma(T_K)}{\bar{r}T_K}$  и заменив  $\frac{1}{\bar{r}}$  на  $\mu$ , получим:

$$P = [\bar{r}T_K(1 + \beta_{\Pi}\phi) - 1] - \mu(T_K - T_T) + P_d; \quad (10.15)$$

$$[\bar{r}_{\Pi}T_K(1 - \beta_{\Pi}\phi) - 1] - \mu T_K > 0;$$

$$\left. \begin{aligned} P &= \mu T_T + P_d; \\ [\bar{r}_{\Pi}T_K(1 + \beta_{\Pi}\phi) - 1] - \mu T_K &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (10.16)$$

Анализ пассажирских транспортных потоков показывает, что режим «заполнения» в работе пассажирских станций возникает в относительно небольшие по продолжительности периоды суток. Это требует лишь небольшого увеличения числа путей по сравнению со стационарным режимом работы.

**Пример.** Необходимо рассчитать путевое развитие пассажирской станции при следующих исходных данных: интенсивность потока поездов  $\bar{r}_{\Pi} = 72$  поезда/сут (3 поезда/ч); период  $T_K = 2,0$  ч;  $\beta_{\Pi} = 2$ ;  $\phi = 0,4$ ;  $T_T = 0,4$  ч;  $\mu = 2,75$  поезда (состава)/ч;  $P_d = 2$ .

В связи с тем что в периоде  $T_K$   $\bar{r} > \mu$ , для расчета необходимо использовать формулу (10.15):

$$P = 3 \cdot 2(1 + 2 \cdot 0,4) - 1 - 2,75(2 - 0,4) + 2 = 5,4 + 2 = 8 \text{ путей.}$$

Таким образом, для работы с пассажирскими поездами и пропуска грузовых всего потребуется 8 путей, из них 2 пути для грузового потока. Если пассажирская станция тупикового типа, то необходимо предусмотреть парк из 6 путей.

В расчетах путей необходимо учитывать надежность технического и технологического комплексов станции и выходных участков:

$$P = [\bar{r}T_K(1 + \beta_{\Pi}\phi) - 1] - \mu \left( T_K - T_T \frac{1}{k_T k_Y} \right) + P_d \quad (10.17)$$

при  $\bar{r} > \mu$  в периоде  $T_K$ ;

$$P = \frac{1}{k_Y k_T} \mu T_T + P_d \quad (10.18)$$

при  $\mu = \bar{r}$ ,

где  $k_Y$  — коэффициент готовности выходного участка к отправлению пассажирских поездов;  $k_T$  — общий коэффициент технической и технологической надежности станции.

Так, при  $k_T = 0,97$ ;  $k_Y = 0,95$ ;  $T_T = 0,83$  ч;  $\mu = 2,5$ ;  $P_d = 2$  получаем

$$P = \frac{1}{0,97 \cdot 0,95} 2,5 \cdot 0,83 + 2 = 2,25 + 2 = 5 \text{ путей.}$$

### 10.3. Определение числа путей в парках приема и отправления пассажирской технической станции

Путевое развитие парка прибытия пассажирской технической станции необходимо рассчитывать исходя из уравнения баланса (составы в парк прибытия поступают с пассажирской станции и после их обработки и переформирования подаются или выводятся из парка прибытия на экипировочные пути).

Число путей в парке прибытия технической станции определяют для сгущенного поступления составов. Входной поток в парк характеризуют интенсивность  $\bar{r}$  и параметры распределения  $\sigma(T)$ ,  $\nu(T)$ . Обработанный поток составов переставляют в экипировочный парк через интервал  $\bar{T}_B$  или с интенсивностью  $\mu$ .

Обозначив максимальное число составов, которые поступают в парк прибытия в течение периода  $T$ , через  $N_{\max}(T)$ , запишем уравнение баланса к концу периода  $T$

$$z(T) = N_{\max}(T) - \frac{T}{\bar{T}_B}. \quad (10.19)$$

Для определения периода времени  $T_K$ , в течение которого в парке будет наибольшее число составов, исследуют на максимальное значение функцию состояния системы. Величину  $N_{\max}(T)$  можно выразить следующим образом:

$$N_{\max}(T) = \bar{r}T + \beta\sigma(T),$$

или с применением эмпирических коэффициентов по предложению канд. техн. наук И. А. Ялового

$$N_{\max}(T) = (a_1 T + b_1 T^2 + c_1) (a_2 \bar{r} + b_2 \bar{r}^2 + c_2). \quad (10.20)$$

Тогда уравнение баланса примет вид

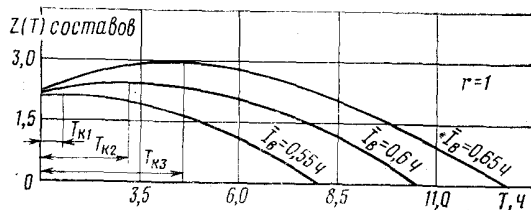
$$z(T) = (a_1 T + b_1 T^2 + c_1) (a_2 \bar{r} + b_2 \bar{r}^2 + c_2) - \frac{T}{T_{\text{ВЫВ}}}. \quad (10.21)$$

Для определения периода времени  $T_K$  исследуем  $z(T)$  на максимум:

$$\frac{dz(T)}{dT} = (a_2 \bar{r} + b_2 \bar{r}^2 + c_2) (a_1 + 2b_1 T) - \frac{1}{T_{\text{ВЫВ}}} = 0;$$

$$T_K = \frac{1}{2b_1 T_{\text{ВЫВ}} (a_2 \bar{r} + b_2 \bar{r}^2 + c_2)} - \frac{a_1}{2b_1}. \quad (10.22)$$

Рис. 10.2. График периода времени  $T_K$ , при котором  $z(T_K) = \max$



Функция (10.22) имеет один оптимум: вторая производная не зависит от времени  $T$ . Поскольку вторая ее производная отрицательна для реальных значений интенсивности потока  $\bar{r}$ , то функция  $z(T)$ , как показано на рис. 10.2, имеет максимум, соответствующий периоду времени  $T_K$ , определяемому по формуле (10.22).

С учетом этого число путей в парке прибытия технической станции на основании уравнения баланса:

$$P = \left( c - \frac{a_1^2}{4b_1} \right) (a_2 \bar{r} + b_2 \bar{r}^2 + c_2) - \frac{\mu^2}{4b_1 (a_2 \bar{r} + b_2 \bar{r}^2 + c_2)} + \mu \left( T_T + \frac{a_1}{2b_1} \right) + P_d \quad (10.23)$$

при  $T_K \geq 0$ ;

$$P = \mu T_T + P_d \quad (10.24)$$

при  $T_K = 0$ ,

где  $T_T$  — расчетное технологическое время занятия пути парка прибытия технической станции;  $\mu$  — интенсивность обслуживания составов на технической станции;  $P_d$  — число ходовых и других дополнительных путей.

**Пример.** Требуется рассчитать число путей в парке прибытия технической станции при следующих исходных данных: интенсивность потока пассажирских составов  $r = 1$  состав/ч = 24 состава/сут; расчетное технологическое время занятия пути  $T_K = 1,33$  ч; интенсивность обслуживания  $\mu = 1,66$  состава/ч или  $\bar{T}_B = 0,6$  ч;  $P_d = 1$ .

Определим сначала период  $T_K$  по формуле (10.22) при  $a_1 = 1,917$ ;  $b_1 = -0,0436$ ;  $c_1 = 1,874$ ;  $a_2 = 1,1684$ ;  $b_2 = -0,1457$ ;  $c_2 = -0,0014$ :

$$T_K = \frac{1}{2(-0,0436)0,6(1,1684 \cdot 1 - 0,1457 \cdot 1^2 - 0,0014)} - \frac{1,917}{2(-0,0436)} = 3,25 \text{ ч.}$$

Поскольку  $T_K > 0$ , число путей по формуле (10.23)

$$P = \left( 1,874 - \frac{1,917^2}{4 \cdot 0,0436} \right) (1,1684 \cdot 1 - 0,1457 \cdot 1^2 - 0,0014) - \frac{1,66}{4 \cdot 0,0436 (1,1684 \cdot 1 - 0,1457 \cdot 1^2 - 0,0014)} + 1,66 \left( 1,33 + \frac{1,917}{2 \cdot 0,0436} \right) + 1 = 4,6 + 1 = 6 \text{ путей.}$$

В расчетах числа путей необходимо также учитывать техническую и технологическую надежность обработки пассажирских составов в парке прибытия технической станции. С учетом уровня этой надежности число путей:

$$P = \left( c - \frac{a_1^2}{4b_1} \right) (a_2 \bar{r} + b_2 \bar{r}^2 + c_2) - \frac{\mu}{4b_1 (a_2 \bar{r} + b_2 \bar{r}^2 + c_2)} + \mu_{KT} K_{Tex} \left( T_T + \frac{a_1}{2b_1} \right) + P_d \quad (10.25)$$

при  $T_K > 0$ ;

$$P = K_T K_{Tex} \mu T_T + P_d \quad (10.26)$$

при  $T_K = 0$ ,

где  $K_T$ ,  $K_{Tex}$  — коэффициенты технологической и технической готовности каналов, участвующих в обслуживании (обработке) составов.

Так, при  $K_T = 0,98$  и  $K_{Tex} = 0,94$ ;  $\mu = 3$  состава/ч;  $T_T = 1,0$  ч;  $\bar{r} = 1$  состав/ч [в этом случае  $T_d = 0$  и число путей необходимо рассчитывать по формуле (10.26)] и  $P_d = 1$

$$P = 0,98 \cdot 0,94 \cdot 3 \cdot 1 + 1 = 2,76 + 1 = 4 \text{ пути.}$$

Число путей в специализированном отправочном парке также следует определять исходя из уравнения баланса с учетом интервалов вывода составов с РЭД и из парка отправления на пассажирскую станцию. Расчетный режим парка отправления — режим накопления, поскольку производительность работы РЭД должна опережать интенсивность отправления поездов. Это опережение выражается в простоях полностью подготовленных составов в ожидании перестановки на перронные пути. Таким образом, уравнение баланса парка отправления примет вид

$$z(T) = z(t_0) + x(T, \bar{T}_{BB}) - y(T, \bar{T}_B), \quad (10.27)$$

причем в периоде времени  $T$   $x(T, \bar{T}_{BB}) > y(T, \bar{T}_B)$ .

Период времени  $T_K$ , в течение которого образуется  $\max z(T)$ , будет расчетным. Интервал ввода поездов в парк отправления или вывода их с РЭД определяют по формуле

$$\bar{T}_{BB} = \frac{T_K}{\bar{r}_B T_K + \beta_B \sigma(T_K) - 1}, \quad (10.28)$$

где  $\bar{r}_B T_K$  — средняя интенсивность работы РЭД в течение суток;  $\sigma(T_K)$  — среднее квадратичное отклонение;  $\beta_B$  — число средних квадратичных отклонений, принимаемое исходя из распределения интенсивности работы РЭД и обеспечения заданного уровня надежности работы  $P$ .

Число путей в отправочном парке к концу периода  $T_K$  для размещения составов за время ожидания перестановки на пассажирскую станцию в соответствии с выражением (10.27)

$$P_{no}^{TC} = \frac{T_K}{\bar{T}_{BB}} - \frac{T_K}{\bar{T}_O} = \frac{[\bar{r}_B T_K + \beta_B \sigma(T_K)] \bar{T}_O - T_K}{\bar{T}_O},$$

а с учетом времени на выполнение технологических операций в парке отправления и дополнительных (ходовых и других) путей:

$$П_{по}^{тс} = \frac{[\bar{r}T_K + \beta_{п\sigma}(T_K) - 1]\bar{T}_0 - T_K}{\bar{T}_0} + \frac{T_T}{\bar{T}_0} + П_{д}, \quad (10.29)$$

где  $T_T$  — время выполнения технологических операций в парке отправления с учетом занятия пути при перестановке и выводе состава.

Заменив  $\frac{1}{\bar{T}_0}$  на  $\mu$  — интенсивность обслуживания составов — и выразив  $\sigma(T)$  через коэффициент вариации  $\phi$ , получим:

$$П_{по}^{тс} = [\bar{r}_{п} T_K (1 + \beta_{п\phi}) - 1] - \mu (T_K - T_T) + П_{д}; \quad (10.30)$$

$$[\bar{r}_{п} T_K (1 + \beta_{п\phi}) - 1] - \mu T_K > 0.$$

Если интенсивность (производительность) работы РЭД соответствует интенсивности отправления поездов, но не опережает ее, т. е. если в периоде сгущенного отправления пассажирских поездов  $\bar{T}_{вв} = \bar{T}_0$ , а система работает в стационарном режиме:

$$П_{по} = \mu T_T + П_{д}; \quad (10.31)$$

$$[\bar{r}_{п} T_K (1 + \beta_{п\phi}) - 1] - \mu T_K = 0.$$

Отметим, что РЭД в режиме без опережения интенсивности отправления поездов работает ненадежно: любой сбой приводит к срыву перестановки составов на пассажирскую станцию. Следовательно, в расчетах нужно учитывать надежность технического и технологического комплексов пассажирской станции  $k_{пс}$  и надежность технологии и управления работой парка отправления технической станции  $k_{по}$ . С учетом коэффициентов готовности  $k_{пс}$  и  $k_{по}$  формулы для расчета числа путей парка отправления технической станции примут вид:

$$П_{по}^{тс} = [\bar{r}_{п} T_K (1 + \beta_{п\phi}) - 1] - \mu \left( T_K - \frac{T_T}{k_{пс} k_{по}} \right) + П_{д}; \quad (10.32)$$

$$[\bar{r}_{п} T_K (1 + \beta_{п\phi}) - 1] - \mu T_K > 0;$$

$$П_{по}^{тс} = \frac{1}{k_{пс} k_{по}} \mu T_T + П_{д}; \quad (10.33)$$

$$[\bar{r}_{п} T_K (1 + \beta_{п\phi}) - 1] - \mu T_K = 0.$$

**Пример.** РЭД работает с интенсивностью  $\bar{r} = 2,5$  состава/ч. Интенсивность перестановки составов в парк отправления  $\mu = 2$  состава/ч. Определить число путей в парке отправления, если период  $T_K = 1,5$  ч;  $\phi = 0,3$ ;  $T_T = 1,0$  ч; коэффициенты готовности  $k_{пс} = k_{по} = 0,95$ ;  $П_{д} = 1$ ;  $\beta_{п} = 2,0$ . По формуле (10.32) получаем

$$П_{по}^{тс} = 2,5 \cdot 1,5 (1 + 2,0 \cdot 0,3) - 1 - 2,0 \left( 1,5 - \frac{1}{0,95 \cdot 0,95} \right) +$$

$$+ 1 = (6,0 - 1) - 3,0 + 1,77 + 1 = 6 \text{ путей.}$$

Если РЭД работает без опережения темпа отправления с интенсивностью  $\bar{r} = 2$  состава/ч, то число путей в парке отправления по формуле (10.33)

$$П_{по}^{тс} = \frac{2 \cdot 1}{0,95 \cdot 0,95} + 1 = 2,2 + 1 = 4 \text{ пути.}$$

## ГЛАВА II

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ И ПРОСТОЯ ВАГОНОВ НА СОРТИРОВОЧНЫХ СТАНЦИЯХ МЕТОДОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ЭВМ

#### 11.1. Цели и задачи моделирования

Для успешного освоения постоянно возрастающего объема переработки вагонопотоков на технических станциях решающее значение имеет дальнейшее совершенствование технического оснащения, путевого развития и технологии работы сортировочных станций. Мощности многих станций сети не соответствуют предъявляемым объемам работы, в результате станции работают при высоких уровнях загрузки основных элементов без достаточных резервов пропускной и перерабатывающей способности. В результате возникают задержки поездов на подходах, сдерживается пропуск вагонопотоков по направлениям, ухудшаются показатели использования подвижного состава, замедляется оборот материальных ценностей народного хозяйства.

В связи с постоянным ростом нагрузок на сортировочные системы находить оптимальные варианты повышения пропускной и перерабатывающей способности сортировочных станций с каждым годом все более трудно. Громоздки и сложны также вопросы разработки рациональной технологии сортировочной работы. Поэтому в современных условиях работы станций особенно важно использовать экономико-математические методы и ЭВМ не только для оперативного планирования, но и для анализа их технологических процессов, выявления потерь в использовании технических средств, установления возможных резервов ускорения переработки и сокращения простоя вагонов, нахождения оптимальных вариантов поэтапного повышения перерабатывающей способности и технического оснащения. Сортировочные станции — это большие сложные системы, задачи улучшения их технологии и оптимизации развития многовариантны. Выбор лучших вариантов должен быть основан на расчетах всех основных показателей при различных условиях. Наиболее эффективны эти расчеты при моделировании с помощью ЭВМ процессов в подсистемах станции.

Имитационное моделирование станционной технологии позволяет решать ряд задач совершенствования работы сортировочных станций. Основные из них: выявление элементов, ограничивающих пропускную и перерабатывающую способность сортировочных станций; научно обоснованное нормирование простоя транзитных вагонов (с расчленением простоя вагонов с переработкой и без переработки по всем элементам станционной технологии); оценка эффективности мер перспективного развития станций и совершенствования их технологии, эффективности новой техники и передовых методов труда.

Поскольку моделирование дает возможность «проигрывать» на ЭВМ различные варианты, легко определить их выгодность и установить наиболее оптимальную последовательность внедрения.

## 11.2. Основные принципы моделирования станционной технологии

Основа разработанной имитационной модели работы сортировочной станции — уравнение баланса числа вагонов и составов при пошаговой реализации расчетов, т. е. расчеты выполняют в дискретных отрезках времени.

При пошаговом моделировании в каждом отрезке времени (шаге моделирования) проводят полный расчет параметров текущего состояния подсистем станции, а также учет простоя составов и вагонов под технологическими операциями и в ожидании их выполнения. При этом считают, что составы и вагоны, оставшиеся на конец  $i$ -го шага моделирования под какой-либо операцией, находились в таком состоянии все время  $t_{ш}$ .

Результаты расчетов в определенной степени зависят от величины принятого шага моделирования. Увеличение его уменьшает затраты времени на моделирование, но снижает точность расчетов, и наоборот. Экспериментально установлено, что вполне достаточный уровень точности для практических расчетов обеспечивает величина шага моделирования до 3 мин.

Анализ функционирования элементов сортировочной станции показал, что ее целесообразно рассматривать как композицию сопряженных агрегатов, математическое описание которых можно унифицировать, т. е. создать единый типовой алгоритм, пригодный для моделирования любого обслуживающего канала. В результате моделирования получили прогрессивную блочную структуру в виде композиции алгоритмов агрегатов, в которой относительно просто учтены все основные (прямые и обратные) связи между элементами [20].

## 11.3. Расчет показателей работы станции

Алгоритм и программа предназначены для моделирования работы односторонней или сортировочной системы двусторонней станции. По окончании расчетов, а при необходимости и после каждых

суток моделирования на печать выдают итоговые таблицы. Пример итоговых данных по сортировочной системе одной из станций Донецкой дороги приведен в табл. 11.1—11.4.

Таблица 11.1

Показатели надежности работы основных парков

| Параметры                    | Парки станции |       |       |       |
|------------------------------|---------------|-------|-------|-------|
|                              | ПП            | СП    | ПО    | ТП    |
| Число отказов                | 33            | 1     | 19    | 13    |
| Продолжительность отказов, ч | 15,70         | 0,20  | 6,30  | 3,35  |
| Задержано поездов            | 82            | 2     | 31    | 14    |
| Простои, составо-ч           | 30,10         | 0,30  | 9,20  | 3,65  |
| Эксплуатационная надежность  | 0,939         | 0,999 | 0,976 | 0,937 |

Примечание. ТП — транзитный парк.

Таблица 11.2

Объем работы станции за период моделирования

| Показатели                | Транзитные вагоны с переработкой | Транзитные вагоны без переработки |
|---------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Прием                     | 1336                             | 63 926                            |
| Отправление               | 1297                             | 61 673                            |
| Передано в другую систему | 61                               | 2 135                             |

Таблица 11.3

Простой транзитных вагонов с расчленением по элементам

| Элементы простоя            | Транзитные вагоны с переработкой |                    | Транзитные вагоны без переработки |                    |
|-----------------------------|----------------------------------|--------------------|-----------------------------------|--------------------|
|                             | вагоно-ч                         | Средний простой, ч | составо-ч                         | Средний простой, ч |
| Ожидание обработки в ПП     | 14 829                           | 0,240              |                                   |                    |
| Технический осмотр в ПП     | 15 912                           | 0,258              |                                   |                    |
| Ожидание отпуска            | 29 660                           | 0,481              |                                   |                    |
| Надви́г и отпуск            | 16 005                           | 0,260              |                                   |                    |
| Накопление                  | 175 662                          | 2,848              |                                   |                    |
| Ожидание формирования       | 7 705                            | 0,125              |                                   |                    |
| Окончание формирования      | 12 388                           | 0,201              |                                   |                    |
| Ожидание перестановки       | 435                              | 0,007              |                                   |                    |
| Перестановка в ПО           | 8 932                            | 0,145              |                                   |                    |
| Ожидание прибытия в ПО и ТП | 18 947                           | 0,307              | 4,80                              | 0,022              |
| Обработка в ПО и ТП         | 30 202                           | 0,490              | 110,35                            | 0,497              |
| Ожидание отправления        | 62 964                           | 1,021              | 257,05                            | 1,158              |
| Итого по станции            | 393 641                          | 6,383              | 372,20                            | 1,677              |
| Ожидание приема             | 1 425                            | 0,023              | 3,65                              | 0,016              |
| Всего                       | 395 066                          | 6,406              | 375,85                            | 1,693              |

Таблица 11.4

## Простой вагонов под накоплением по назначениям плана формирования

| Шифр назначения | Вагоно-ч | Число вагонов | Число поездов | Средний простой, ч | Параметр накопления, с |
|-----------------|----------|---------------|---------------|--------------------|------------------------|
| 2               | 8 688    | 4 650         | 93            | 1,868              | 11,58                  |
| 23              | 8 792    | 4 500         | 89            | 1,976              | 11,72                  |
| 26              | 8 420    | 2 703         | 57            | 3,109              | 11,82                  |
| ...             | ...      | ...           | ...           | ...                | ...                    |
| ...             | ...      | ...           | ...           | ...                | ...                    |
| ...             | ...      | ...           | ...           | ...                | ...                    |
| 9               | 7 795    | 1 517         | 34            | 5,138              | 11,65                  |
| Итого           | 175 662  | 63 933        | 1328          | 2,748              | 11,58                  |

Из этих таблиц видно, что за рассматриваемый период в расформирование было принято 1336 поездов, с которыми поступило 63 926 вагонов. За этот же период со станции отправлено 61 673 вагона в 1297 поездах своего формирования и передано в другую сортировочную систему 2135 вагонов, 33 раза наступали отказы в приеме поездов, общая продолжительность их составила 15,7 ч. В результате задержано на подходах 82 поезда, простои которых составили 30,1 поезде-ч, или 1425 вагоно-ч. Эксплуатационная надежность (отношение числа задержанных поездов или составов к общему числу подведенных поездов или составов) для парка приема равна 0,939, для сортировочного парка — 0,999 и т. д.

Наибольшие потери вагоно-часов на станции допускаются из-за длительного, свыше 1 ч, ожидания отправления поездов со станции, которое происходит в основном из-за несвоевременной выдачи поездных локомотивов. Значительны простои также в ожидании отпуска (0,48 ч) и обработки составов в парках приема (0,24 ч) и отправления (0,31 ч). В то же время ожидание обработки поездов в транзитном парке значительно меньше и составляет 0,02 ч в расчете на один вагон за счет того, что загрузка бригады ПТО в транзитном парке существенно ниже, чем в отправочном.

Расчет средних простоев в табл. 11.3 проведен на один отправленный со станции вагон, а в табл. 11.4 — на один вагон накопившихся составов. Под накоплением вагоны простаивают от 1,87 ч для наиболее мощного назначения до 5,14 ч для назначения минимальной мощности.

При необходимости на печать могут выдаваться данные о коэффициентах загрузки всех основных обслуживающих элементов, а также о распределении загрузки сортировочных устройств и локомотивов разными видами работ.

Таким образом, по результатам моделирования можно установить общий и расчлененный на элементы простой транзитных вагонов, показатели накопления по каждому назначению и в целом по сортировочной системе, загрузку горки и маневровых локомотивов, а также показатели эксплуатационной надежности функционирования

основных подсистем станции. Как показывают исследования, результаты расчетов достаточно стабильны при моделировании работы станции за 10 и более суток. Чем больше период моделирования, тем меньше влияние на итоговые данные случайных факторов, связанных с имитацией стохастических процессов и чередованием различных режимов работы подсистем. Поэтому простой вагонов должен нормироваться лишь на достаточно длительный период времени — месяц и более.

Ввиду того что фактические процессы всегда более сложные, чем имитированные, результаты моделирования получаются прогрессивными. Поэтому при установлении технических норм для станции простой вагонов должен быть определен с учетом того, что ряд технологических простоев не отражен в программе, как, например, промывка вагонов, снабжение изотермического состава, водопой живности и т. д. Кроме того, возможна погрешность в установлении нормы простоя из-за недостаточно точного прогноза размеров движения, структуры вагонопотока и невозможности учета ряда факторов, которые действуют спорадически и мало зависят от станции.

Учитывая это, целесообразно применять двухэтапное нормирование простоя вагонов: перед началом планируемого периода станции задают норму, установленную моделированием на прогнозируемые размеры и ожидаемую структуру вагонопотока. Затем по истечении планируемого периода по фактически выполненным вагонопотокам, размерам движения и вывоза поездов методом моделирования на ЭВМ корректируют норму простоя вагонов и окончательно утверждают этот важный для станции показатель. При такой системе нормирования простоя вагонов будет значительно повышена объективность оценки фактической работы станции.

## ГЛАВА 12

ОПТИМАЛЬНАЯ ЭТАПНОСТЬ  
ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ  
НАДЕЖНОСТИ СТАНЦИЙ12.1. Прогнозирование нагрузки на станционные  
системы

Социалистическое народное хозяйство развивается планомерно. Очевидно, что связанным с этим темпам роста объема сортировочной работы должна соответствовать плановая разработка мер перспективного развития станций и узлов, а также интенсификации станционных процессов. Одновременно с усилением пропускной способности направлений и полигонов необходимо повышать про-

пускную и перерабатывающую способность узлов и станций. Вопросы развития провозной способности направлений и перерабатывающей способности сортировочных станций следует решать комплексно.

На увеличение провозной способности железнодорожных направлений и работу станций большое влияние оказывают виды тяги, нормы массы поездов, длина приемо-отправочных путей, средства сигнализации и связи на полигоне сети и др. Вот почему меры развития станций и железнодорожных участков должны быть не изолированы друг от друга, а взаимно связаны через норму массы поездов  $Q$ , длину приемо-отправочных путей  $l$  и минимальный интервал отправления поездов со станции  $I_{\min}$ .

Для определения и планирования мер усиления перерабатывающей способности станций в течение периода  $t_0$ ;  $t_k$  должны быть установлены исходные (на начальный год  $t_0$ ) и расчетные (на последующие годы) размеры пропуска вагонопотоков. Поскольку такие важнейшие показатели работы станций, как простой вагонов, отказы в работе подсистем, изменяются нелинейно с увеличением загрузки станционных элементов (функции  $B = f(\gamma)$  и  $B_{от} = f(\gamma)$  с увеличением коэффициента загрузки  $\gamma$  резко возрастают), планирование этапного развития станций должно быть основано не на одновременных значениях нагрузки (средних или максимальных), а на многомерных: по годам  $t_j$  периода развития  $t_0$ ;  $t_k$  с учетом внутригодовой неравномерности.

В течение каждого года  $t_j$  периода  $t_0$ ;  $t_k$  размеры вагонопотоков на сортировочных станциях и полигонах сети изменяются в соответствии с законом их распределения и принимают значения в интервале от  $\min N$  от  $\max N$ . Интервал  $\min N$ ,  $\max N$  можно представить в виде вектора-строки

$$\bar{N} = \|\bar{N}_{j1}, \bar{N}_{j2}, \dots, \bar{N}_{jr}\|, \quad (12.1)$$

где  $\bar{N}_{jr}$  — средние значения градаций нагрузки, изменяющейся с шагом  $\Delta N$  в течение  $t_j$ -го года в периоде  $t_0$ ;  $t_k$ ;  $r$  — число градаций нагрузки в интервале ( $\min N$ ,  $\max N$ ).

Продолжительность работы (в сутках) сортировочной станции или полигона сети с нагрузкой  $N_{j1}, N_{j2}$  и т. д. в течение каждого  $t_j$ -го года периода  $t_0$ ;  $t_k$  можно представить в виде вектора-столбца

$$\bar{t} = \begin{Bmatrix} t_{1j} \\ t_{2j} \\ \vdots \\ t_{rj} \end{Bmatrix}. \quad (12.2)$$

Следовательно, нагрузка на системы — станции, железнодорожные участки и направления, полигоны сети — изменяется по индексу  $j$ , т. е. по годам периода их развития, и по индексу  $r$  — внутри каждого года  $t_j$  периода  $t_0$ ;  $t_k$  в связи с внутригодовой неравномерностью.

С учетом многомерной нагрузки выбирают меры развития станций и сроков их функционирования, определяют число путей в разных парках станции и капитальные вложения для перевода системы на  $i$ -м этапе ее развития из одного состояния в другое, рассчитывают эксплуатационные расходы в пределах возможных сроков функционирования станции, находящейся в разных состояниях развития.

Первые две задачи решают с учетом последующей (наибольшей) градации нагрузки. Это вытекает из необходимости обеспечения эксплуатационной надежности работы станций, которые должны беспрепятственно пропускать вагонопотоки, в том числе и наибольшие. Чтобы точно определить эксплуатационные расходы, необходимо их расчет вести на всем интервале нагрузок от  $\min N$  до  $\max N$ .

Таким образом, принцип многомерности нагрузок на систему — важнейший для правильного обоснования мер развития станции и достоверного (с учетом необходимой точности) расчета критерия оптимальности.

Прогнозировать объем работы можно различными методами: непосредственной или косвенной экстраполяцией, многофакторным анализом и др. В первом случае изучают тенденции роста объема работы сортировочной станции за какой-либо предыдущий период и их переносят на перспективный период.

Метод косвенной экстраполяции основан на том, что размеры пропуска вагонопотоков на станциях некоторого конечного полигона сети (дороги, отделения) во многом зависят от уровня местной работы. Грузовые вагоны прибывают под выгрузку в поездах, сформированных как из местных, так и транзитных вагонов. Поэтому для получения большего числа местных вагонов требуется переработать большее число разборочных поездов. Значительный уровень переработки на сортировочных станциях обуславливается накоплением и обработкой порожних вагонов при подготовке их под погрузку, а также включением погруженных вагонов в формируемые поезда. Следовательно, уровень местной работы на дороге или отделении — основной фактор, определяющий загрузку сортировочной станции переработкой вагонопотоков. В табл. 12.1 приведены данные о числе грузовых операций (погрузка и выгрузка)  $K_{го}$ , выполняемых на дороге, и вагонообороте транзитных с переработкой вагонов  $B_d$  в среднем в сутки за некоторый предшествующий период.

Анализ табл. 12.1 показывает, что при росте объема местной работы на дороге существует устойчивая тенденция к непрерывному увеличению вагонооборота транзитных вагонов с переработкой. Можно предположить наличие статистической связи между показателями местной работы и вагонооборотом. Корреляционный анализ, выполненный на основе данных этой таблицы, показывает, что коэффициент корреляции объема местной работы и вагонооборота транзитных с переработкой вагонов имеет высокое значение (0,98). Кроме вагонооборота транзитных вагонов с переработкой, учитывают число грузовых операций на дороге и другие факторы и среди

Таблица 12.1

Число грузовых операций и размеры вагонооборота  
транзитных вагонов с переработкой за сутки

| Показа-<br>тель | Годы   |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                 | 1-й    | 2-й    | 3-й    | 4-й    | 5-й    | 6-й    | 7-й    | 8-й    | 9-й    | 10-й   |
| $K_{го}$        | 25 795 | 26 528 | 26 888 | 27 331 | 28 408 | 29 136 | 30 095 | 31 406 | 32 564 | 33 802 |
| $B_d$           | 31 814 | 33 062 | 34 473 | 35 065 | 37 139 | 36 754 | 37 735 | 38 890 | 41 466 | 43 301 |

них уровень маршрутизации грузопотоков как при зарождении, так и при погашении. При росте уровня местной работы будут обеспечены предпосылки для повышения уровня маршрутизации грузопотоков, что приведет к снижению переработки вагонопотоков на станциях.

Регрессивным анализом установлено наиболее целесообразное уравнение связи между вагонооборотом и числом грузовых операций

$$B_d = 4939 + 1,3 K_{го}. \quad (12.3)$$

Из уравнения (12.3) видно, что, например, с увеличением объема местной работы на 1000 вагонов в сутки вагонооборот транзитных вагонов с переработкой на сортировочных станциях рассматриваемой дороги возрастает на 1300 вагонов в сутки. Используя плановые размеры погрузки-выгрузки на дороге, с помощью зависимости (12.3) можно выявлять несоответствие между наличной и потребной перерабатывающей способностью станций и планировать капитальные вложения в их развитие. Например, если принять темп роста объема местной работы 1250 вагонов в сутки за год, то примерно через каждые 7 лет требуется наращивать перерабатывающую способность станций на величину, соответствующую мощности одной сортировочной системы.

Однако наряду с общей потребностью в перерабатывающей способности станций дороги необходимо уточнять вопросы развития каждой из них в отдельности. Для этого нужно установить тенденции роста объема работы по конкретно взятой станции или системе. Используя метод косвенной экстраполяции, можно предположить следующий путь решения этой задачи. Сортировочная или другая станция обслуживает обширный полигон сети дорог. Следовательно, уровень нагрузки на отдельно взятую станцию также определяется характером местной работы на тяготеющем полигоне, в качестве которого можно принять отделение дороги или иной регион.

На основе корреляционного анализа статистических данных за предшествующий период определяется теснота связи между размерами местной работы в регионе и количественными показателями работы станций. Перспективные объемы работы станции рассчитывают по зависимостям, установленным на основе регрессивного анализа.

Поскольку результативный (объем переработки вагонов на сортировочной станции) и факторный (местная работа отделения) признаки имеют между собой тесную связь, то по величинам критерия Фишера  $F$  и теоретического корреляционного отношения  $\eta$  (которые определяют для криволинейных зависимостей) выбирают аналитическую зависимость, наиболее полно отражающую ее. При этом сравнивают выражения:

$$\left. \begin{aligned} - N_{II} &= a + bN_M; \\ - N_{II} &= aN_M^B; \\ - N_{II} &= ab^{N_M}; \\ N_{II} &= a + bN_M + cN_M^2, \end{aligned} \right\} \quad (12.4)$$

где  $N_{II}$  — объем переработки вагонопотоков на сортировочной станции;  $N_M$  — размеры местной работы на отделении;  $a, b, c$  — параметры регрессии.

Величину транзитного вагонопотока без переработки, пропускаемого сортировочными станциями, можно прогнозировать разными методами. Один из них — установление зависимости между перерабатываемым и перерабатываемым вагонопотоками  $N_{тр} = f(N_{II})$  и распространение ее на перспективный период. Процентное соотношение между транзитным и перерабатываемым вагонопотоками, как правило, остается постоянным (или незначительно колеблется) на протяжении длительного периода времени. Поэтому не исключается возможность распространения его за пределы ретроспективного периода.

Для выбора перспективного плана формирования поездов необходимо рассчитывать ожидаемые струи вагонопотоков, а также параметры ( $c, t_{он}$ ) по каждой станции. Эта работа трудоемка и не всегда выполнима, так как должна быть основана на плановых данных о развитии производства и росте объема перевозок с использованием многофакторного анализа. Поэтому для прогнозирования нагрузки на сортировочные станции целесообразно применять методы изучения тенденций роста объема работы за некоторый предыдущий период и их непосредственной или косвенной экстраполяции на перспективный срок  $t_0; t_k$ .

В соответствии с теоретическим законом распределения (см. гл. 5) объема работы сортировочной станции устанавливают продолжительность ее функционирования с разными грациями нагрузки. Для нормального распределения плотности вероятностей, например, установлено, что нагрузку от  $\bar{N}_{II} - 3\sigma$  до  $\bar{N}_{II} - 2\sigma$  сортировочная станция будет испытывать в течение 7 дней в году, от  $\bar{N}_{II} - 2\sigma$  до  $\bar{N}_{II} - \sigma$  — 51 день, от  $\bar{N}_{II} - \sigma$  до  $\bar{N}_{II}$  — 124 дня и т. д. Нагрузку, заданную в интервальной форме, целесообразно выразить, используя средние значения интервалов  $\bar{N}_{II} - 2,5\sigma$ ;  $\bar{N}_{II} - 1,5\sigma$  и т. д. Тогда исходную информацию о перспективных вагонопотоках и продолжительности работы с соответствующими их значениями удобно представить в виде матриц:

по продолжительности работы в (сутках) с соответствующими градациями вагонопотоков

$$t = \begin{pmatrix} t_{00} & t_{01} & t_{02} & \dots & t_{0n} \\ t_{10} & t_{11} & t_{12} & \dots & t_{1n} \\ t_{20} & t_{21} & t_{22} & \dots & t_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_{r0} & t_{r1} & t_{r2} & \dots & t_{rn} \end{pmatrix}; \quad (12.5)$$

по величине вагонопотоков

$$N_p = \begin{pmatrix} N_{00} & N_{01} & N_{02} & \dots & N_{0r} \\ N_{10} & N_{11} & N_{12} & \dots & N_{1r} \\ N_{20} & N_{21} & N_{22} & \dots & N_{2r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ N_{n0} & N_{n1} & N_{n2} & \dots & N_{nr} \end{pmatrix}. \quad (12.6)$$

Число столбцов матрицы (12.5) равно числу строк матрицы (12.6). Обе матрицы описывают перспективную многомерную нагрузку на сортировочные станции (системы). Продолжительность работы с соответствующей величиной вагонопотока определяют умножением этих матриц.

## 12.2. Принципы оптимизации технологии и увеличения мощности сортировочных станций

В теории развития станционных систем и станций в целом, которые относятся к большим системам, определены фазовые и управляющие переменные, а также ограничения, накладываемые на эти переменные [15]. Это позволяет обеспечить системный подход к технологии и развитию станций, правильно формулировать и решать многовариантную задачу развития их пропускной и перерабатывающей способности, разработать прогноз их оптимального развития на перспективу на основе объективного комплексного показателя — критерия эффективности.

Для периода развития  $t_1$ ;  $t_n$  нагрузку на систему задают в виде матриц объемов и продолжительности работы с соответствующими объемами. С другой стороны, состояния станционных систем и подсистем зависят от их внутренних характеристик: путевого развития парков, мощности каналов, занятых обработкой поездов, а также мощности выходных каналов подсистем — горки, каналов по окончанию формирования, пропускной способности выходных участков и др. Состояния подсистем определяют число составов в подсистеме на момент времени  $t$ , т. е. величиной  $N(t)$ . Фазовые переменные зависят от хода процесса в подсистемах. В самом общем виде любая из фазовых переменных представляет собой функционал  $\Phi$ , определенный на траектории процесса  $N(t)$ , если траектории  $N(t)$  ста-

вятся в соответствие некоторое число  $\Phi[N(t)]$ . Ход процесса в подсистемах предопределяет и соответствующие значения фазовых переменных. Поэтому следует различать текущие значения этих переменных и их значения, установленные на некоторых интервалах времени достаточно большой продолжительности, например  $t_{ij}$ , в соответствии с вектором-столбцом (12.2). В связи с тем что фазовые переменные предопределены ходом процесса в подсистеме, они зависят, как и траектория процесса, от нагрузки величины поездопотока и от характеристик каналов и элементов подсистемы.

Вектор фазовых переменных для подсистемы «ВхУ—ПП—Г»

$$\bar{t}_i^{\text{ВхУ—ПП—Г}} = \begin{pmatrix} \bar{t}_{\text{ож}}^{\text{пп}} \\ P_{\text{к}}^{\text{пп}} \\ \bar{t}_{\text{от}_1} \end{pmatrix}, \quad i=1, 2, \dots, r, \quad (12.7)$$

где  $\bar{t}_{\text{ож}}^{\text{пп}}$  — среднее время простоя в ожидании операций на путях парка прибытия;  $\bar{t}_{\text{от}_1}$  — средняя продолжительность задержек поездов на подходах;  $P_{\text{к}}^{\text{пп}}$  — число путей в подсистеме.

Вектор фазовых переменных для подсистемы «Г—ПФ—ВФ»

$$\bar{t}_i^{\text{Г—ПФ—ВФ}} = \begin{pmatrix} \bar{t}_{\text{ож}}^{\text{пф}} \\ P_{\text{к}}^{\text{пф}} \\ \bar{t}_{\text{от}_2} \end{pmatrix}, \quad i=1, 2, 3, \dots, r, \quad (12.8)$$

где  $\bar{t}_{\text{ож}}^{\text{пф}}$  — среднее время простоя составов в ожидании окончания формирования;  $\bar{t}_{\text{от}_2}$  — среднее время простоя, вызванного отказами в работе подсистемы;  $P_{\text{к}}^{\text{пф}}$  — число путей в подсистеме.

По аналогии вектор фазовых переменных в подсистеме «ВФ—ПО—ВыхУ»

$$\bar{t}_i^{\text{ВФ—ПО—ВыхУ}} = \begin{pmatrix} \bar{t}_{\text{ож}}^{\text{по}} \\ P_{\text{к}}^{\text{по}} \\ \bar{t}_{\text{от}_3} \end{pmatrix}, \quad i=1, 2, 3, \dots, r, \quad (12.9)$$

где  $\bar{t}_{\text{ож}}^{\text{по}}$  — среднее время простоя в ожидании операций на путях парка отправления;  $\bar{t}_{\text{от}_3}$  — среднее время простоя составов в ожидании выставки, вызванного отказами в работе подсистемы;  $P_{\text{к}}^{\text{по}}$  — число путей в парке отправления.

Путевое развитие подсистем в векторах (12.7)—(12.9) определяют для размеров движения  $N_i$ , соответствующих максимально-му потоку (градация размеров при  $i=r$ ). Пути парков создают соответствующие условия для выполнения технологических процессов. Они несут на себе функции не только фазовых, но и управляющих переменных. Например, увеличением путей в парке формиро-

вания можно повысить производительность горки и каналов формирования за счет уменьшения или полного устранения повторной переработки вагонов, вызванной недостаточным числом или длиной путей.

Если простои в подсистемах относить на один вагон, то фазовые переменные по подсистемам можно суммировать. С учетом этого получаем трехмерный вектор

$$\bar{t}_i = \begin{pmatrix} \sum_1^m \bar{t}_{ож} \\ \sum_1^m P_r \\ \sum_1^m \bar{t}_{от} \end{pmatrix}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, r, \quad (12.10)$$

где  $m$  — число подсистем.

Таким образом, развитие станции следует рассматривать в  $n$ -мерном фазовом пространстве. В данном случае число компонент вектора сведено к трем. Компоненты вектора управления составляют управляющие переменные — такие величины, которые мы можем выбирать при разработке технологии и проектировании любого этапа развития станции или узла. Применяя те или иные меры развития станции, мы увеличиваем производительность работы ее каналов — горки, каналов по окончанию формирования, ПТО, ЦТК и др.

Технологические интервалы по этим каналам —  $I_r$ ,  $I_v$ ,  $I_{пто}$ ,  $I_{цтк}$  — это концентрированное выражение управления, а нормируемые значения интервалов при разных мерах развития станции — компоненты вектора управления. Перечень управляющих переменных для основных подсистем сортировочных станций приведен в табл. 12.2.

Если затраты на развитие каналов ПТО и ЦТК суммировать с затратами на развитие выходных каналов, то вектор управления при перспективном развитии станции можно свести к трехмерному:

$$\bar{I} = \begin{pmatrix} \bar{I}_r \\ \bar{I}_v \\ \bar{I}_o \end{pmatrix}. \quad (12.11)$$

Интенсификация работы выходных каналов подсистем обеспечивает рост производительности их работы. Величины этих интервалов при заданной нагрузке оказывают решающее влияние на простои, путевое развитие и эксплуатационную надежность работы станции.

Под управлением системой в процессе ее развития следует понимать разработку, выбор и осуществление различных мер, направленных на увеличение пропускной и перерабатывающей спо-

Таблица 12.2

Управляющие переменные сортировочной станции

| Наименование управляющих переменных                                                                                    | Расчетные формулы                                                                                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Подсистема «Г—ПФ—ВФ»<br>Нормированные значения технологических интервалов:<br>горки<br>ПТО<br>ЦТК                      | $I_r = \bar{T}_c^r \cdot N_{ц}$<br>$I_{пто} = T_{пто} : K_{пто}$<br>$I_{цтк} = T_{цтк} : K_{цтк}$ |
| Подсистема «Г—ПФ—ВФ»<br>Нормированные значения технологических интервалов по каналам:<br>окончания формирования<br>ЦТК | $I_v = \bar{T}_c^{офм}$<br>$I'_{цтк} = T'_{пто} : K'_{цтк}$                                       |
| Подсистема «ВФ—ПО—ВыхУ»<br>Нормированные значения технологических интервалов:<br>ПТО<br>ЦТК<br>выходного канала        | $I'_{пто} = T'_{пто} : K'_{пто}$<br>$I''_{цтк} = T''_{цтк} : K''_{цтк}$<br>График участка         |

Примечание. В расчетных зависимостях приняты обозначения  $\bar{T}_c^r$ ,  $\bar{T}_c^{оф}$  — продолжительность цикла операций на горке и вытяжных путях;  $K_{пто}$ ,  $K_{цтк}$  — число параллельно работающих каналов ПТО и ЦТК;  $M$  — то же на вытяжных путях (число параллельно работающих локомотивов);  $N_{ц}$  — число поездов, расформированных за время цикла.

собности станции, которые обеспечат наиболее эффективное выполнение заданного объема работы с наименьшими затратами средств.

На управляющие переменные накладываются возможные ограничения по капитальным вложениям. В этом случае в число мер развития включаются лишь такие из них, которые не требуют на каждом этапе превышения выделенных финансовых сумм на развитие станции.

Кроме того, возможны также ограничения по условию обеспечения переработки заданного поездопотока:

$$I_p < \frac{24 - T_{пост}}{N_{jr}^p}; \quad (12.12)$$

$$I_v < \frac{24 - T_{пост}}{N_{jr}^ф}; \quad (12.13)$$

$$I_o < \frac{24 - T_{пост}}{N_{jr}^о}, \quad (12.14)$$

где  $T_{\text{пост}}$  — продолжительность занятия выходных каналов за сутки для их профилактического осмотра, ремонта и других операций;  $N_{jr}^p, N_{jr}^f, N_{jr}^o$  — величина поездопотока  $j$ -го года, соответствующая  $r$ -й градации по внутригодовому распределению по расформировываемым, формируемым и отправляемым поездам.

Варианты управления, не удовлетворяющие условиям (12.12)—(12.14), исключают из рассмотрения как неконкурентоспособные. Фазовые переменные в конкретных условиях развития станций и узлов могут быть ограничены также заранее установленной величиной эксплуатационной надежности работы станции, заданной величиной простоя вагонов (например, рассматривают лишь те варианты, в которых простой с переработкой не превышает 7 ч), территорией для укладки путей и другими факторами.

Существует тесная взаимосвязь между последовательностями мер (этапами) развития станции. Величины резервов перерабатывающей способности на последующем  $k+1$ -м этапе зависят от той меры, которая была применена на  $k$ -м этапе. Вместе с резервами будет изменяться и целый ряд других показателей. Поэтому критерий эффективности, принятый для сравнения и выбора оптимальной стратегии развития станции, должен отражать также сложные функциональные взаимосвязи. Его величина на  $k+1$ -м этапе зависит от тех мер, которые были применены на  $k$ -м этапе (шаге). При наличии нескольких последовательностей мер (более одной стратегии) оптимальные пути развития сортировочных станций выбирают методом динамического программирования. Последним,  $k$ -м, этапом (шагом) систему переводят из состояния  $T_{k-1}$  в состояние  $T_k \in Z_k$  (область состояний  $Z_k$  связана с тем, что на  $k$ -м этапе имеется не один, а несколько путей развития системы). При решении задачи находят так называемое условно оптимальное управление на последнем шаге, которое позволит установить локальный оптимум. Обозначим это управление  $I_k(T_{k-1})$ . Оно сводится к минимальному значению критерия на последнем шаге:

$$E_k^*(T_{k-1}) = \min \{E_k(T_{k-1}; I_k)\}. \quad (12.15)$$

Таким образом, минимальное значение критерия на последнем шаге определяют из условия, что состояние станции на  $k+1$ -м этапе было  $T_{k-1}$ , а условно минимальный критерий достигают управлением  $I_k^*(T_{k-1})$ . По условию (12.15) оптимизируют последний этап для любого состояния станции на предпоследнем этапе. Следовательно, на этом шаге найдено условно оптимальное управление, которое выражают вектором

$$\bar{I}_k^* = \begin{pmatrix} I_{гк}^* \\ I_{вк}^* \\ I_{ок}^* \end{pmatrix}. \quad (12.16)$$

При реализации вектора  $\bar{I}_k^*$  получают минимальное значение критерия  $E_k^* = \min$ . После этого оптимизируют два этапа развития:

$k$  и  $k-1$ . Предполагая, что в результате  $k+2$ -го этапа станция перешла в состояние  $T_{k-2}$ , на  $k+1$ -м этапе (шаге) применяют управление  $T_{k-1}$ . Перевод системы в состояние  $T_{k-1}$  зависит от состояния  $T_{k-2}$  и управления  $I_{k-1}$ , т. е.

$$T_{k-1} = T_k(T_{k-2}; I_{k-1}).$$

Тогда значение критерия на  $k+1$ -м шаге

$$E_{k-1} = E_{k-1}(T_{k-2}; I_{k-1}),$$

а минимальное значение критерия на  $k$ -м этапе развития станции:

$$E_k^*(T_{k-1}) = E_k^*[T_{k-1}(T_{k-2}; I_{k-1})]. \quad (12.17)$$

Значение критерия, определяемое выражением (12.17), устанавливает условно оптимальное управление с учетом применяемого управления на  $k+1$ -м этапе. На двух последних этапах оно зависит уже от состояния системы на  $k+2$ -м этапе  $T_{k-2}$  и принимаемого на  $k+1$ -м этапе развития  $I_{k-1}$ , т. е.

$$E_{k-1, k}(T_{k-2}; I_{k-1}) = E_{k-1}[T_{k-1}(T_{k-2}; I_{k-1})]. \quad (12.18)$$

На основе выражения (12.18) необходимо найти такое условно оптимальное управление на  $k+1$ -м этапе  $I_{k-1}^*(T_{k-2})$ , при котором выражение (12.1) будет иметь минимум, т. е.

$$E_{k-1, k}^*(T_{k-2}) = \min_{I_k} \{E_{k-1}(T_{k-2}; I_{k-1})\}.$$

В общем виде условно оптимальное управление системой на  $m$ -м этапе, если уже оптимизирован  $m+1$ -й этап, где  $m = 1, 2, \dots$ ,  $k$ , выражают следующим образом:

$$E_{m, m+1, \dots, k}(T_{m-1}) = E_m(T_{m-1}; I_m) + E_{m+1, \dots, k}^* \times \\ \times [T_m(T_{m-1}; I_m)] = \min \{E_{m, m+1, \dots, k}(T_{m-1}; I_m)\}. \quad (12.19)$$

Такую последовательность алгоритмических зависимостей и взаимосвязей продолжают до оптимизации всех этапов развития сортировочной станции как физической системы, включая первый этап. К оптимальному развитию станции приходят путем обратного рассмотрения этапов от первого до последнего. В результате получают наилучшую последовательность плановых мер развития станции, которую характеризует совокупность векторов управления на каждом этапе, т. е.:

$$\bar{I}^* = \begin{pmatrix} \bar{I}_{г1}^* & \bar{I}_{г2}^* & \bar{I}_{г3}^* & \dots & \bar{I}_{гk}^* \\ \bar{I}_{б1}^* & \bar{I}_{б2}^* & \bar{I}_{б3}^* & \dots & \bar{I}_{бk}^* \\ \bar{I}_{о1}^* & \bar{I}_{о2}^* & \bar{I}_{о3}^* & \dots & \bar{I}_{ок}^* \end{pmatrix}. \quad (12.20)$$

Совокупности векторов (12.20) соответствует искомое значение критерия эффективности планирования оптимальных этапов развития станции, а матрицы векторов этапного развития станции — также и матрица оптимальных резервов перерабатывающей способности на весь плановый период:

$$\delta N^* = \begin{vmatrix} \delta N_{11} & \delta N_{12} & \dots & \delta N_{1l} & \delta N_{1(l+1)} & \dots & \delta N_{1l} \delta N_{1(l+1)} & \dots & \delta N_{1K} \\ \delta N_{21} & \delta N_{22} & \dots & \delta N_{2l} & \delta N_{2(l+1)} & \dots & \delta N_{2l} \delta N_{2(l+1)} & \dots & \delta N_{2K} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \delta N_{r1} & \delta N_{r2} & \dots & \delta N_{rl} & \delta N_{r(l+1)} & \dots & \delta N_{rl} \delta N_{r(l+1)} & \dots & \delta N_{rK} \end{vmatrix} \quad (12.21)$$

В матрице (12.21) значения резервов перерабатывающей способности  $\delta N_{11}$  соответствуют году  $t_j$ , когда заканчивается действие  $j$ -го этапа развития;  $\delta N_{1l}$  — году  $t_l$ , когда заканчивается действие  $l$ -го этапа развития; и, наконец,  $\delta N_{1(l+1)}$  — году  $t_{l+1}$ , когда начинается действие последнего,  $k$ -го, этапа развития станции. Следовательно, установление и планирование оптимальной этапности развития станции — это одновременно установление оптимальных значений резервов пропускной и перерабатывающей способности.

### 12.3. Разработка методики расчета критерия оптимальности при прогнозировании развития сортировочных станций

При сравнении вариантов этапного развития сортировочных станций в качестве критерия сравнительной экономической эффективности принимают приведенные к одному году расходы, зависящие от общих капитальных вложений и эксплуатационных затрат.

Запишем критерий эффективности с учетом изменения нагрузки на станционные системы по годам периода  $t_0$ ;  $t_n$  и внутригодовым отрезкам времени в связи с внутригодовой неравномерностью:

$$E_K(T_{K-1}, I_K) = \min \left\{ \sum_{j=1}^{l+1} \frac{K_{jq} (I_{jq})}{(1+\Delta)^{j+l}} + \sum_{j=1}^{l+1} \sum_{i=1}^{l+r} \frac{\Delta_q^{(k)} (N_{ij}, t_{ij}, I_{jq}, N_{ji}^{TP})}{(1+\Delta)^{(j+1)}} \right\}, \quad (12.22)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, r; \quad i = 1, 2, 3, \dots, l; \quad j = t_K + t_l, \dots, l_K,$$

где  $K_{jq}$  — капитальные затраты на втором этапе по  $q$ -й альтернативной мере развития;  $\Delta_q^{(k)} (N_{ij}, t_{ij})$  — суммарные эксплуатационные расходы по годам действия  $q$ -й меры развития  $k$ -го этапа и по  $j$ -м градациям внутри каждого года;  $j + l$  — порядковый номер года ввода в эксплуатацию  $q$ -й альтернативной меры развития  $k$ -го этапа;  $l$  — продолжительность строительства (реконструкции);  $\Delta$  — нормативный коэффициент эффективности капиталовложений.

Критерий оптимальности на  $k$  — 1-м этапе, если оптимизирован  $k$ -й этап, будем рассчитывать по формуле

$$E_{K-1}(T_{K-2}, E_K^*) = \min_{I_{K-1}} \left\{ \sum_{j=1}^{l_{K-1}} \frac{K_q^{(k-1)} (I_q^{k-1})}{(1+\Delta)^{(t_{K-1})}} + \right.$$

$$+ \sum_{j=t_{K-1}+t_l^{(k-1)}}^{l_{K-1}} \sum_{i=1}^{l_{K-1}} \frac{\Delta_q^{(k-1)} (N_{ij}, t_{ij})}{(1+\Delta)^{(t_{K-1}+t_l^{(k-1)})}} + \sum_{j=1}^{l_{K-1}} \frac{K_q^{*(k)} (I_q^{*(k)})}{(1+\Delta)^{t_K}} + \left. \sum_{j=t_K+t_l^{(k)}}^{l_K} \sum_{i=1}^{l_K} \frac{\Delta_q^{*(k)} (N_{ij}, t_{ij}^*)}{(1+\Delta)^{(t_K+t_l^{(k)})}} \right\}, \quad (12.23)$$

$$i = 1, 2, \dots, r; \quad j = 1, 2, \dots, l_{K-1}; \quad t_l = 1, 2, \dots, l.$$

И, наконец, запишем в общем виде функцию критерия оптимальности на  $m$ -м этапе при оптимизированных  $m+1, m+2, \dots, k$  этапах:

$$E_{m, m+1, \dots, K}(T_{m-1}, E_{m+1}^*, \dots, E_K^*) = \min_{I_m} \left\{ \frac{K_q^{(m)} (I_q^{(m)})}{(1+\Delta)^{t_m}} + \sum_{j=t_m+t_l^{(m)}}^{l_m} \sum_{i=1}^{l_m} \frac{\Delta_q^{(m)} (N_{ij}, t_{ij})}{(1+\Delta)^{(t_m+t_l^{(m)})}} + \sum_{j=t_l^{(m+1)}}^{l_{m+1}} \sum_{i=1}^{l_{m+1}} \frac{K_q^{*(m+1, \dots, K)} (I_q^{*(m+1, \dots, K)})}{(1+\Delta)^{(t_{m+1}, \dots, t_K)}} + \sum_{j=t_{m+1}+t_l^{(m+1)}}^{l_{m+1}} \sum_{i=1}^{l_{m+1}} \dots \sum_{i=1}^{l_{m+1}} \frac{\Delta_q^{*(m+1, \dots, K)} (N_{ij}, t_{ij}^*)}{(1+\Delta)^{(t_{m+1}+t_l)} \cdot l_{m+1}, \dots, (t_K+t_l, t_K)} \right\}. \quad (12.24)$$

Расчет критерия оптимальности в соответствии с выражениями (12.22) — (12.24) дает возможность установить экономически наиболее выгодный путь развития станции. Капитальные затраты определяют на каждом этапе при разработке вариантов, а сроки ввода тех или иных мер планируют на основе заранее разработанных графиков, плановых сроков строительства по этапам и графа вариантов.

Эксплуатационные расходы  $\Delta (N_{ij}; t_{ij}; t_{ij}^*; I_{jq})$  включают затраты на содержание вводимых путевых и других устройств, которые, как правило, можно принимать линейно зависящими от сроков  $t_j$  и затрат, зависящих от простоев, числа маневровых локомотивов, которые нелинейно зависят от коэффициентов загрузки станционных элементов. Поэтому в целом эксплуатационные расходы нелинейно изменяются в связи с увеличением срока эксплуатации станции при том или ином варианте усиления ее пропускной и перерабатывающей способности. Эксплуатационные расходы за срок действия  $m$ -го этапа, пропорциональные простоям составов в ожидании

вывода из подсистем «ВхУ—ПП—Г», «Г—ПФ—ВФ» и «ВФ—ПО—ВыхУ»:

$$\mathcal{Q}(N_{ij}; t_{ij}) = \sum_{j=1}^{i=l_m} \sum_{i=1}^r (N_{pij} \bar{t}_{ожij}^p + N_{фij} \bar{t}_{ожij}^{оф} t_{ij}^{оф} + N_{оij} \bar{t}_{ожij}^o t_{ij}^o) c_{сч}, \quad (12.25)$$

где  $N_{pij}$ ,  $N_{фij}$ ,  $N_{оij}$  — соответственно суточный поездопоток расформирования, формирования и отправления  $j$ -го года  $i$ -й градации;  $\bar{t}_{ожij}^p$ ,  $\bar{t}_{ожij}^{оф}$ ,  $\bar{t}_{ожij}^o$  — среднее время простоя в ожидании освобождения выходного канала подсистемы соответственно расформирования, формирования и отправления при размерах поездопотока  $j$ -го года  $i$ -й градации;  $t_{ij}$  — продолжительность в сутках  $i$ -й градации  $j$ -го года;  $c_{сч}$  — стоимость 1 составоч простоя, руб.

При  $N_{pij} = N_{фij} = N_{оij}$ ;  $t_{ij}^p = t_{ij}^{оф} = t_{ij}^o = t_{ij}$

$$\mathcal{Q}(N_{ij}; t_{ij}) = \sum_{j=t_m+t_{\pi}^{(m)}}^{i=l_m} \sum_{i=1}^r N_{ij} t_{ij} (\bar{t}_{ожij}^p + \bar{t}_{ожij}^{оф} + \bar{t}_{ожij}^o) c_{сч},$$

где  $i = 1, 2, \dots, r$ ;  $j = t_m + t_{\pi}^{(m)}, \dots, l_m$ .

Эксплуатационные расходы, связанные с содержанием маневровых локомотивов в процессе реализации  $m$ -го этапа

$$\mathcal{Q}_{\pi}(N_{ij}; t_{ij}) = \sum_{j=t_m+t_{\pi}^{(m)}}^{i=l_m} \sum_{i=1}^r N_{ij} t_{ij} (M_{rij} + M_{vij} + M_{mij}) c_{лс}, \quad (12.26)$$

где  $i = 1, 2, \dots, r$ ;  $j = 1, 2, \dots, l_m$ ;  $M_{rij}$ ,  $M_{vij}$ ,  $M_{mij}$  — число работающих локомотивов в  $j$ -м году  $i$ -й градации  $m$ -го этапа соответственно на горке, вытяжных путях, местной работе;  $c_{лс}$  — стоимость 1 локомотиво-сут, руб.

Эксплуатационные расходы, связанные с возможными отказами в работе подсистем,

$$\mathcal{Q}_{от}(N_{ij}; t_{ij}; I_{jq}) = \sum_{j=1}^{i=l_m} \sum_{i=1}^r (N_{от}^p \bar{t}_{от}^p c_{от}^p + N_{от}^ф \bar{t}_{от}^ф c_{от}^ф + N_{от}^o \bar{t}_{от}^o c_{от}^o + N_{от}^{тр} \bar{t}_{от}^{тр} c_{от}^{тр}), \quad (12.27)$$

где  $N_{от}^p$ ,  $N_{от}^ф$ ,  $N_{от}^o$ ,  $N_{от}^{тр}$  — число отказов за время работы  $t_{ij}$  соответственно подсистем «ВхУ—ПП—Г», «Г—ПФ—ВФ», «ВФ—ПО—ВыхУ» и «ВхУ—ТрП—ВыхУ»;  $\bar{t}_{от}^p$ ,  $\bar{t}_{от}^ф$ ,  $\bar{t}_{от}^o$ ,  $\bar{t}_{от}^{тр}$  — средняя продолжительность отказов соответствующих подсистем;  $c_{от}^p$ ,  $c_{от}^ф$ ,  $c_{от}^o$ ,  $c_{от}^{тр}$  — стоимость 1 ч отказа соответствующих подсистем.

Эксплуатационные расходы на содержание вводимых устройств на  $m$ -м этапе

$$\mathcal{Q}''(N_{ij}; t_{ij}) = \sum_{j=t_m+t_{\pi}^{(m)}}^{i=l_m} \mathcal{Q}_{сод}^{(m)} t_j = \mathcal{Q}_{сод}^{(m)} \sum_{j=1}^{i=l_m} t_j, \quad (12.28)$$

где  $j = 1, 2, \dots, l_m$ ;  $i = 1$ ;

$\mathcal{Q}_{сод}^{(m)}$  — годовые расходы на содержание введенных устройств  $m$ -го этапа.

С учетом выражений (12.25)—(12.28) общие эксплуатационные расходы

$$\mathcal{Q}(N_{ij}; t_{ij}) = \sum_{j=t_m+t_{\pi}^{(m)}}^{i=l_m} \sum_{i=1}^r \{N_{ij} t_{ij} [\bar{t}_{ожij}^p + \bar{t}_{ожij}^{оф} + \bar{t}_{ожij}^o] c_{сч} + (M_{rij} + M_{vij} + M_{mij}) c_{лс} + S_{пл} c_{пкм} + c_{лкм} S_{пл}\} + \mathcal{Q}_{сод}^{(m)} \sum_{j=1}^{i=l_m} t_j, \quad (12.29)$$

где  $S_{пл}$ ,  $S_{пл}$  — соответственно расстояние пробега поездов и поездных локомотивов в  $m$ -м этапе  $q$ -й стратегии;  $c_{пкм}$ ,  $c_{лкм}$  — стоимость соответственно 1 поездоч и 1 локомотиво-км пробега.

Иногда в качестве меры развития применяют такую реконструкцию, которая дает экономический эффект не только в пределах станции как системы, но и за ее пределами. Эту эффективность также необходимо учитывать при сравнении и выборе путей развития станции. Например, при строительстве дополнительной горки, местного и группировочного парков снижаются затраты вагоно- и локомотиво-часов на грузовых станциях и станциях промышленного комплекса.

#### 12.4. Сортировочные станции высокой эксплуатационной надежности для формирования и пропуска поездов большой массы и длины

Интенсификация развития пропускной способности направлений во взаимосвязи с узлами и станциями требует пересмотра и совершенствования схем сортировочных станций. При этом следует исходить из того, что ряд наиболее крупных сортировочных станций, в том числе и двусторонних, уже в настоящее время часто сдерживает пропуск транспортных потоков.

Станции, которые будут реконструировать для формирования и пропуска поездов большой массы и длины на специализированных железнодорожных направлениях или сооружать вновь, следует разрабатывать с учетом ряда новых требований.

Во-первых, на них должны быть созданы условия и соответствующие путевые мощности для работы как с поездами магистральных направлений большой массы и длины, так и с поездами местного региона, масса и длина которых соответствуют длине путей 850—1050 м.

Во-вторых, эти станции должны иметь высокие эксплуатационные качества и надежность работы. Проблему эксплуатационной надежности решают по всем элементам комплекса технических средств. Поэтому их целесообразно проектировать так, чтобы обеспечить отделение на подходах транзитного потока поездов без пере-

работки и пассажирского потока от потока поездов, поступающего в переработку. В этом случае незначительные задержки приема перерабатываемых поездов не должны влиять на пропуск пассажирских и транзитных грузовых поездов. Более эффективно это разделение на предузловых станциях за счет дублирования главных путей, по которым потоки подводят к станции. Кроме того, высокую эксплуатационную надежность этих станций обеспечивают за счет двойного или тройного резервирования наиболее ответственных маршрутов.

В-третьих, на этих станциях необходимо снизить информационную нагрузку оперативного персонала. Этому способствуют увеличение массы и длины поездов, автоматизация исполнительских процессов нижнего уровня на основе малых ЭВМ и микропроцессоров и применение автоматизированных методов принятия решений и планирования.

В-четвертых, распределительно-группировочные станции должны иметь специальные сортировочные горки и парки для рассортировки вагонов местного потока, направляемого в промышленные, припортовые и пограничные районы в поездах, масса и длина которых соответствуют существующей длине приемо-отправочных путей.

В-пятых, на этих станциях целесообразно иметь устройства (горки, группировочные парки), расположенные рядом с транзитными и сортировочными парками, которые предназначены для обеспечения пропуска групповых поездов с обменом групп, а также в случае необходимости с изменением массы и длины поездов.

Предлагаемая схема распределительно-группировочной станции приведена на рис. 12.1. Нижняя (нечетная) сортировочная система обслуживает промышленный, припортовый или перегрузочный районы, верхняя — магистральные и местные направления. Поезда с магистральных и местных направлений (А и Б) принимают в парк ПП, в котором для каждого направления имеются пути большой длины (1750—2500 м). Для приема поездов с местного полигона (участковых, передаточных, вывозных, сборных) имеются пути обычной длины (850—1050 м), которые могут быть размещены с одной или с обеих сторон длинных путей. Второй вариант имеет некоторые преимущества.

Главные пути, прилегающие к парку прибытия перегонов, дублированы, что обеспечивает отделение на подходе к станции потока транзитных и пассажирских поездов, которые пропускают по объемлющим сортировочную станцию главным путям, от потока перерабатываемых поездов, который принимают на соответствующие секции длинных путей (поезда большой массы и длины) или путей нормальной длины (местные поезда). Входная и выходная горловины, общая конструкция парка прибытия обеспечивают высокую эксплуатационную надежность приема, обработки и расформирования поездов. Если на подходах и выходах станции обращается значительный поток пассажирских и пригородных поездов, то возмож-

но разделение потока транзитных и пассажирских поездов направлений А и Б на подходе к транзитному парку (с этой целью предусмотрены отдельные главные пути).

Локомотивы от прибывающих поездов можно пропускать по путепроводу под горкой (с правых секций путей парка прибытия) и по соединительному пути (с левых секций путей). Возможен удобный их пропуск и непосредственно в выходную горловину без захода в депо.

Для сокращения влияния заезда горочных локомотивов под составы на прием поездов с направлений А и Б применено центральное расположение ходового пути, которое обеспечивает наиболее эффективный пропуск горочных локомотивов во входную горловину. Кроме того, для пропуска горочных локомотивов во входную горловину секции путей длиной 850—1050 м предусмотрен ходовой путь с правой стороны парка прибытия. По этому пути можно пропускать горочные локомотивы и во входную горловину правой секции длинных путей одновременно с приемом поездов. При двухстороннем размещении путей длиной 850—1050 м (см. рис. 12.1) боковые ходовые пути устраивают с двух сторон парка прибытия. Центральное и боковое расположение ходовых путей обеспечивает независимое выполнение массовых технологических операций по пропуску горочных локомотивов, приему на секции путей поездов большой массы и длины и на секции укороченных путей — местных поездов.

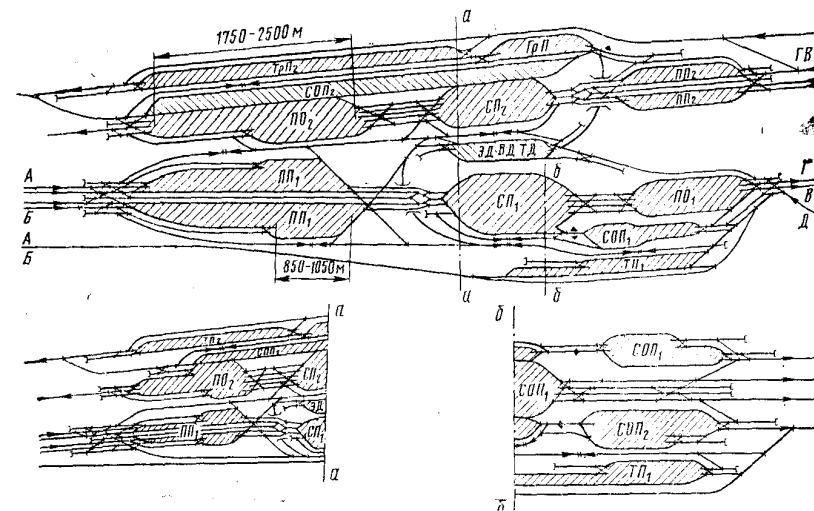


Рис. 12.1. Распределительно-группировочная станция высокой эксплуатационной надежности:

а — общая схема горловины станции; б — вариант сортировочной системы, работающей на внутрорегиональные станции и районы

На основных горках обеих сортировочных систем предусмотрен параллельный роспуск составов. Поезда большой массы и длины расформируют по двум парам надвижных путей.

Двустороннее расположение путей парка прибытия длиной 850—1050 м облегчает параллельный роспуск поездов нормальной длины (с правой и левой секций). Если одновременно распускают поезд большой массы и местный поезд, то часть первого состава будет расформирована в последовательном режиме (частично-параллельный роспуск). Возможны также соединение двух местных поездов одновременно с приемом во входной горловине *ПП* и последующий параллельный роспуск их с составом поезда большой массы.

Сортировочные парки *СП<sub>1</sub>* и *СП<sub>2</sub>* состоят из путей нормальной длины. Проектирование их на полную длину поездов большой массы и длины неэффективно: это требует больших энергетических высот основных горок. Кроме того, при длинных сортировочных путях усложняется работа вытяжных путей и горок. Даже при автоматизации роспуска и трех тормозных позициях, оборудованных системой АРС, возникает значительный объем работы по осаживанию вагонов. Это вызывает дополнительную потребность в маневровых локомотивах и нарушает цикличность и поточность технологии работы горки. Поэтому в сортировочных парках на станциях, предназначенных для приема, расформирования, формирования, отправления и пропуска поездов большой массы и длины, целесообразно по эксплуатационным и экономическим условиям укладывать пути длиной 850, 1050, 1250 м, т. е. эти парки выгодно проектировать по существующим параметрам, но с большим числом путей. Это позволит дублировать основные сквозные назначения в правой и левой половинах парка, обеспечит экономически выгодный режим параллельного роспуска и возможность перестановки составов обычными маневровыми локомотивами.

Технология перестановки составов в нечетной сортировочной системе — традиционная. Эта система должна обеспечивать достаточную рассортировку потока по внутрирегиональным станциям (промышленным, грузовым, портовым, перегрузочным в зависимости от места ее расположения). С этой целью предусмотрено устройство сортировочного *СП<sub>1</sub>* и сортировочно-отправочного парков *СОП<sub>1</sub>*, горки средней мощности для более детальной рассортировки потока.

Вагоны, которые рассортировывают по назначениям плана формирования в *СОП<sub>1</sub>*, при роспуске на основной горке направляют без подборки на крайние правые пути сортировочного парка. С этих путей локомотивы горки средней мощности, работая по кольцевому способу, поочередно надвигают на нее составы, накопленные на крайних путях сортировочного парка, и рассортировывают их по назначениям плана формирования.

Число назначений плана формирования в *СОП<sub>1</sub>* устанавливают с таким расчетом, чтобы обеспечить достаточный уровень загрузки горки средней мощности. В этот парк направляют местный вагоно-

поток ближайшего района, обслуживаемый сборными, вывозными и другими местными поездами. Он требует более детальной подборки не только по назначениям, но и по промежуточным станциям (для сборных поездов) и районам грузовой работы (для передаточных поездов). Через горку средней мощности и *СОП<sub>1</sub>* можно пропускать до 35—40 % всего перерабатываемого на основной горке вагонопотока, что соответствует суммарной мощности 10—15 назначений.

Сортировочная система может работать на достаточно разветвленный большой промышленный или иной район. В этом случае мощность горок и путевое развитие парков *СП<sub>1</sub>* и *СОП<sub>1</sub>* можно увеличить: вместо парков *СП<sub>1</sub>*, *ПО<sub>1</sub>* и *СОП<sub>1</sub>* предусмотреть сооружение трех сортировочно-отправочных парков, каждый из которых обслуживает отдельная сортировочная горка. Парк *СОП<sub>1</sub>* — основной. На горке высокой производительности расформируют прибывающие поезда, в том числе в режиме параллельного роспуска.

В сортировочно-отправочном парке *СОП<sub>1</sub>* организуют накопление, формирование и отправление поездов в большой экономический район (назовем его регион 1). На крайние три-четыре пути с обеих сторон *СОП<sub>1</sub>* отсортировывают (без подборки) вагонопоток, который формируют в поезда местных назначений в сортировочно-отправочных парках *СОП<sub>2</sub>* и *СОП<sub>3</sub>*. Этот вагонопоток сортируют по назначениям соответственно на горках средней мощности. В *СОП<sub>2</sub>* накапливают и подбирают составы поездов, отправляемых на станции региона 2, а в *СОП<sub>3</sub>* — поезда региона 3.

На горках используют поточную технологию, предусматривающую высокую степень механизации и автоматизации исполнительных процессов и процессов планирования и управления эксплуатационной работой. Накопление, окончание формирования и отправление поездов рассредоточены по трем паркам, в выходных горловинах которых созданы хорошие условия для подачи поездных локомотивов, отправления поездов, окончания формирования. Подсортировку составов поездов и окончание формирования выполняют на соответствующих горках для поездов тех назначений, которые отправляются из *СОП<sub>1</sub>*, *СОП<sub>2</sub>* и *СОП<sub>3</sub>*.

Такая конструкция сортировочной системы позволяет не допустить излишнее распыление сортировочной работы по всем внутрирегиональным станциям. Сортировочные и путевые мощности горок и парков *СОП<sub>1</sub>*, *СОП<sub>2</sub>* и *СОП<sub>3</sub>* обеспечивают формирование поездов 50—60 назначений, что соответствует трем внутрирегиональным сортировочным станциям. Расчеты показывают, что концентрация сортировочной работы и интенсивные методы развития станции дают возможность сократить и быстро окупить капиталовложения, добиться их высокой эффективности. Эти варианты схем сортировочных станций концентрируют также технические средства, АСУ и ЭВМ.

Четная сортировочная система распределительно-группировочной станции (см. рис. 12.1, а) осуществляет прием и расформирование поездов обычной массы и длины с внутрирегиональных станций

и последующие накопление, формирование и отправление поездов большой массы и длины на магистральные направления *А* и *Б*, а также направление, формирование и отправление поездов обычной массы и длины на близлежащие участковые и грузовые станции.

На сортировочной горке большой мощности, оснащенной средствами механизации и автоматизации исполнительных процессов и автоматизированного управления, можно постоянно использовать режим параллельного роспуска составов. В сортировочном парке *СП<sub>2</sub>* число путей устанавливают с таким расчетом, чтобы обеспечить высокую эксплуатационную надежность и дублирование наиболее мощных назначений для устойчивой работы в режиме параллельного роспуска составов.

Парк отправления включает в себя пути для отправления поездов большой массы и длины на магистральные специализированные направления и пути длиной 850—1050 м для отправления участковых и других поездов местных назначений на грузовые и другие станции региона. На станциях, предназначенных для формирования поездов большой массы и длины, необходимо предусмотреть оборудование путей надвига на горки, вытяжных путей между парками *СП<sub>2</sub>* и *ПО<sub>2</sub>* и путей парка отправления *ПО<sub>2</sub>* автоматизированными системами, надежно обеспечивающими машинистов маневровых локомотивов информацией об оставшемся свободном расстоянии до горочного светофора (для надвига) и до выходного светофора в парке отправления (при перестановке составов). Поезд большой массы и длины формируют из вагонов, накопленных не менее чем на двух путях *СП<sub>2</sub>*. Объединять их можно по различным технологическим вариантам: перестановкой первой части и последовательным выталкиванием остальных частей, последовательным перемещением всех составных частей поезда большой массы и длины вагонами вперед (выталкивания), соединением двух частей, перестановкой их на отправочный путь и последующей подстановкой вагонов с третьего пути, если тяжелый поезд формируют из вагонов, накопленных на трех путях сортировочного парка.

Параллельно сортировочному и отправочному паркам целесообразно предусматривать пучок сортировочно-отправочных путей большой длины, на которых накапливают порожние вагоны и вагоны с легковесными грузами по отдельным назначениям плана формирования. Длину этих путей можно устанавливать 3500—4000 м, поскольку она включает сортировочные пути, горловину между сортировочным и отправочным парками и пути парка отправления, рассчитанные на отправление поездов большой массы. По мере накопления вагоны группами из 30—40 единиц перемещают в головную часть этого парка и предъявляют к техническому обслуживанию и контролю. Из таких групп в головной части *СОП<sub>2</sub>* формируют поезд любой длины и массы. В этом сортировочно-отправочном парке могут также накапливаться, формироваться и отправляться поезда большой массы и длины не только из порожних вагонов и вагонов для перевозки легковесных грузов, но и из вагонов с большими по-

гонными нагрузками. При подготовке к отправлению такого поезда со стороны горки будет более длинная свободная часть пути (в пределах не только сортировочного парка, но и горловины между сортировочным и отправочным парками).

Таким образом, комплекс путей для отправления поездов большой массы и длины в отправочном парке *ПО<sub>2</sub>* в сочетании с путями большой длины в *СОП<sub>2</sub>* и путями длиной 850—1050 м в парке отправления обеспечивает условия для накопления, формирования, обработки и отправления поездов большой массы и длины на магистральные направления и поездов на местный вперед лежащий полигон сети. Поездные локомотивы пропускают в выходные горловины прямо-отправочного парка *ПО<sub>2</sub>* и транзитного парка *ТП<sub>2</sub>* по ходовым путям из депо с левой стороны парка отправления и по ходовым путям по путепроводу под горкой и далее между парками *ПО<sub>2</sub>* и *ТП<sub>2</sub>*. Вторые локомотивы подают в хвостовую часть длинносоставных и тяжелых поездов из депо по ходовым путям во входную горловину парка отправления или по путепроводу под горкой.

Можно также пропускать головные и хвостовые поездные локомотивы непосредственно из-под поездов, прибывающих в *ПП<sub>2</sub>*.

Рассмотренная схема станции обеспечивает высокую эксплуатационную надежность приема и отправления поездов большой массы и длины на магистральные направления и устойчивое взаимодействие с внутрирегиональными станциями, которые формируют и расформируют обычные поезда при существующих условиях и длине путей. Принимая поезда большой массы наряду с обычными поездами, эта станция распределяет потоки на станции региона и, концентрируя переработку местных поездов, группирует их в поезда большой массы, отправляемые на магистральные направления.

Внутрирегиональные станции могут формировать также групповые поезда. Для их обработки и пропуска предусмотрены транзитные *ТП<sub>2</sub>* и группировочный *ГрП* парки, горка и вытяжной путь. В группировочном парке подготавливают прицепляемые группы вагонов и прицепляют их к поездам, принимаемым на пути транзитного парка. В группировочном парке могут формировать также сборные поезда с последующим отправлением с путей парков *ТП<sub>2</sub>*, *СОП<sub>2</sub>* или *ПО<sub>2</sub>*.

Распределительно-группировочные станции дают возможность повысить провозную способность и снизить плотность потока поездов на направлениях, обеспечить оптимальный режим их работы. Как уже отмечалось, их целесообразно размещать на входах и выходах из крупных промышленных районов (Донбасса, Кривбасса, Урала, Кузбасса и др.), припортовых и перегрузочных районов. На направлениях большой протяженности, характерных для сети, необходимы и односторонние станции, построенные по интенсивной схеме освоения и развития провозной способности и обеспечивающие пропуск, прием, переформирование и отправление поездов большой длины и массы. Такие станции можно размещать на магистраль-

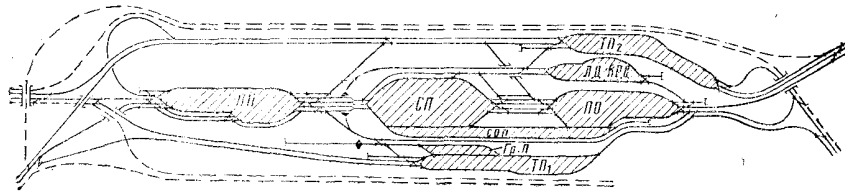


Рис. 12.2. Схема сортировочной станции высокой эксплуатационной надежности для поездов большой массы и длины

ных направлениях, проходящих через крупные промышленно-территориальные комплексы.

Схема односторонней станции, предназначенной для сортировки потока, поступающего как поездами большой массы, так и обычными поездами, приведена на рис. 12.2. Транзитные парки, а также парки приема и отправления этой станции имеют пути для поездов большой массы и длины. Длину этих путей могут устанавливать до 3000 м. Кроме того, в этих парках есть пути обычной длины для работы с поездами, обращающимися между станциями местного назначения, развивать которые для формирования поездов большой массы и длины экономически неэффективно.

Высокую степень эксплуатационной надежности обеспечивают разделение перерабатываемого и транзитного грузового (а также пассажирского) потоков на подходах к станции, необходимый уровень дублирования маршрутов, регулярно используемый режим параллельного роспуска составов (пути основных назначений в сортировочном парке дублированы для снижения пересекающегося потока), возможности эффективной работы с групповыми и сборными поездами.

При реконструкции и развитии сортировочных станций требуется решать ряд вопросов, связанных с работой транспортных узлов, эффективностью и качеством транспортного обслуживания предприятий народного хозяйства в крупных промышленно-территориальных комплексах и экономических районах. Нередко развитие и реконструкцию проводят по экстенсивным схемам с рассредоточением сортировочной и грузовой работы по относительно небольшим станциям в связи с рядом ограничений, прежде всего по территории и капитальным вложениям, когда строительство и реконструкцию ведут своими силами за счет нецентрализованного проектирования и финансирования. В конечном итоге при экстенсивных методах развития допускают большие эксплуатационные потери за счет неполного освоения возрастающих объемов работы, задержек поездов, роста числа повторно перерабатываемых вагонов.

Ограничения по территории серьезно затрудняют развитие существующих сортировочных станций.

Территориальные возможности развития крупных станций и узлов, однако, не полностью исчерпаны. Обычно, когда говорят, что тот или иной парк (станцию) нельзя развивать в связи с ограниченностью территории, имеют в виду увеличение числа путей, когда развитие ограничено по ширине. Однако такое развитие не всегда эффективно, если даже свободная территория имеется: увеличивают число путей, но не их длину, что затрудняет повышение массы обрабатываемых поездов.

Требования интенсификации провозной способности линий и серьезные ограничения по ширине площадок определяют целесообразность развития парков приема и отправления прежде всего сортировочных станций, осуществляющих пропуск и формирование поездов большой массы и длины, в продольном направлении: два парка размещают последовательно друг за другом по направлению главных путей. В этом случае часть путей обоих последовательно размещенных парков можно соединить для приема (отправления) тяжелых и длинных поездов. Следует также отметить, что территории по ходу движения в большинстве случаев свободны, хотя продольное развитие может вызывать иногда и перепланировку подходов или выходов.

На рис. 12.3 приведен фрагмент продольного развития парка прибытия и отправления двусторонней сортировочной станции с использованием принципа интенсивного развития за счет увеличения длины путей парков приема и отправления. Парк прибытия состоит из двух частей: первой — на старой площадке, ограниченной по ширине, и второй — размещенной последовательно с первой. Крайние пути парков  $ПП_1$  и  $ПП_2$  с одной или обеих сторон должны быть соединены друг с другом для приема поездов большой массы и длины. В обоих парках предусмотрена высокая эксплуатационная надежность работы как по приему поездов большой массы, так и местных поездов на пути длиной 850—1050 м в парках  $ПП_1$  и  $ПП_2$ .

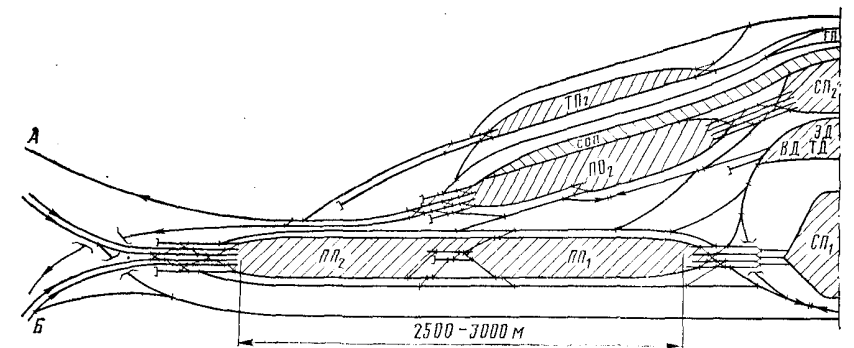


Рис. 12.3. Вариант продольного развития парков прибытия и отправления сортировочной двусторонней станции для приема и отправления поездов большой массы и длины, а также поездов местного региона

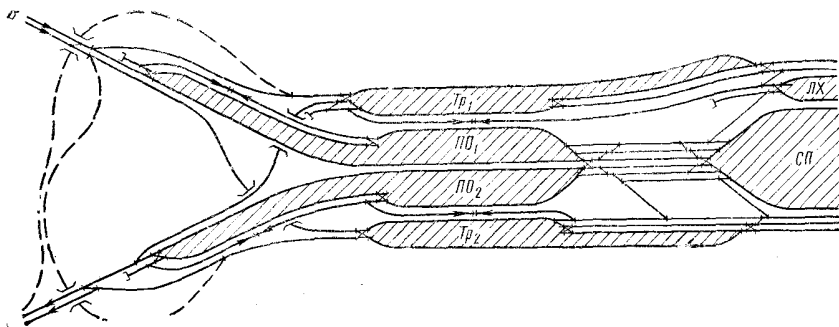


Рис. 12.4. Вариант продольного развития парков приема по направлениям подходов для приема местных поездов и поездов большой массы и длины

Обеспечена также удобная работа по уборке поездных локомотивов с головных частей обоих парков и входной горловины парка  $ПП_2$  в случае приема длинносоставных поездов и при наличии поездного локомотива в хвостовой части поезда. Горочные локомотивы заезжают за короткими поездами в оба парка и за длинносоставными поездами во входную горловину  $ПП_2$  по боковым ходовым путям или свободным путям приема. Для надвига коротких поездов из  $ПП_2$  один из путей парка  $ПП_1$  должен быть свободным. Надвигают два коротких состава из  $ПП_2$  и  $ПП_1$  одновременно, но с предварительным их соединением без возвратных передвижений. Имеются также условия для постоянного использования режима параллельного роспуска составов большой массы и составов обычной длины.

По продольному принципу осуществлено развитие парка отправления: часть путей короткие (в пределах существующей площадки) — парк  $ПО_1$ , и оставшиеся пути удлинены для отправления поездов большой массы —  $ПО_2$ . Эти варианты уже были рассмотрены в схемах распределительно-группировочных станций. На рис. 12.4 приведен вариант продольного развития по направлениям подходов. В этом случае предусмотрены две пары парков прибытия на подходах. Здесь также обеспечен прием поездов большой массы и длины с магистральных направлений и местных поездов обычной длины и массы. Этот вариант тоже может осуществляться с перепланировкой или без перепланировки подходов. Обеспечены высокая надежность и поточность работы по уборке поездных локомотивов и работе горочных локомотивов, параллельный роспуск составов большой массы и длины, а также коротких составов.

На рис. 12.5 приведен фрагмент продольного развития парка отправления по направлению главных путей обоих направлений и продольного развития транзитных парков (одного против направления, второго — по направлению движения в сторону сортировоч-

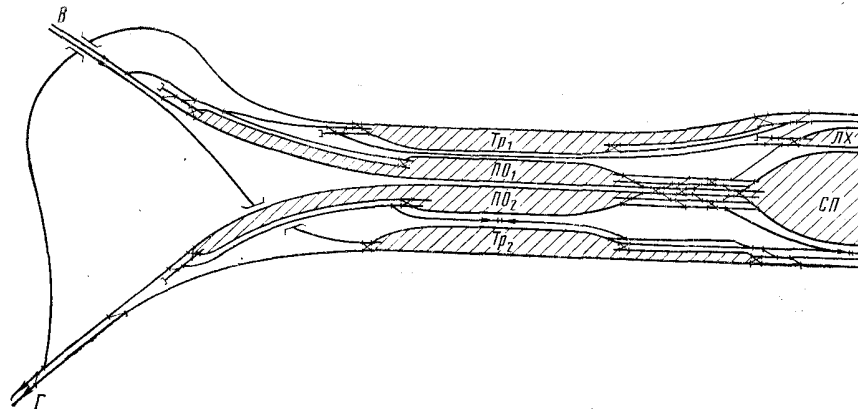


Рис. 12.5. Вариант продольного развития транзитных и отправочных парков по направлениям выходов с односторонней сортировочной станции для отправления и пропуска местных и поездов большой массы и длины

ного парка). При этом можно рассматривать вариант перепланировки подходов или сохранять существующее расположение подходов, но с расширением путепроводов. Созданы условия для подачи локомотивов под поезда большой массы и длины, в том числе в хвостовую часть этих поездов, и под поезда обычной длины. Аналогичные условия имеются и для транзитных поездов.

#### 12.5. Схемы путевого развития сортировочных станций. Стратегии повышения пропускной и перерабатывающей способности

Создание новых и совершенствование существующих схем сортировочных станций должны учитывать достигнутый уровень транспортной техники, технологии станций, объемы их работы и другие требования. В настоящее время разработан ряд вариантов схем сортировочных станций, направленных на рациональную организацию параллельного роспуска составов на горке, создание условий для концентрации работы по подборке вагонов в участковых, сборных, групповых, передаточных поездах и подачах на местные пункты не только по назначениям и группам, но и по фронтам грузовой работы, расположенным на соответствующих станциях, сокращение переработки угловых и повторно сортируемых вагонопотоков. При разработке новых схем сортировочных станций необходимо максимально реализовать принцип поточности выполнения операций, не допускающих возвратных передвижений и перестановок составов. Рассмотрим на примерах схем станций основные направления технической политики, стратегию этапного повышения их эксплуатационной надежности, пропускной и перерабатывающей способности.

Выбор оптимального способа развития сортировочной станции— сложная многовариантная технико-экономическая задача. Ее сложность обуславливает наличие множества стратегий развития (перспективных схем), а также большое количество мер усиления мощности станций, из которых необходимо выбрать наиболее эффективные.

Если рассмотреть все мероприятия, то наиболее эффективные из них — организационно-технические, не требующие дополнительных капитальных затрат. Они могут быть внедрены на **любом** этапе развития сортировочной станции как постоянная технологическая мера, так и в оперативных условиях. Организационно-технические мероприятия относятся к фондосберегающим формам интенсификации работы сортировочной станции. Высокоэффективны такие меры увеличения перерабатывающей способности, как введение дополнительного маневрового локомотива на горках или на вытяжках, строительство второго пути надвига или роспуска, механизация и автоматизация сортировочного процесса и т. д. Как правило, такие меры имеют небольшие сроки окупаемости.

Наиболее капиталоемки мероприятия, предусматривающие принципиальное изменение конструкции сортировочной станции (изменение взаимного расположения парков, строительство новых парков путей, сортировочных устройств и т. д.). Вместе с тем такие мероприятия предусматривают значительное повышение перерабатывающей способности. Переход к конечному состоянию развития сортировочной станции возможен через ряд последовательных шагов (этапов) увеличения ее мощности. Следовательно, одной из задач интенсивного развития станций является также выбор оптимального числа этапов. Максимальное число этапов развития определяет набор возможных мер увеличения перерабатывающей способности сортировочной станции. Минимальное число этапов — один. В общем случае возможно внедрение различных мер на каждом из этапов как по количеству, так и по содержанию. Установление рационального сочетания мер увеличения перерабатывающей способности сортировочной станции — еще одна задача этапного развития. Для практической реализации выбранных решений важны также оптимальные сроки проведения строительных работ.

Следовательно, проблема этапного развития сортировочной станции и повышения ее эксплуатационной надежности включает: выбор стратегии развития станции из множества альтернативных, оптимизацию числа этапов проведения мер увеличения перерабатывающей способности, определение рационального сочетания и очередности мер интенсификации работы станции на каждом этапе, установление оптимальных сроков внедрения мер развития станции.

Эти задачи необходимо решать в рамках одного оптимизационного расчета, выполняемого по каждой альтернативной стратегии. На рис. 12.6 представлены разомкнутые графы вариантов этапного развития станции при двух, трех и четырех мерах увеличения ее

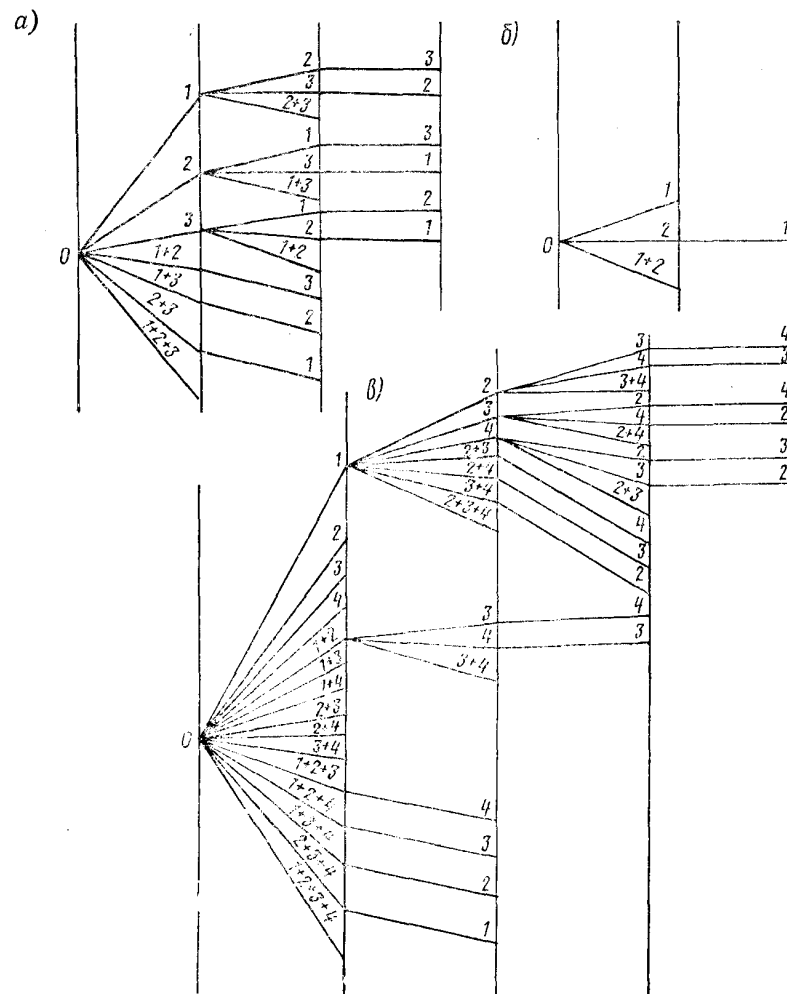


Рис. 12.6. Разомкнутые графы вариантов гоышения пропускной и перерабатывающей способности станций:

а — при двух мерах; б — при трех мерах; в — при четырех мерах

перерабатывающей способности. На графе рис. 12.6, а отражены все возможные варианты трех, двух и одноэтапного развития сортировочной станции. Так, ветвь графа 0—1—2—3 представляет собой вариант трехэтапного развития с вводом на каждом этапе одной меры усиления перерабатывающей способности. Ветвь 0—1—(2+3) — вариант двухэтапного развития, причем на первом этапе вводят меру 1, а на втором — сочетание мер 2 и 3. Приведенный граф вариантов развития сортировочной станции — универсальный для трех мер усиления ее перерабатывающей способности. Такие же графы нетрудно построить для мер развития 2 и 4.

При числе мер более четырех граф вариантов значительно усложняется. Поэтому очень важно проанализировать возможные варианты наращивания мощности сортировочной станции.

В результате анализа возможно значительное уменьшение числа ветвей, для которых необходимо выполнить оптимизационные расчеты.

Выбирают оптимальный вариант развития сортировочной станции по критерию оптимальности, который рассчитывают по каждой ветви графа. При этом устанавливают оптимальные сроки ввода мер.

На рис. 12.7 приведены варианты возможных сроков ввода мероприятий по развитию сортировочной станции. При одноэтапном развитии (рис. 12.7, а) его оптимизацию сводят к нахождению наиболее эффективных сроков ввода мероприятий. Число вариантов сроков ввода мер усиления перерабатывающей способности сортировочной станции может быть достаточно большим при шаге изменения, равном одному году.

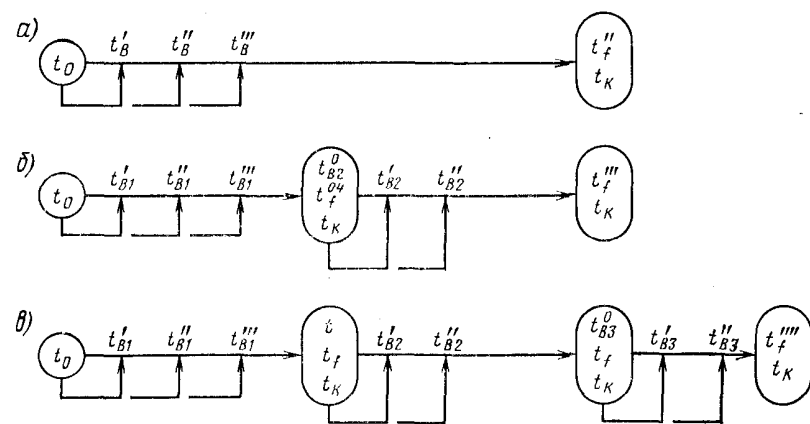


Рис. 12.7. Варианты возможных сроков ввода мер при одно-, двух- и трех-этапном развитии станции

Возможные сроки ввода лежат в области значений

$$t_{в}^n \in [t_0 + t_n; t_f^{cn}], \quad (12.30)$$

где  $t_n$  — время лага строительства планируемого этапа с учетом разработки проектно-технической документации;  $t_f^{cn}$  — максимальный срок, до которого может обеспечивать переработку вагонов существующая станция с учетом внедрения высокоэффективных мер интенсификации ее работы.

При этом  $t_f^{cn}$  может совпадать с конечным сроком перспективного периода  $t_0$ ;  $t_K$ . Следовательно, необходимо рассматривать также вариант развития без проведения коренных реконструктивных мероприятий. Путем расчета всех вариантов выбирают такой, при котором критерий эффективности будет давать наилучшее значение.

При двухэтапном развитии (рис. 12.7, б) возможные сроки ввода мер первого этапа лежат в области значений

$$t_{в1}^n \in [t_0 + t_n; t_f^{cn}], \quad (12.31)$$

а второго этапа

$$t_{в2}^n \in [t_{в2}^0; t_f^{1n}], \quad (12.32)$$

где  $t_{в2}^0$  — начальный срок ввода мер второго этапа, когда потребный объем пропуска вагонопотоков уже совпадает с наличной перерабатывающей способностью существующей станции.

При этом возможны ситуации, когда  $t_f^{cn} = t_K$  или  $t_f^{1n} = t_K$ . В первом случае будет интенсификация работы станции без проведения ее коренной реконструкции, а во втором — рассматривают одноэтапное развитие станции. Аналогичные рассуждения можно привести для трех- и четырехэтапного увеличения перерабатывающей способности сортировочной станции. Таким образом, в течение перспективного периода  $t_0$ ;  $t_K$  в зависимости от темпов роста объема работы наилучшим может быть вариант, предусматривающий неполное развитие станции в рамках одной и той же стратегии.

Выбирают наиболее рациональную стратегию развития станции на основе оптимизационных расчетов. Сравнивают только те стратегии, которые имеют наличную перерабатывающую способность сортировочной станции большую, чем объем пропуска вагонопотоков на конечный срок перспективного периода  $t_0$ ;  $t_K$ .

Наращивание мощности сортировочной станции — это процесс последовательного перевода ее из одного состояния в другое. В качестве управляющих воздействий при этом выступают различные мероприятия по интенсификации работы станции. Эти мероприятия при этапном развитии сортировочной станции должны предусматривать коренное изменение ее схемы. Таким образом, каждое состояние сортировочной станции необходимо рассматривать как ее новое конструктивное решение. Число мер развития зависит от существующей схемы станции (начального состояния) и альтернативной стратегии (конечного состояния).

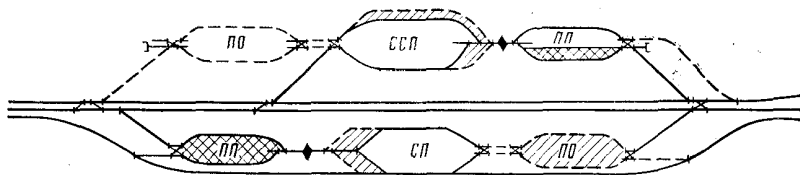


Рис. 12.8. Этапы развития сортировочной станции

В настоящее время на сети железных дорог около 113 сортировочных систем имеют последовательное, а более 50 % — параллельное расположение одного или нескольких парков. Около 31 % систем не имеют специализированных парков отправления. Ряд систем можно развивать в сортировочные станции с последовательным расположением трех парков.

Можно привести примеры последовательностей развития. На рис. 12.8 показаны реализованные этапы развития одной из сортировочных станций. Она имела слабое путевое развитие, четная сортировочная система состояла из маломощного парка прибытия и сортировочно-отправочного парка, в нечетной системе был один парк, который использовали как приемо-отправочный и сортировочный. В связи с ростом нагрузки  $n(t)$  эксплуатационная надежность станции снизилась. Горловины станции были перегружены, часто возникали задержки поездов на подходах, вагоны длительное время простаивали на станции. Маневровую работу, особенно в нечетной системе, выполняли по сложным технологическим схемам, не было возможности ее строго разграничивать с приемом и отправлением поездов.

При развитии станции были осуществлены следующие этапы: первый — увеличение числа путей в соответствии с ростом вагонопотока в четной системе для обеспечения оптимальной надежности приема поездов и сооружение нового парка прибытия в нечетной системе, обеспечение поточно-кольцевой системы работы горочных локомотивов; второй — сооружение нового парка отправления нечетной системы и удлинение сортировочно-отправочных путей четной системы; третий — сооружение нового парка отправления в четной системе, удлинение сортировочных путей нечетной системы.

### 12.6. Пример выбора оптимального развития сортировочной станции

Рассмотрим выбор оптимального развития на основе определения критерия эффективности капитальных вложений по всем последовательностям мер по предложению Г. В. Козлова. По минимальному значению приведенных затрат выбирают оптимальный вариант увеличения пропускной и перерабатывающей способности

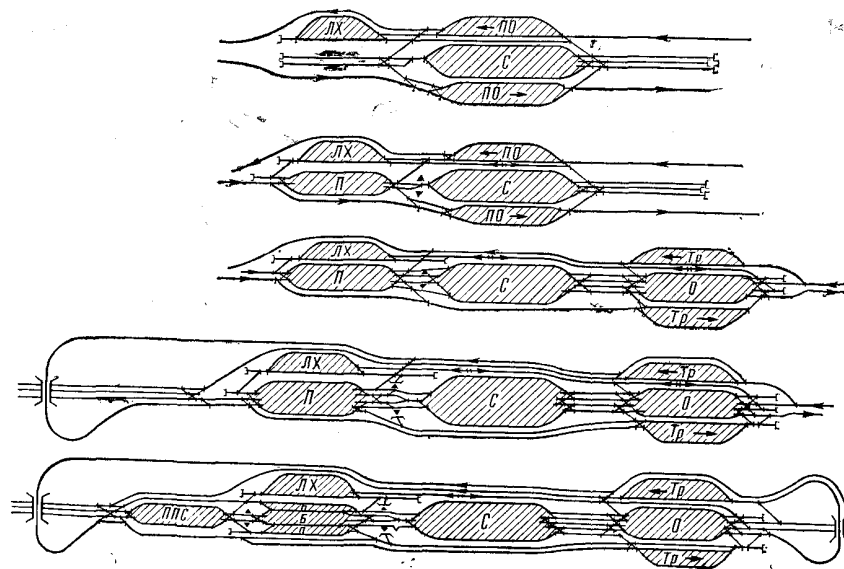


Рис. 12.9. Схемы этапного развития станции

станции. После этого определяют показатель фондоотдачи основных фондов, который характеризует степень их интенсивного использования.

Разработанная теория этапного развития и повышения их эксплуатационной надежности станций позволяет оптимизировать не только перспективные пути наращивания их мощностей, но и планировать количество этапов и сроки проведения реконструктивных мероприятий.

Исходное состояние станции: сортировочная система с параллельно размещенными парками: сортировочным С и приемо-отправочным ПО для четного и нечетного направлений, количество путей в сортировочном парке — 21, в приемо-отправочном — 9 путей для четных и 5 путей для нечетных поездов; немеханизированная горка с двумя вытяжными путями; три вытяжных пути с полезной длиной на состав поезда (рис. 12.9); по два маневровых локомотива работают на горке и вытяжках. Прогнозируемая нагрузка на перспективный период (30 лет) приведена в табл. 12.3. Из таблицы видно, что максимальные среднесуточные размеры движения на конец перспективного периода составят 14 850 вагонов, в том числе 9450 вагонов с переработкой и 5400 вагонов без переработки. При таком темпе роста нагрузки мощность существующих устройств и путевого развития будет достаточна в течение первых двух лет. В последующие годы успешное освоение нагрузки станет возможно при развитии станции в соответствии с ростом размеров движения, и к концу

Таблица 12.3

## Прогнозируемая нагрузка на перспективный период

| Показатели                | Годы  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                           | 1-й   | 2-й   | 3-й   | 4-й   | 5-й   | 6-й   | 7-й   | 8-й   | 9-й   | 10-й  |
| Вагонопоток, вагонов/сут: |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| общий                     | 5620  | 5930  | 6240  | 6560  | 6880  | 7190  | 7520  | 7830  | 8150  | 8460  |
| с переработкой            | 3650  | 3850  | 4040  | 4240  | 4450  | 4650  | 4860  | 5050  | 5250  | 5450  |
| без переработки           | 1970  | 2080  | 2200  | 2320  | 2430  | 2540  | 2660  | 2780  | 2900  | 3010  |
| Поездопоток, поездов/сут: |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| общий                     | 112   | 119   | 125   | 131   | 138   | 144   | 150   | 157   | 163   | 169   |
| с переработкой            | 73    | 77    | 81    | 85    | 89    | 93    | 97    | 101   | 105   | 109   |
| без переработки           | 39    | 42    | 44    | 46    | 49    | 51    | 53    | 56    | 58    | 60    |
| состав поезда, вагонов    | 50    | 50    | 50    | 50    | 50    | 50    | 50    | 50    | 50    | 50    |
| число назначений          | 17    | 17    | 17    | 17    | 17    | 19    | 19    | 19    | 19    | 19    |
| Вагонопоток, вагонов/сут: |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| общий                     | 8880  | 9200  | 9510  | 9830  | 9940  | 9470  | 9790  | 9100  | 9420  | 9740  |
| с переработкой            | 5650  | 5860  | 6050  | 6250  | 5440  | 5650  | 5850  | 5040  | 5240  | 5440  |
| без переработки           | 3230  | 3340  | 3460  | 3580  | 3700  | 3820  | 3940  | 4080  | 4180  | 4300  |
| Поездопоток, поездов/сут: |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| общий                     | 161   | 16    | 173   | 179   | 184   | 190   | 196   | 202   | 208   | 213   |
| с переработкой            | 102   | 107   | 110   | 114   | 117   | 121   | 125   | 128   | 132   | 135   |
| без переработки           | 59    | 60    | 63    | 65    | 67    | 69    | 71    | 74    | 76    | 78    |
| состав поезда, вагонов    | 55    | 55    | 55    | 55    | 55    | 55    | 55    | 55    | 55    | 55    |
| число назначений          | 21    | 21    | 21    | 21    | 21    | 23    | 23    | 23    | 23    | 23    |
| Вагонопоток, вагонов/сут: |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| общий                     | 12060 | 12370 | 12690 | 13000 | 13110 | 13610 | 13920 | 14230 | 14540 | 14850 |
| с переработкой            | 7650  | 7850  | 8060  | 8260  | 8460  | 8650  | 8850  | 9050  | 9250  | 9450  |
| без переработки           | 4410  | 4520  | 4630  | 4740  | 4650  | 4960  | 5070  | 5180  | 5290  | 5400  |
| Поездопоток, поездов/сут: |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| общий                     | 201   | 206   | 212   | 217   | 222   | 227   | 232   | 237   | 242   | 248   |
| с переработкой            | 128   | 131   | 134   | 138   | 141   | 144   | 148   | 151   | 154   | 158   |
| без переработки           | 73    | 75    | 78    | 79    | 81    | 83    | 84    | 86    | 88    | 90    |
| состав поезда, вагонов    | 60    | 60    | 60    | 60    | 60    | 60    | 60    | 60    | 60    | 60    |
| число назначений          | 25    | 25    | 25    | 25    | 25    | 27    | 27    | 27    | 27    | 27    |

периода станция должна перейти к схеме с мощными техническими устройствами и путевым развитием.

Решение задачи начинают с разработки стратегий и схем этапного увеличения пропускной и перерабатывающей способности. В примере рассмотрена одна стратегия — развитие в четырехпарковую станцию. Особенность такой схемы — повышение перерабатывающей способности за счет применения параллельного роспус-

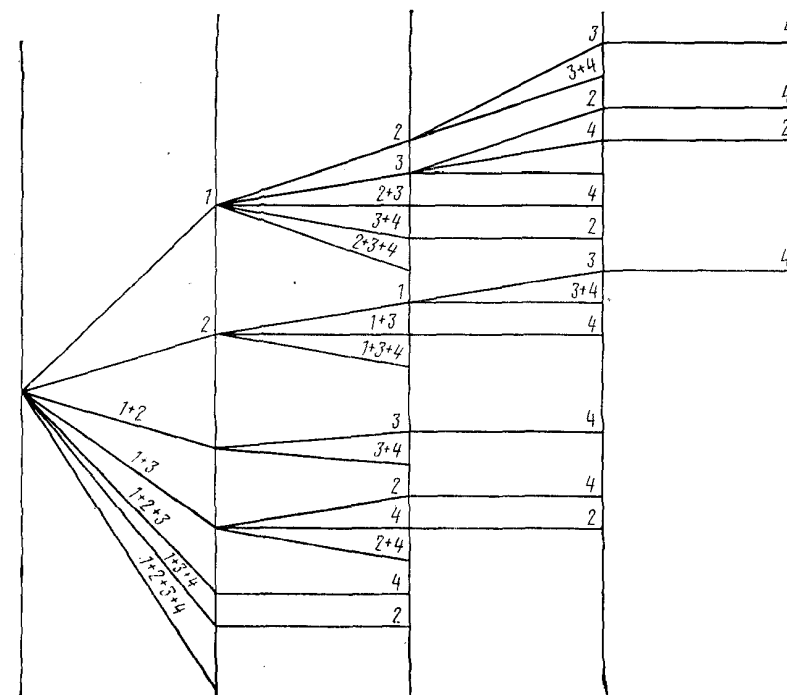


Рис. 12.10. Расчетный граф вариантов развития станции при четырех мерах

ка и предварительной сортировки перерабатываемого вагонопотока.

Перейти к конечному состоянию станции можно в один или несколько этапов, число которых определяет количество мер развития. Мера развития в рамках одного этапа связана со значительным изменением схемы станции и обеспечивает существенный прирост ее пропускной и перерабатывающей способности. В данном примере приняты следующие меры развития (см. рис. 12.9):

строительство парка приема по направлению последовательной переработки вагонопотока;

строительство парка отправления;

реконструкция горки под параллельный роспуск;

строительство дополнительного сортировочного комплекта.

При чередовании последовательности ввода этих мер и их сочетаний развитие станции может быть осуществлено по 74 вариантам. Однако из принятых в примере возможных вариантов не все рациональные. К ним относят реконструкцию горки для параллельного роспуска до строительства парка приема. Такой вариант не дает значительного увеличения перерабатывающей способности горки.

Кроме того, к нерациональному варианту относят ввод четвертой меры (строительство дополнительного сортировочного комплекса) до первой и третьей мер (строительство парка приема и реконструкция горки под параллельный роспуск).

Таким образом, логическим анализом исключают нерациональные сочетания мер развития. Сокращенный (расчетный) граф вариантов при четырех мерах развития показан на рис. 12.10. В этом случае задачу сводят к сравнению только 20 вариантов этапного развития.

Следующий шаг решения задачи — оптимизация развития по каждой ветви графа, расчет приведенных затрат и выбор оптимального варианта. Рассмотрим порядок расчетов по первой ветви графа — четырехэтапному развитию при последовательности ввода мер 1—2—3—4.

На рис. 12.9 показаны схемы постепенного изменения состояния станции. На первом этапе станцию переустраивают по комбинированной схеме: парк приема расположен последовательно, а парк отправления — параллельно сортировочному. На втором и третьем — станция с последовательным расположением парков, причем во втором случае на горке возможен параллельный роспуск. По-

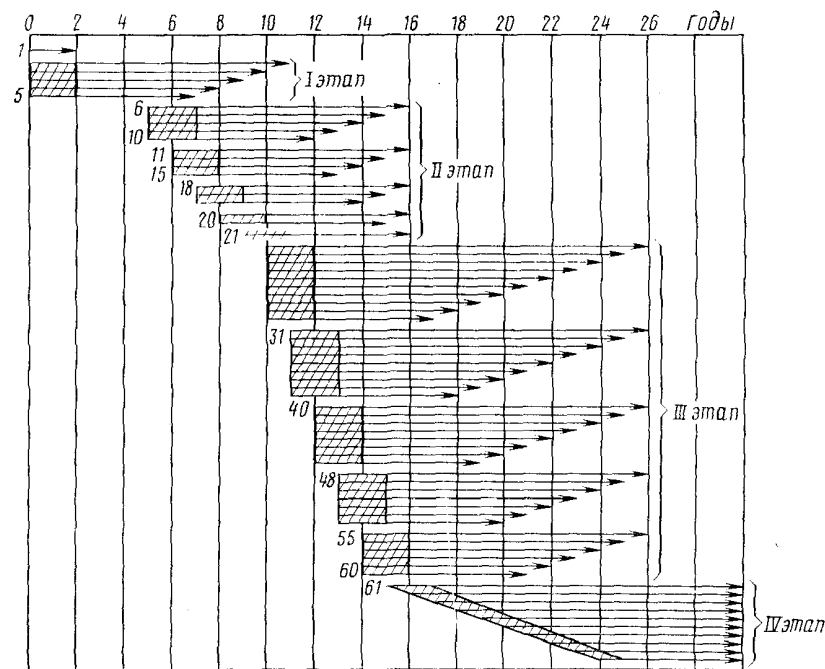


Рис. 12.11. Периоды работы сортировочной станции по срокам ввода мер

# Внутриэтапная оптимизация технологии и путевого

| Наименование |                   | Годы                                           |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|--------------|-------------------|------------------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|              |                   | 1                                              | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| Схема I      | Горка             | Однопутная                                     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|              | Число локомотивов |                                                |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|              | Горка             |                                                |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|              | ВФ                |                                                |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|              | Число путей       |                                                |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|              |                   | С                                              | 21 | 21 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|              |                   | ПО <sub>чет</sub>                              | 9  | 9  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|              |                   | ПО <sub>нч</sub>                               | 5  | 5  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|              |                   | I этап                                         |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Горка        |                   | Механизированная однопутная автоматизированная |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Схема II     | Число локомотивов | Горка                                          | 2  | 2  | 2  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  |
|              | ВФ                |                                                | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  |
|              | Число путей       | П                                              | 7  | 7  | 7  | 8  | 8  | 9  | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
|              | С                 |                                                | 21 | 21 | 21 | 23 | 23 | 23 | 23 | 24 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 |
|              | ПО <sub>чет</sub> |                                                | 7  | 7  | 8  | 8  | 8  | 9  | 9  | 9  | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
|              |                   | ПО <sub>нч</sub>                               | 4  | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | 6  | 6  | 6  | 6  | 6  | 6  | 6  |
|              |                   | II этап                                        |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Горка        |                   | Двухпутная автоматизированная                  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Схема III    | Число локомотивов | Горка                                          | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  |
|              | ВФ                |                                                | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  |
|              | Число путей       | П                                              | 9  | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 11 | 12 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 |
|              | С                 |                                                | 23 | 23 | 24 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 27 | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 |
|              | О                 |                                                | 7  | 7  | 8  | 8  | 8  | 8  | 8  | 8  | 9  | 9  | 9  | 9  | 9  | 9  | 9  |
|              |                   | ТР <sub>чет</sub>                              | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  |
|              |                   | ТР <sub>нч</sub>                               | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  |

Таблица 12.4

развития станции на перспективный период развития

| Наименование |                   |                   | Годы                                                        |    |                                                                        |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |         |    |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |          |  |  |
|--------------|-------------------|-------------------|-------------------------------------------------------------|----|------------------------------------------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---------|----|----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|----------|--|--|
|              |                   |                   |                                                             |    |                                                                        |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |         |    |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |          |  |  |
|              |                   |                   | 14                                                          | 15 | 16                                                                     | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29      | 30 | 31 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |          |  |  |
| Горка        |                   |                   | Автоматизированная, четыре пути надвига и три пути роспуска |    |                                                                        |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |         |    |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | III этап |  |  |
| Схема IV     | Число локомотивов | Горка             |                                                             | 3  | 3                                                                      | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4       | 4  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |          |  |  |
|              |                   | ВФ                |                                                             | 4  | 4                                                                      | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4       | 4  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |          |  |  |
|              | Число путей       | П                 |                                                             | 8  | 8                                                                      | 8  | 8  | 9  | 9  | 10 | 11 | 12 | 12 | 12 | 13 | 14 | 15 |         |    |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |          |  |  |
|              |                   | С                 |                                                             | 28 | 28                                                                     | 28 | 30 | 30 | 31 | 31 | 32 | 34 | 34 | 35 | 35 | 36 | 38 |         |    |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |          |  |  |
|              |                   | О                 |                                                             | 8  | 9                                                                      | 9  | 9  | 19 | 19 | 19 | 11 | 11 | 12 | 12 | 13 | 13 | 14 |         |    |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |          |  |  |
|              |                   | ТР <sub>чет</sub> |                                                             | 3  | 3                                                                      | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  |         |    |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |          |  |  |
|              |                   | ТР <sub>печ</sub> |                                                             | 3  | 3                                                                      | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | IV этап |    |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |          |  |  |
|              |                   | Горка             |                                                             |    | Двухпутная автоматизированная, четыре пути надвига и три пути роспуска |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |         |    |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |          |  |  |
| Схема V      | Число локомотивов | Горка             |                                                             | 5  | 5                                                                      | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | 6  | 6  | 6  | 6  | 6  | 6  | 6       |    |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |          |  |  |
|              |                   | ВФ                |                                                             | 4  | 4                                                                      | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 5  | 5  | 5       |    |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |          |  |  |
|              | Число путей       | ППС               |                                                             | 6  | 6                                                                      | 6  | 6  | 6  | 7  | 7  | 7  | 7  | 8  | 8  | 9  | 9  | 10 |         |    |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |          |  |  |
|              |                   | П                 |                                                             | 4  | 4                                                                      | 5  | 5  | 5  | 5  | 6  | 6  | 6  | 7  | 7  | 7  | 8  |    |         |    |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |          |  |  |
|              |                   | Б                 |                                                             | 7  | 7                                                                      | 7  | 8  | 8  | 8  | 8  | 9  | 9  | 9  | 10 | 10 | 10 |    |         |    |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |          |  |  |
|              |                   | С                 |                                                             | 29 | 29                                                                     | 30 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 34 | 34 | 35 | 35 | 36 |    |         |    |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |          |  |  |
|              |                   | О                 |                                                             | 10 | 10                                                                     | 11 | 11 | 12 | 12 | 13 | 13 | 14 | 14 | 15 | 15 | 16 |    |         |    |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |          |  |  |
|              |                   | ТР <sub>чет</sub> |                                                             | 4  | 4                                                                      | 4  | 4  | 4  | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | 6  | 6  |         |    |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |          |  |  |
|              |                   | ТР <sub>печ</sub> |                                                             | 4  | 4                                                                      | 4  | 4  | 4  | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | 6  | 6  |         |    |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |          |  |  |

следнее состояние — это четырехпарковая станция по схеме проф. К. А. Бернгарда с дополнительным сортировочным комплектом.

На рис. 12.11 в виде линий на оси времени показаны возможные периоды работы станции на каждом этапе. Каждая линия характеризует два периода: ввод меры (принимаем лаг строительства, равный 2 годам) и освоение нагрузки. Составляют такую схему исходя из того, что строительство нового устройства проходит в последние два года действия предыдущей меры, а освоение нагрузки заканчивается с окончанием строительных работ последующей меры. Например, на первом этапе парк приема строят в первые 2 года, после чего в новом состоянии станция может находиться до 7—11 лет в зависимости от того, когда произойдет переход к следующей схеме (минимальный период действия меры должен быть не менее 5 лет). Число вариантов 5. На втором этапе начало реконструкции может быть в период с 5-го по 9-й годы, т.е. к окончанию срока одного из вариантов первого этапа и т.д. На четвертом этапе действие меры ограничивается последним годом перспективного периода. Следующий элемент оптимизации развития — разработка технологии и расчет соответствующего ей путевого развития. Эту задачу решают для каждой схемы станции на каждом этапе.

На ЭВМ ЕС-1022 по программе, разработанной на кафедре «Управление эксплуатационной работой» БелИИЖТа, выполнены расчеты по внутриэтапной оптимизации технологии работы сортировочной станции на весь период перспективного развития. Как видно из табл. 12.4, на первом этапе развития для достижения оптимальной технологии необходимо с начала этапа иметь однопутную механизированную горку с двумя путями надвига, два локомотива на горке и три на вытяжных путях, к 5-му году должна быть реконструирована в двухпутную, автоматизированную и с 6-го года необходимо ввести третий горочный маневровый локомотив. На втором этапе изменение состояния горки не предусматривают, на вытяжных путях с 13-го года необходимо дополнительно эксплуатировать четвертый маневровый локомотив. На третьем этапе горка имеет четыре пути надвига и три пути роспуска, с 15-го года на горке эксплуатируют четыре локомотива. На последнем этапе предварительную горку реконструируют в двухпутную автоматизированную с пятью локомотивами на горке с начала этапа и шестью — с 25-го года эксплуатации. На вытяжных путях с 28-го года эксплуатации необходимо ввести пятый локомотив.

После расчетов по внутриэтапной оптимизации обосновывают сроки ввода мер и выбирают число этапов и стратегию развития станции. Рассмотрим пример расчета сроков ввода мер по первой ветви графа (рис. 12.10), т.е. по одному из вариантов этапного развития (1—2—3—4) в рамках одной стратегии развития.

На первом этапе по варианту 5 (см. рис. 12.11) укладывают 8 прямо-отправочных путей с общей длиной 8,85 км. При стоимости укладки 1 км пути 250 тыс. руб. (с учетом земляных работ, искусственных сооружений и др.) капитальные затраты составят 2212 тыс.

руб. Кроме того, укладка 26 стрелочных переводов при стоимости одного комплекта 10,8 тыс. руб. (с учетом включения перевода в ЭЦ) требует затрат 280 тыс. руб. Укладка двух сортировочных путей с общей длиной 2,5 км при стоимости укладки 1 км пути 90 тыс. руб. обойдется в 225 тыс. руб., а четырех стрелочных переводов в сортировочном парке — в 43 тыс. руб.

Кроме того, в варианте необходимы капитальные вложения: на механизацию сортировочной горки — 1000 тыс. руб., строительство второго пути роспуска и ввод средств автоматизации на горке — 2000 тыс. руб.

Выполнять эти работы целесообразно в два периода: строительство парка приема и механизация сортировочной горки, реконструкция горки и укладка дополнительных путей в сортировочном парке.

Тогда при первом сроке ввода будут суммарные затраты  $K = 2212 + 280 + 1000 = 3492$  тыс. руб., при втором сроке —  $K = 2000 + 226 + 43 = 2268$  тыс. руб.

При переходе ко второму этапу на 6—7-м годах и действии меры до 16-го года (вариант 6, рис. 12.11) необходимо уложить 5 путей в парке приема и построить транзитные и отправочные парки на 17 путей. Емкость сортировочного парка возрастает за счет уже существующих путей в приемо-отправочных парках. Общий объем работы составит 24,5 км пути и 64 стрелочных перевода, а стоимость  $K = 24,5 \cdot 250 + 64 \cdot 10,8 = 6816$  тыс. руб.

На третьем этапе усиления путевого развития станции из-за длительного периода действия увеличивать число путей в парках следует в несколько сроков. Это обеспечит сокращение приведенных затрат за счет отдаления капитальных вложений. При развитии по варианту 21 были определены два внутриэтапных срока ввода путевого развития. По первому сроку в отправочном и транзитном парках дополнительно укладывают 4 пути (4,4 км) и 9 стрелочных переводов, реконструируют горку на три пути роспуска и четыре пути надвига, увеличивают число сортировочных путей за счет освобожденных приемо-отправочных путей. По второму сроку дополнительно укладывают 11 приемо-отправочных путей (12,1 км) и 26 стрелочных переводов, два сортировочных пути (2,4 км) и 4 стрелочных перевода. Капитальные затраты на первом сроке  $4,4 \cdot 250 + 10,8 \cdot 9 + 2500 = 3697$  тыс. руб., на втором —  $12,1 \cdot 250 + 26 \cdot 10,8 + 2,4 \cdot 250 + 4 \cdot 10,8 = 3949$  тыс. руб.

Расчеты капитальных затрат по остальным вариантам (периодам существования станции на этапе) приведены в табл. 12.5. Например, по варианту 40 капитальные затраты будут введены в два срока: 13—14-й годы — 3709 тыс. руб. и 19—20-й годы — 3089 тыс. руб.

Эксплуатационные расходы по вариантам на каждом году эксплуатации приведены в табл. 12.6. Для каждого варианта были определены эксплуатационные расходы, состоящие из двух частей: расходов на содержание вводимых устройств и расходов, зависящих от величины простоев и числа маневровых локомотивов. На-

Таблица 12.5  
Капитальные затраты по срокам ввода, тыс. руб.

| Вари-<br>ант | Годы |      |   |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|--------------|------|------|---|------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----|----|----|----|------|----|----|----|----|----|----|--|
|              | 2    | 3    | 4 | 5    | 6 | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   | 16 | 17 | 18 | 19 | 20   | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 |  |
| I этап       | 1    | 5315 |   | 3248 |   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 2    | 4574 |   | 2694 |   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 3    | 4317 |   | 2268 |   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 4    | 4035 |   | 2268 |   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 5    | 3492 |   | 2268 |   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
| II этап      | 6    |      |   |      |   | 6816 |      |      |      |      |      |      |      |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 7    |      |   |      |   | 6520 |      |      |      |      |      |      |      |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 8    |      |   |      |   | 5620 |      |      |      |      |      |      |      |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 9    |      |   |      |   | 5027 |      |      |      |      |      |      |      |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 10   |      |   |      |   | 5027 |      |      |      |      |      |      |      |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 11   |      |   |      |   |      | 6282 |      |      |      |      |      |      |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 12   |      |   |      |   |      | 5986 |      |      |      |      |      |      |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 13   |      |   |      |   |      | 5086 |      |      |      |      |      |      |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 14   |      |   |      |   |      | 4482 |      |      |      |      |      |      |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 15   |      |   |      |   |      |      | 5711 |      |      |      |      |      |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 16   |      |   |      |   |      |      | 5415 |      |      |      |      |      |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 17   |      |   |      |   |      |      | 4515 |      |      |      |      |      |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 18   |      |   |      |   |      |      |      | 5711 |      |      |      |      |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 19   |      |   |      |   |      |      |      | 5415 |      |      |      |      |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 20   |      |   |      |   |      |      |      |      | 5711 |      |      |      |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
| III этап     | 21   |      |   |      |   |      |      |      |      |      | 3697 |      |      |      |    |    |    |    | 3949 |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 22   |      |   |      |   |      |      |      |      |      | 3697 |      |      |      |    |    |    |    | 2712 |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 23   |      |   |      |   |      |      |      |      |      | 3401 |      |      |      |    |    |    |    | 2701 |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 24   |      |   |      |   |      |      |      |      |      | 3401 |      |      |      |    |    |    |    | 2130 |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 25   |      |   |      |   |      |      |      |      |      | 3401 |      |      |      |    |    |    |    | 1561 |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 26   |      |   |      |   |      |      |      |      |      | 4666 |      |      |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 27   |      |   |      |   |      |      |      |      |      | 4370 |      |      |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 28   |      |   |      |   |      |      |      |      |      | 3897 |      |      |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 29   |      |   |      |   |      |      |      |      |      | 3401 |      |      |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 30   |      |   |      |   |      |      |      |      |      | 3401 |      |      |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 31   |      |   |      |   |      |      |      |      |      |      | 4312 |      |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 32   |      |   |      |   |      |      |      |      |      |      | 3697 |      |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 33   |      |   |      |   |      |      |      |      |      |      | 3697 |      |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 34   |      |   |      |   |      |      |      |      |      |      | 3401 |      |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 35   |      |   |      |   |      |      |      |      |      |      | 4895 |      |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 36   |      |   |      |   |      |      |      |      |      |      | 4620 |      |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 37   |      |   |      |   |      |      |      |      |      |      | 4357 |      |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 38   |      |   |      |   |      |      |      |      |      |      | 3697 |      |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 39   |      |   |      |   |      |      |      |      |      |      | 3401 |      |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 40   |      |   |      |   |      |      |      |      |      |      |      | 3709 |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 41   |      |   |      |   |      |      |      |      |      |      |      | 3709 |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 42   |      |   |      |   |      |      |      |      |      |      |      | 3401 |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 43   |      |   |      |   |      |      |      |      |      |      |      | 4850 |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 44   |      |   |      |   |      |      |      |      |      |      |      | 4301 |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 45   |      |   |      |   |      |      |      |      |      |      |      | 4005 |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 46   |      |   |      |   |      |      |      |      |      |      |      | 3709 |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 47   |      |   |      |   |      |      |      |      |      |      |      | 3401 |      |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 48   |      |   |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      | 3104 |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 49   |      |   |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      | 3104 |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 50   |      |   |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      | 4539 |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |
|              | 51   |      |   |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      | 3980 |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |  |

| Вариант | Годы |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |    |      |  |
|---------|------|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|----|------|--|
|         | 2    | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15   | 16   | 17   | 18   | 19   | 20    | 21    | 22    | 23    | 24    | 25 | 26   |  |
| 52      |      |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    | 3400 |      |      |      |      |       |       |       |       |       |    |      |  |
| 53      |      |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    | 3104 |      |      |      |      |       |       |       |       |       |    |      |  |
| 54      |      |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    | 3104 |      |      |      |      |       |       |       |       |       |    |      |  |
| 55      |      |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |      | 3104 |      |      |      | 2345  |       |       |       |       |    |      |  |
| 56      |      |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |      | 4572 |      |      |      |       |       |       |       |       |    |      |  |
| 57      |      |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |      | 4276 |      |      |      |       |       |       |       |       |    |      |  |
| 58      |      |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |      | 3980 |      |      |      |       |       |       |       |       |    |      |  |
| 59      |      |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |      | 3421 |      |      |      |       |       |       |       |       |    |      |  |
| 60      |      |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |      | 3104 |      |      |      |       |       |       |       |       |    |      |  |
| 61      |      |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |      |      | 9486 |      |      |       |       |       |       |       |    | 4142 |  |
| 62      |      |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |      |      | 9357 |      |      |       |       |       |       |       |    | 4142 |  |
| 63      |      |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |      |      |      | 9281 |      |       |       |       |       |       |    | 3777 |  |
| 64      |      |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |      |      |      |      | 8591 |       |       |       |       |       |    | 3777 |  |
| 65      |      |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |      |      |      |      |      | 11825 |       |       |       |       |    |      |  |
| 66      |      |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |      |      |      |      |      |       | 11529 |       |       |       |    |      |  |
| 67      |      |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |      |      |      |      |      |       |       | 10818 |       |       |    |      |  |
| 68      |      |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |      |      |      |      |      |       |       |       | 10225 |       |    |      |  |
| 69      |      |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |      |      |      |      |      |       |       |       |       | 10133 |    |      |  |
| 70      |      |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |    | 9195 |  |

пример, при развитии станции по варианту 5 (см. рис. 12.11) на 7-м году эксплуатационные расходы на содержание введенных устройств составят:

расходная ставка на содержание 1 км прямо-отправочного пути 3,24 тыс. руб./год, станционного — 2,34 тыс. руб./год —  $8,85 \times \times 3,24 + 2,5 \cdot 2,34 = 34,5$  тыс. руб.;

расходная ставка на содержание 1 стрелочного перевода 1,34 тыс. руб./год —  $30 \cdot 1,34 = 40,2$  тыс. руб./год;

содержание сортировочной горки — 214 тыс. руб./год.

Эксплуатационные расходы, связанные с содержанием маневровых локомотивов, будут равны: при пяти локомотивах —  $5 \times \times 120 \cdot 365 = 219$  тыс. руб./год; при шести локомотивах —  $6 \cdot 120 \cdot 365 = 262$  тыс. руб./год.

Средний простой вагона на станции рассчитан методом моделирования на ЭВМ ЕС-1022 и составил 3,34 ч. При стоимости 1 вагона-ч простоя 0,4 руб. расходы составят  $3,34 \cdot 7520 \cdot 0,4 \cdot 365 = = 3667$  тыс. руб./год.

Тогда общие эксплуатационные расходы на седьмом году эксплуатации составят  $34,5 + 40,2 + 214 + 262 + 3667 = = 4218$  тыс. руб./год.

Аналогично были рассчитаны эксплуатационные расходы по остальным годам эксплуатации. Таким образом, по варианту 5 эксплуатационные расходы равны: 3570 тыс. руб./год (3-й год), 3711 тыс. руб./год (4-й год), 3903 тыс. руб./год (5-й год), 4057 тыс. руб./год (6-й год), 4218 тыс. руб./год (7-й год).

## Эксплуатационные затраты

| Этап | Годы |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |  |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|--|
|      | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   |  |  |
| I    | 3593 | 3734 | 3947 | 4101 | 4262 | 4390 | 4534 | 4671 | 4860 |      |      |      |      |  |  |
|      | 3690 | 3731 | 3930 | 4084 | 4245 | 4373 | 4517 | 4654 |      |      |      |      |      |  |  |
|      | 3588 | 3729 | 3921 | 4075 | 4236 | 4364 | 4508 |      |      |      |      |      |      |  |  |
|      | 3582 | 3723 | 3915 | 4069 | 4230 | 4358 |      |      |      |      |      |      |      |  |  |
|      | 3570 | 3711 | 3903 | 4057 | 4218 |      |      |      |      |      |      |      |      |  |  |
| II   |      |      |      |      |      | 4821 | 4953 | 5079 | 5269 | 5397 | 5575 | 5712 | 5846 |  |  |
|      |      |      |      |      |      | 4815 | 4947 | 5073 | 5263 | 5391 | 5569 | 5706 | 5840 |  |  |
|      |      |      |      |      |      | 4795 | 4927 | 5053 | 5243 | 5371 | 5549 | 5686 |      |  |  |
|      |      |      |      |      |      | 4783 | 4915 | 5041 | 5231 | 5359 | 5537 |      |      |  |  |
|      |      |      |      |      |      | 4739 | 4871 | 5187 | 5187 | 5315 |      |      |      |  |  |
| III  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 5679 | 5816 | 6037 |  |  |
|      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 5672 | 5809 | 6030 |  |  |
|      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 5664 | 5801 | 6022 |  |  |
|      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 5656 | 5793 | 6014 |  |  |
|      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 5656 | 5793 | 6014 |  |  |
| IV   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 5867 | 6057 |  |  |
|      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 6044 |  |  |

При развитии станции по варианту 40 (рис. 12.11) годовые эксплуатационные расходы в тыс. руб. будут: 6057 (15-й год), 6178 (16-й год), 6314 (17-й год), 6444 (18-й год), 6578 (19-й год), 6711 (20-й год), 6843 (21-й год), 7020 (22-й год), 7150 (23-й год), 7294 (24-й год), 7417 (25-й год) и 7556 (26-й год).

Критерий экономической эффективности вариантов развития станции — минимум приведенных к одному году капитальных вложений и эксплуатационных расходов. На первом этапе при развитии станции по варианту 5 приведенные затраты  $\frac{3492}{2} (1 + 0,926) + 3570 \cdot 0,858 + 3711 \cdot 0,797 + 2268 \cdot 0,797 + + 3903 \cdot 0,735 + 4057 \cdot 0,681 + 4218 \cdot 0,63 = 19\,376$  тыс. руб./год.

Расчеты приведенных затрат по остальным вариантам даны в табл. 12.7.

После определения приведенных затрат начинаем процесс оптимизации. Эту задачу решаем методом динамического программирования. На его основе оптимизацию проводим поэтапно от конца развития к началу.

### Расчетная таблица сравнительной экономической эффективности

| Наимено-<br>вание<br>затрат | Сумма |
|-----------------------------|-------|
| 1                           | 2     |
| 3                           | 4     |
| 5                           | 6     |
| 7                           | 8     |
| 9                           | 10    |
| 11                          | 12    |
| 13                          | 14    |
| 15                          | 16    |
| 17                          | 18    |
| 19                          | 20    |
| 21                          | 22    |
| 23                          | 24    |
| 25                          | 26    |
| 27                          | 28    |
| 29                          | 30    |
| 31                          | 32    |
| 33                          | 34    |
| 35                          | 36    |
| 37                          | 38    |
| 39                          | 40    |
| 41                          | 42    |
| 43                          | 44    |
| 45                          | 46    |
| 47                          | 48    |
| 49                          | 50    |
| 51                          | 52    |
| 53                          | 54    |
| 55                          | 56    |
| 57                          | 58    |
| 59                          | 60    |
| 61                          | 62    |
| 63                          | 64    |
| 65                          | 66    |
| 67                          | 68    |
| 69                          | 70    |
| 71                          | 72    |
| 73                          | 74    |
| 75                          | 76    |
| 77                          | 78    |
| 79                          | 80    |
| 81                          | 82    |
| 83                          | 84    |
| 85                          | 86    |
| 87                          | 88    |
| 89                          | 90    |
| 91                          | 92    |
| 93                          | 94    |
| 95                          | 96    |
| 97                          | 98    |
| 99                          | 100   |
| 101                         | 102   |
| 103                         | 104   |
| 105                         | 106   |
| 107                         | 108   |
| 109                         | 110   |
| 111                         | 112   |
| 113                         | 114   |
| 115                         | 116   |
| 117                         | 118   |
| 119                         | 120   |
| 121                         | 122   |
| 123                         | 124   |
| 125                         | 126   |
| 127                         | 128   |
| 129                         | 130   |
| 131                         | 132   |
| 133                         | 134   |
| 135                         | 136   |
| 137                         | 138   |
| 139                         | 140   |
| 141                         | 142   |
| 143                         | 144   |
| 145                         | 146   |
| 147                         | 148   |
| 149                         | 150   |
| 151                         | 152   |
| 153                         | 154   |
| 155                         | 156   |
| 157                         | 158   |
| 159                         | 160   |
| 161                         | 162   |
| 163                         | 164   |
| 165                         | 166   |
| 167                         | 168   |
| 169                         | 170   |
| 171                         | 172   |
| 173                         | 174   |
| 175                         | 176   |
| 177                         | 178   |
| 179                         | 180   |
| 181                         | 182   |
| 183                         | 184   |
| 185                         | 186   |
| 187                         | 188   |
| 189                         | 190   |
| 191                         | 192   |
| 193                         | 194   |
| 195                         | 196   |
| 197                         | 198   |
| 199                         | 200   |
| 201                         | 202   |
| 203                         | 204   |
| 205                         | 206   |
| 207                         | 208   |
| 209                         | 210   |
| 211                         | 212   |
| 213                         | 214   |
| 215                         | 216   |
| 217                         | 218   |
| 219                         | 220   |
| 221                         | 222   |
| 223                         | 224   |
| 225                         | 226   |
| 227                         | 228   |
| 229                         | 230   |
| 231                         | 232   |
| 233                         | 234   |
| 235                         | 236   |
| 237                         | 238   |
| 239                         | 240   |
| 241                         | 242   |
| 243                         | 244   |
| 245                         | 246   |
| 247                         | 248   |
| 249                         | 250   |
| 251                         | 252   |
| 253                         | 254   |
| 255                         | 256   |
| 257                         | 258   |
| 259                         | 260   |
| 261                         | 262   |
| 263                         | 264   |
| 265                         | 266   |
| 267                         | 268   |
| 269                         | 270   |
| 271                         | 272   |
| 273                         | 274   |
| 275                         | 276   |
| 277                         | 278   |
| 279                         | 280   |
| 281                         | 282   |
| 283                         | 284   |
| 285                         | 286   |
| 287                         | 288   |
| 289                         | 290   |
| 291                         | 292   |
| 293                         | 294   |
| 295                         | 296   |
| 297                         | 298   |
| 299                         | 300   |
| 301                         | 302   |
| 303                         | 304   |
| 305                         | 306   |
| 307                         | 308   |
| 309                         | 310   |
| 311                         | 312   |
| 313                         | 314   |
| 315                         | 316   |
| 317                         | 318   |
| 319                         | 320   |
| 321                         | 322   |
| 323                         | 324   |
| 325                         | 326   |
| 327                         | 328   |
| 329                         | 330   |
| 331                         | 332   |
|                             |       |

[illegible]

На третьем этапе оптимизации получаем один вариант, имеющий минимальные суммарные затраты по второму, третьему и чет-

развития станции по четырехэтапному развитию

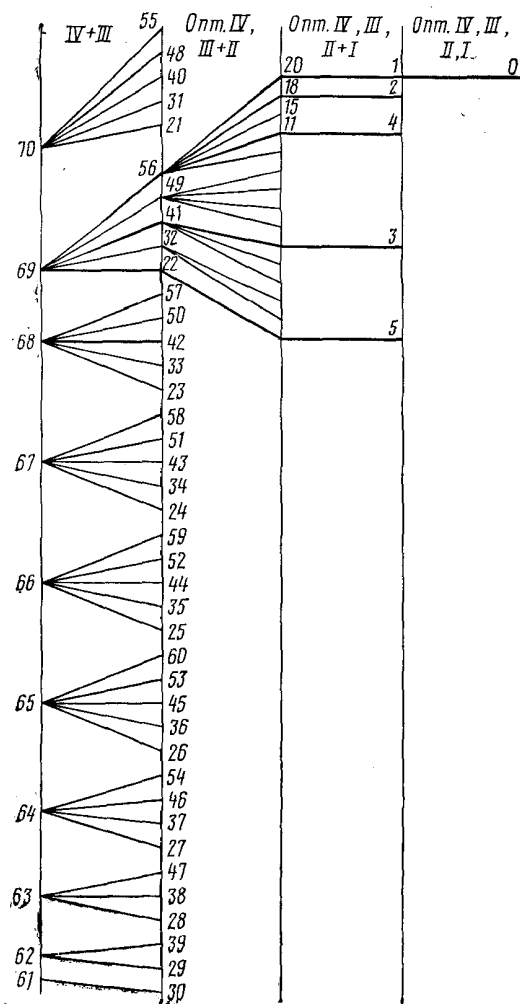
[illegible]

Рис. 12.12. Графическая модель поэтапной оптимизации сроков ввода мер развития

вертому этапам развития (см. табл. 12.7). Оптимальные сроки ввода мер: вторая — 11-й год, третья — 16-й год, четвертая — 25-й год.

На последнем этапе ввиду одного варианта развития станции в исходном состоянии оптимальный срок ввода первой меры будет на 2-м году освоения нагрузки. Графическая интерпретация поэтапной оптимизации сроков ввода мер развития приведена на рис. 12.12. Оптимальное развитие сортировочной станции в четырехпарковую:

три этапа развития сортировочной горки (на 2-м году — ввод средств механизации, на 4-м — строительство второго пути роспуска и ввод средств автоматизации, на 16-м году — реконструкция для параллельного роспуска составов); к 25-му году ввод в эксплуатацию горки предварительной сортировки вагонов; увеличение числа работающих локомотивов на горке и вытяжках в три этапа — с двух до шести и с двух до пяти соответственно. Строительство парка приема закончится ко 2-му году, парков отправления и транзитных — к 11-му и парка предварительной сортировки — к 25-му году перспективного периода.

### 12.7. Этапы повышения эксплуатационной надежности станции

На основе прогноза перспективных объемов работы станции и анализа параметров ее технологии и технического оснащения были разработаны меры этапного увеличения эксплуатационной надежности, пропускной и перерабатывающей способности станции, большая часть которых уже осуществлена (рис. 12.13). Повышение эксплуатационной надежности работы сортировочной системы достигнуто за счет сооружения транзитного парка параллельно парку приема с соответствующей реконструкцией входной и выходной горловин парка приема, реконструкции сортировочной горки с сооружением пяти путей надвига и трех путей роспуска с обеспечением возможности параллельного роспуска составов, сооружения путепроводного выхода под горкой для пропуска поездных локомотивов в депо из транзитного и приемного парков, развития выходной горловины сортировочного парка, сооружения петлевых соединений между сортировочными системами для регулирования подвода поездов в парк прибытия по минимуму углового потока и увеличения числа путей приемного, сортировочного и отправочного парков, доведение их до расчетных значений с учетом внутрису-

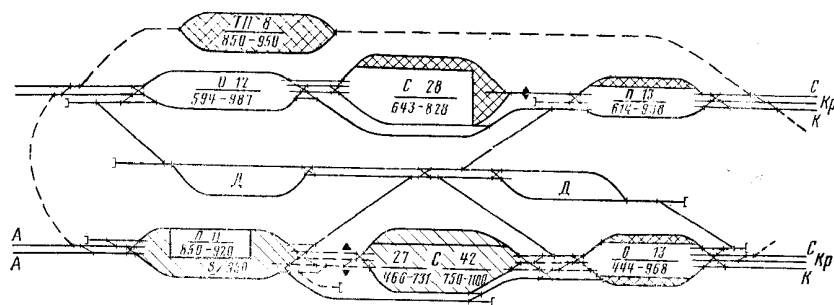


Рис. 12.13. Новые решения в развитии эксплуатационной надежности сортировочной станции



Рис. 12.14. Надежность работы сортировочной системы станции

точных неравномерностей движения поездов.

Таким образом, первый этап развития и реконструкции сортировочной системы, наращивания ее пропускной и перерабатывающей способности — это большой набор достаточно крупных мер, которые в комплексе создали условия для обеспечения резкого повышения эксплуатационной надежности приема, пропуска и переработки вагонопотока (рис. 12.14).

При дальнейшем возрастании потока перерабатываемых поездов (до 125—130 в сутки и выше) отказы вновь начинают расти. Каждая мера вводилась поочередно исходя из

обеспечения пропуска и переработки поездопотока в условиях выполнения строительных работ по реконструкции и развитию. В процессе строительных работ регулировали пропуск вагонопотоков, оперативно корректировали план формирования, главным образом, по внутридорожным назначениям.

Исходя из необходимости значительного повышения надежности приема транзитных и перерабатываемых поездов и учитывая территориальные возможности, на станции применили нетрадиционное размещение транзитного парка: он запроектирован и построен параллельно парку прибытия. Входные и выходные горловины парков обеспечивают прием перерабатываемых поездов на пути транзитного парка. С транзитных путей можно (см. рис. 12.13) надвигать и расформировывать эти поезда на сортировочной горке. В результате транзитный парк дублирует в случае сгущенного поступления разборочных поездов парк прибытия. Общее число путей обоих парков соответствует расчетным размерам и неравномерности поездопотоков. Параллельное размещение парков прибытия и транзитного позволило также сократить общее число путей в этих парках, поскольку вероятность одновременного поступления сгущенных пачек поездов очень мала.

На крупных станциях перерабатывающую способность сортировочных горок заметно снижают непроизводительные перерывы, вызванные пропуском поездных локомотивов в депо. Сооружение путепровода под горкой для пропуска локомотивов в депо с правой половины парка прибытия, несмотря на ряд ограничений в плане и профиле, улучшило условия расформирования поездов. Из парка прибытия, таким образом, имеются два выхода в депо. Это бес-

печило надежную, без задержек локомотивов и перерывов роспуска составов, уборку локомотивов с большинства путей парка. Враждебность маршрутов надвига и роспуска с маршрутами уборки локомотивов снижена на 60—70 %.

Как известно, существенным недостатком в работе двусторонних сортировочных станций является значительный объем передачи и повторной переработки угловых вагонопотоков. Учитывая, что эти потоки достигают нередко 15—22 % всего перерабатываемого вагонопотока, их уменьшение — значительный резерв увеличения перерабатывающей способности станции. Одна из мер, направленных на снижение угловых вагонопотоков на двусторонних станциях — сооружение петлевых соединений между сортировочными системами и превращение этих станций в станции эллипсоидного вида (см. рис. 12.13). Эти петлевые соединения проектируют с таким расчетом, чтобы обеспечить пропуск не только угловых передач, но и перерабатываемых поездов из парка прибытия или входной горловины одной системы в парк прибытия другой сортировочной системы. При наличии таких соединений можно регулировать подвод поездов в сортировочные системы с таким расчетом, чтобы одновременно уменьшить до минимума величину углового потока.

Создание петлевых соединений между сортировочными системами повышает также маневренность станции в период реконструкции одной из сортировочных систем: противоположную сортировочную систему используют для части транзитных и перерабатываемых поездов в качестве дублирующей.

Важную роль в развитии сортировочной системы сыграли реконструкция сортировочного парка и значительное увеличение числа сортировочных путей. В новых условиях появилась возможность формирования дополнительно поездов шести назначений, часть из которых — общесетевые, остальные — внутридорожные. Выделение новых назначений повысило транзитность вагонопотоков на сортировочных станциях за пределами дороги. Увеличение местных назначений дало возможность, хотя еще далеко не в том объеме, как требуется, подсортировывать вагонопотоки, облегчить работу недостаточно развитых грузовых станций, ускорить поступление местных вагонов под выгрузку.

#### ОБОЗНАЧЕНИЯ

- $L_0$  — расстояние воздействия отказа  
 $T$  — расчетное время работы системы или интервал времени, выбранный для анализа работоспособности системы  
 $T_0$  — время на проведение ремонтно-профилактических работ  
 $T_1$  — время резерва на текущий год эксплуатации системы  
 $T_r$  — время резерва для освоения объема работы на ближайшую перспективу (до наступления очередного этапа развития системы)  
 $T_t$  — технологическое время (время выполнения операции, занятия пути в зависимости от контекста и индекса)  
 $\beta_r$  — коэффициент резерва времени на проведение ремонтно-профилактических работ

- $\beta_1$  — коэффициент резерва на текущий год эксплуатации системы для обеспечения работоспособности в условиях отказов  
 $\beta_2$  — коэффициент резерва для освоения размеров движения на ближайшую перспективу  
 $\beta$  — число средних квадратичных отклонений  
 $P_N(t)$  — заданный уровень эксплуатационной надежности работы системы  
 $\kappa_r$  — коэффициент готовности к безотказной работе системы  
 $P(t_0)$  — вероятность безотказной работы системы за период  $t_0$   
 $N(t_0)$  — число поездов, не имеющих задержек (отказов) в течение  $t_0$   
 $n(t_0)$  — число задержанных поездов за  $t_0$   
 $F_1(t_0)$  — функция распределения времени безотказной работы  
 $\lambda(t)$  — интенсивность отказов — плотность вероятностей отказов системы к моменту времени  $t$  при условии, что до наступления этого момента отказов не было; при рассмотрении транспортного потока — плотность транспортного потока  
 $\bar{\lambda}(t)$  — интенсивность отказов, определяемая статистическим путем; для транспортных потоков — средняя плотность  
 $\theta_i$  — время безотказной работы между  $i$  — 1-м и  $i$ -м отказами  
 $T_p$  — математическое ожидание (среднее значение) времени работы системы до отказа  
 $T_b$  — математическое ожидание (среднее время) простоя и восстановления безотказности системы  
 $t_a$  — среднее время задержки поезда  
 $n(t)$  — число задержанных поездов в связи с отказами по приему;  $n_0(t)$  — по отправлению  
 $N_0(t)$  — число безотказно пропущенных поездов  
 $\mu(t)$  — интенсивность восстановления работоспособности системы или интенсивность обслуживания (в зависимости от контекста)  
 $t_p$  — время простоя и восстановления безотказности работы системы  
 $V, U$  — операторы перехода системы или обслуживающих каналов из одного состояния в другое  
 $G$  — оператор выхода заявки (поезда, группы вагонов и т. п.) из системы  
 $z(t)$  — состояние системы на момент времени  $t$  (число поездов, составов, вагонов и т. п. на момент времени  $t$ )  
 $T_k$  — период, в течение которого достигается максимум функции состояния системы  
 $M(T_i)$  — математическое ожидание величины транспортного потока в периоде  $T_i$   
 $D(T_i)$  — дисперсия транспортного потока в периоде  $T_i$   
 $\sigma(T_i)$  — среднее квадратичное отклонение транспортного потока  
 $v(T_i)$  — коэффициент вариации транспортного потока  
 $x(T_i)$  — модуль на входе системы — величина транспортного потока на входе системы в течение времени  $T_i$   
 $Y(T_i)$  — модуль на выходе системы — величина транспортного потока, обработанного системой за период  $T_i$   
 $\gamma$  — коэффициент загрузки системы  
 $\Pi$  — число путей в подсистемах (парках) станций (принадлежность конкретной системе обозначают индексами)  
 $B_{\text{ваг}}$  — стоимость вагона  
 $A$  — строительная стоимость 1 км пути или иного объекта (в зависимости от нижнего индекса)  
 $\Delta$  — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений  
 $\eta$  — коэффициент дисконтирования  
 $c_{гр}$  — средняя стоимость 1 т груза  
 $c_{вч}$  — стоимость 1 вагоно-ч простоя  
 $c_{ап}$  — стоимость отказа — задержки поезда продолжительностью  $t_a$   
 $c_{лч}$  — стоимость 1 локомотиво-ч простоя  
 $t_0$  — нормативный срок окупаемости капитальных вложений  
 $\mathcal{E}$  — эксплуатационные расходы  
 $E$  — приведенные расходы  
 $P_{\text{эу}}$  — экономически эффективный уровень надежности работы системы

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Материалы XXVI съезда КПСС. М.: Политиздат, 1981. 223 с.
2. Акулиничев В. М. Организация вагонопотоков. М.: Транспорт, 1979. 224 с.
3. Архангельский Е. В. Уровни загрузки и потребная мощность устройств сортировочной станции. — Тр. ВНИИЖТ, 1975, вып. 544. 128 с.
4. Барлоу Р., Прошан Ф. Математическая теория надежности: Пер. с англ./Под ред. акад. АН СССР Б. В. Гнеденко. М.: Сов. радио, 1969. 430 с.
5. Белман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования. М.: Наука, 1965. 460 с.
6. Белов И. В., Каплан А. Б. Применение математических методов в планировании на железнодорожном транспорте. М.: Транспорт, 1967. 182 с.
7. Четырехпарковая сортировочная станция/К. А. Бернгард, В. К. Буянова и др. — Ж.-д. трансп., 1972, № 2, с. 24—27.
8. Болотный В. Я. Развитие железнодорожных станций и узлов. — Ж.-д. трансп., 1981, № 5, с. 11—14.
9. Ботавин П. Р. Развитие сортировочных станций для параллельного роспуска. — Ж.-д. трансп., 1973, № 8, с. 27—31.
10. Бусленко Н. П., Калашников В. В., Коваленко И. Н. Лекции по теории сложных систем. М.: Сов. радио, 1973. 438 с.
11. Буянов В. А., Ратин Г. С. Автоматизированные информационные системы на железнодорожном транспорте. М.: Транспорт, 1984. 239 с.
12. Быкадоров А. В. К расчету оптимальных сроков развития железнодорожного объекта. — Тр. НИИЖТ, 1969, вып. 93, с. 18—28.
13. Вентцель Е. С. Оценка времени задержки поездов по причине неисправности системы автоблокировки. — Тр. МИИТ, 1979, вып. 640, с. 3—16.
14. Грунтов П. С. Расчет эксплуатационной надежности и путевого развития сортировочных станций. — Тр. БелИИЖТ, 1970, вып. 94, с. 108.
15. Грунтов П. С. Исследование оптимальной эксплуатационной надежности работы сортировочных станций. — Тр. БелИИЖТ, 1975, вып. 140, с. 28—52.
16. Грунтов П. С. Разработка методики расчета критерия оптимальности при прогнозировании развития сортировочных станций. — Тр. БелИИЖТ, 1976, вып. 152, с. 23—35.
17. Грунтов П. С. Надежность работы сортировочных станций. — В кн.: Интенсификация использования подвижного состава и перевозочной мощности железных дорог. М.: Транспорт, 1977. 296 с.
18. Грунтов П. С. Классификация отказов в приеме и пропуске поездов и их влияние на показатели эксплуатационной работы и пропускную способность. — В кн.: Вопросы ускорения переработки вагонов на станциях и в узлах. Гомель, 1980, с. 3—16. В надзаг.: БелИИЖТ.
19. Грунтов П. С. Интенсивные методы развития станций и узлов. — Ж.-д. трансп. 1982, № 9, с. 52—58.
20. Грунтов П. С., Захаров В. А. Прогнозирование показателей работы сортировочных станций методом моделирования на ЭВМ. Гомель, 1981. 60 с.
21. Грунтов П. С., Жидков А. М. Исследования эксплуатационной надежности комплекса по расформированию поездов. — В кн.: Интенсификация пропуска вагонопотоков на станциях и участках. Гомель, 1981, с. 54—65. В надзаг.: БелИИЖТ.
22. Грунтов П. С., Кузнецов В. Г. Надежность работы стыковых пунктов. — В кн.: Эксплуатационная надежность и управление станциями, узлами и участками. Гомель, 1982, с. 27—42. В надзаг.: БелИИЖТ.
23. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соболев А. Д. Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 1965. 524 с.
24. Гридюшко В. И. Исследование надежности грузовых вагонов и пути повышения их работоспособности. М.: Транспорт, 1974. 166 с. (Тр. ВНИИЖТ; Вып. 524).
25. Захаров В. А. Исследование закономерностей колебания числа вагонов в составе по назначениям плана формирования. — Тр. БелИИЖТ, 1975, вып. 140, с. 75—84.
26. Каретников А. Д., Воробьев Н. А. График движения поездов. М.: Транспорт, 1979. 302 с.
27. Козлова Б. А., Ушаков И. А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. М.: Сов. радио, 1975. 472 с.
28. Макарович А. М., Дьяков Ю. В. Использование и развитие пропускной способности железных дорог. М.: Транспорт, 1981. 287 с.
29. Меньшиков И. Я., Королев А. И., Ягудин Р. Ш. Надежность железнодорожных систем автоматики и телемеханики. М.: Транспорт, 1976. 215 с.
30. Моделирование экономических процессов на железнодорожном транспорте/Под ред. И. В. Белова, А. М. Макаровича. М.: Транспорт, 1977. 246 с.
31. Орлов М. В., Зыков Ю. В. Техническому обслуживанию вагонов — современные методы. — Ж.-д. трансп., 1982, № 11, с. 40—44.
32. Павлов В. Е. Влияние погрешности в работе системы АРС на перерабатывающую способность автоматизированной сортировочной горки. — Тр. ЛИИЖТ, 1972, вып. 334, с. 17—20.
33. Персианов В. А., Скалов К. Ю., Усков Н. С. Моделирование транспортных систем. М.: Транспорт, 1972. 205 с.
34. Платонов Г. А., Файнберг М. А. Вероятностная модель потока поездов, поступающих в расформирование. — Вестник ЦНИИ МПС, 1972, № 1, с. 32—36.
35. Повышение надежности и срока службы электровозов/Под общ. ред. Ю. Н. Виноградова. М.: Транспорт, 1969. 238 с. (Тр. ВНИИЖТ; Вып. 386).
36. Повышение надежности и улучшение текущего содержания грузовых вагонов/Под ред. Г. К. Сендерова. М.: Транспорт, 1972. (Тр. ВНИИЖТ; Вып. 159).
37. Поттгоф Г. Учение о транспортных потоках: Пер. с нем. М.: Транспорт, 1975. 344 с.
38. Правдин Н. В., Банек Т. С. Станции и узлы. Минск.: Высшая школа. 1975. 370 с.
39. Технология работы участковых и сортировочных станций/И. Г. Тихомиров, П. С. Грунтов и др. М.: Транспорт, 1973. 272 с.
40. Сотников Е. А. Интенсификация работы сортировочных станций. М.: Транспорт, 1979. 239 с.
41. Стенбринк П. А. Оптимизация транспортных сетей. Пер. с англ. М.: Транспорт, 1981. 320 с.
42. Угрюмов А. К. Неравномерность движения поездов. М.: Транспорт, 1968. 112 с.
43. Федотов Н. И. Колебания потоков в транспортных системах. — Тр. НИИЖТ, 1974, вып. 139, с. 5—27.
44. Шишляков А. В., Кравцов Ю. А., Михайлов А. Ф. Эксплуатационная надежность устройств автоблокировки и АЛС. М.: Транспорт, 1969. 96 с.

## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

### А

Автоблокировка 5, 71, 73  
Автоматическая локомотивная сигнализация 73  
Агрегат 102, 189  
Аддитивность 93  
Аппаратура виброметрическая 64

### Б

Безопасность движения 10  
Безотказность 8

### В

Вагон 3  
Вагоно-час 123  
Векторы:  
-- состояния системы 104  
-- столбец 193  
-- строка 143  
-- трехмерные 199  
-- фазовых переменных 198  
Вероятности:  
-- безотказной работы 25, 68  
-- стационарная 61  
-- появления отказов 25  
Воздействие управляющее 6  
Волна задержек 57  
Восстановление 10  
Время безотказной работы 23, 61, 74  
Вторичная задержка 52  
Входной модуль системы 111  
Выборка статистическая 46  
Высота энергетическая 209

### Г

Габарит 63  
Гамма-процентный ресурс 22  
Гистограмма распределения 127  
Готовности:  
-- оперативная 52  
-- техническая 141  
Градиентный метод 118  
Граница перехода 90  
Граф вариантов 219  
Графики:  
-- движения поездов 4, 13, 42, 76, 93  
-- насыщенный 56  
Грузовой двор 11  
Грузонапряженность 3, 70  
Грузооборот 3  
Густота потока 141

### Д

Дефект 63  
Диапазон отказов 12  
Динамическое программирование 201, 232  
Дисперсия 116  
Диспетчер 6  
Диспетчерские:  
-- контроль 5, 73  
-- централизация 5, 71, 73  
Дистанция 69  
Документ нормативно-технологический 9  
Долговечность 22  
Дублирование устройств 141

### Е

Единый банк данных 6  
Емкость системы 8, 111

### И

Избыточность 16—17  
Интенсификация 3, 15, 192  
Интенсивности:  
-- обслуживания 111  
-- отказов 29, 49, 90  
-- отказов мгновенная 30  
-- потока 8, 94, 95

-- потока отказов 58  
-- транспортного потока 42, 111, 116  
Интервалы:  
-- выставки 162  
-- горочный технологический 133, 139, 149  
-- отправления 164, 170, 172  
Информационные:  
-- поток 6  
-- перегрузка 6  
-- характеристика 7  
Источник транспортного потока 93

### К

Канал технологический 149, 176  
Классификатор 3  
Контейнерный терминал 11  
Корреляционная зависимость 55  
Корреспонденция грузов 41  
Коэффициенты:  
-- вариации 96, 165, 170  
-- готовности 19, 73, 144  
-- загрузки 134, 191, 193  
-- избыточности времени 16  
-- неравномерности 121  
-- нестационарный 19, 36, 70  
-- оперативной готовности 21, 61, 68  
-- отказа 20  
-- простоя 20  
-- резерва 16  
-- технический 159  
-- технического использования 21  
Критерий экономической эффективности 232

### М

Маршрут 140, 163, 169  
Матрица значений функции надежности 88  
Математические:  
-- ожидание 19  
-- определения показателей надежности 23  
Меры:  
-- организационные 15  
-- технологические 15  
Местный сортировочно-отправочный парк 174  
Моделирование 7, 188, 189  
Многомерность транспортной системы 5

### Н

Наблюдений число 23  
Нагрузка многомерная 194  
Надежности:  
-- конструктивная 4  
-- общая 6  
-- оптимальная 126  
-- параметрическая 47, 69, 70  
-- перевозочного процесса 14, 42, 47  
-- подвижного состава 3  
-- техническая 132  
-- технических средств 5  
-- транспортной системы 5, 6, 9  
-- фактическая 51  
-- эксплуатационная 52, 92, 171  
Наработки:  
-- на отказ 19  
-- средняя 60  
Насыщение транспортной системы 107  
Натурный лист 11  
Нормативы технологического процесса 78

### О

Обслуживающее устройство 140  
Объект 8  
Оперативные:  
-- прогнозирование 11  
-- регулирование 11

Оператор 6  
Операций цикл 142  
Организация перевозочного процесса 43  
Основное технологическое обеспечение 42  
Отказы:  
-- внезапный 12  
-- зависящий 12  
-- конструкционный 12  
-- независимый 12  
-- организационно-технологический 14  
-- полный 12  
-- постесненный 12  
-- самоустраниющийся 12  
-- технический 3, 132, 150  
-- технологический 3, 150  
Отклонение перегламентированное 42

### П

Параметрический метод 49  
Параметр потока отказов 78  
Парк вагонный 59  
Перевозки 3  
Перегон 14  
Перерабатывающая способность 7, 9  
Периоды:  
-- критический 109  
-- насыщенности 116  
План формирования поездов 9, 42, 93  
Плотности:  
-- вероятностей отказов 28, 29  
-- транспортного потока 42, 95  
-- распределения отказов статистическая 49

Повреждение 10  
Погрузочно-разгрузочный фронт 11  
Подвижной состав 3  
Подразделения сети 15  
Поезда:  
-- вывозные 43  
-- маршрутные 47  
-- местные 43  
-- передаточные 43  
-- сборные 43  
Показатели надежности 71  
Пост диагностики 64  
Постоянные устройства 14  
Потоки:  
-- информационный 6  
-- транспортный 19, 52, 94  
Предельное состояние системы 10  
Предпосылки:  
-- вероятностная 23  
-- статистическая 23  
Пробег 13  
Проблема надежности 5  
Провозная способность 7, 15  
Профилактический осмотр 67  
Пропускная способность 6, 9, 15  
Процесс перевозочный 16  
Пуикты:  
-- подготовки вагонов 60  
-- технического обслуживания 60  
Путевое развитие 139

### Р

Работоспособность 9, 71, 165  
Распределения:  
-- произвольное 38  
-- экспоненциальное 38  
Распределительно-группировочная станция 207, 212, 215  
Расчетное время 16  
Реальный масштаб времени 6  
Регулирование интервальное 71  
Режимы:  
-- движения 5, 94  
-- качества 59  
Резервы:  
-- нагруженный 18  
-- ненагруженный 18

Резервирование 16—18, 180  
Резервное время 180  
Ресурс 10  
Ряды:  
-- распределения 127  
-- статистический 97

### С

Системы:  
-- высоконадежная 57  
-- невосстанавливаемая 23  
-- сортировочная 239  
-- техническая 10  
-- технологическая 4  
-- транспортная 16, 31, 82  
-- человеко-машинная 6  
Скорость маршрутная 45  
Смазка графитовая 75  
События несовместимые 156  
Сохраняемость 10  
Средние:  
-- время постановления 22  
-- время простоя 22  
-- время работы до отказа 32  
-- квадратичное отклонение 165  
Сроки:  
-- доставки грузов 45  
-- службы 10  
Старение 10  
Статистическое определение надежности 24  
Стратегия развития 217  
Стрелочный перевод 12

### Т

Текущее содержание пути механизированное 68  
Тепловоз 3  
Теория надежности 4  
Трансформация потока 96

### У

Узел 5  
Управление 11  
Уравнивание баланса 105, 111  
Уровни:  
-- надежности 7, 123, 136  
-- эксплуатационный 128  
Условия эксплуатации 19  
Участок 5, 68, 87

### Ф

Фаза обслуживания 96  
Фазовая переменная 197  
Фактор управляющий 6  
Формализация процессов 101  
Функции:  
-- отказов 26, 29  
-- надежности 26, 29, 48  
-- ненадежности 26  
-- потока отказов ведущая 21  
-- управления 6  
-- эмпирическая, распределения срока доставки груза 45  
Функциональные связи 101

### Х

Характеристики системы:  
-- качественная 18  
-- количественная 18  
-- техническая 7  
-- технологическая 7

### Э

Эксплуатационные:  
-- качества 59  
-- работа 3  
Электровоз 3  
Энергоснабжение тяговое 57

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                     |   |
|---------------------|---|
| От автора . . . . . | 3 |
|---------------------|---|

### Глава 1

#### НАДЕЖНОСТЬ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ. КЛАССИФИКАЦИЯ ОТКАЗОВ

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1. Общая характеристика транспортных систем . . . . .                                                         | 5  |
| 1.2. Основные понятия и определения теории надежности . . . . .                                                 | 7  |
| 1.3. Классификация отказов в работе транспортных систем . . . . .                                               | 11 |
| 1.4. Резервирование. Резервы пропускной, перерабатывающей и провозной способности транспортных систем . . . . . | 15 |

### Глава 2

#### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Показатели безотказности работы транспортных систем . . . . .            | 18 |
| 2.2. Количественная мера надежности транспортных систем . . . . .             | 23 |
| 2.3. Простейшие математические модели расчета параметров надежности . . . . . | 38 |

### Глава 3

#### ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПЕРЕВОЗОК

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1. Регламентация перевозочного процесса . . . . .                                            | 41 |
| 3.2. Надежность работы станций по пропуску маршрутов и выполнению плана формирования . . . . . | 47 |

### Глава 4

#### ВЛИЯНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НА НАДЕЖНОСТЬ ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ И РАБОТУ СТАНЦИЙ

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1. Учет и анализ надежности тепловозного комплекса . . . . .                                                   | 49 |
| 4.2. Влияние надежности комплекса электрической тяги . . . . .                                                   | 55 |
| 4.3. Надежность вагонного парка . . . . .                                                                        | 59 |
| 4.4. Влияние надежности устройств пути . . . . .                                                                 | 67 |
| 4.5. Влияние надежности комплекса устройств АТС . . . . .                                                        | 71 |
| 4.6. Влияние комплекса технических средств и станций на надежность выполнения графика движения поездов . . . . . | 76 |

### Глава 5

#### НАДЕЖНОСТЬ РАБОТЫ СТАНЦИЙ — СТЫКОВЫХ ПУНКТОВ ОТДЕЛЕНИЙ И ДОРОГ

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.1. Виды стыковых пунктов между системами и подсистемами, их классификация . . . . . | 82 |
| 5.2. Отказы в работе стыковых пунктов . . . . .                                       | 83 |
| 5.3. Надежность работы станций — стыковых пунктов отделений и дорог . . . . .         | 87 |

## Глава 6

### НАГРУЗКА НА СТАНЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ПОДСИСТЕМЫ

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.1. Транспортные потоки и их характеристики . . . . .                        | 93 |
| 6.2. Трансформация потока в станционных системах и подсистемах . . . . .      | 96 |
| 6.3. Законы распределения транспортного потока и основные параметры . . . . . | 97 |

### Глава 7

#### ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПАРКОВ СОРТИРОВОЧНЫХ, УЧАСТКОВЫХ, ПАССАЖИРСКИХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И ДРУГИХ СТАНЦИЙ

|                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.1. Формализация процессов в подсистемах станций . . . . .                                                | 101 |
| 7.2. Изменение состояний парков станций во времени. Уравнение баланса работы подсистем и станций . . . . . | 104 |
| 7.3. Максимальное насыщение транспортной системы . . . . .                                                 | 107 |
| 7.4. Расчет периода насыщения основных парков участковых и сортировочных станций . . . . .                 | 112 |
| 7.5. Период максимального насыщения парков пассажирских и технических станций . . . . .                    | 120 |

### Глава 8

#### ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К РАСЧЕТУ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ СОРТИРОВОЧНЫХ СТАНЦИЙ

|                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.1. Исходные принципы и положения . . . . .                                                    | 122 |
| 8.2. Экономические принципы расчета эксплуатационной надежности подсистемы «ВхУ—ПП—Г» . . . . . | 126 |
| 8.3. Экономический уровень надежности работы подсистемы «Г—ПФ—ВФ» . . . . .                     | 132 |
| 8.4. Экономический уровень надежности работы подсистемы «ВФ—ПО—ВыхУ» . . . . .                  | 137 |

### Глава 9

#### МЕТОДИКА И ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОГО ПУТЕВОГО РАЗВИТИЯ ОСНОВНЫХ ПАРКОВ УЧАСТКОВЫХ, СОРТИРОВОЧНЫХ И ГРУЗОВЫХ СТАНЦИЙ

|                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 9.1. Оптимальное путевое развитие подсистемы «Входные участки—парк прибытия—сортировочная горка» . . . . .          | 139 |
| 9.2. Оптимальное путевое развитие подсистемы «Сортировочная горка—парк формирования—вытяжки формирования» . . . . . | 149 |
| 9.3. Оптимальное путевое развитие подсистемы «Вытяжки формирования—парк отправления—выходные участки» . . . . .     | 162 |
| 9.4. Оптимальное путевое развитие подсистемы «Входные участки—транзитный парк—выходные участки» . . . . .           | 168 |
| 9.5. Особенности расчетов путевого развития участковой станции . . . . .                                            | 172 |
| 9.6. Особенности расчета путевого развития местных сортировочно-отправочных парков . . . . .                        | 174 |

## Глава 10

### МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПУТЕВОГО РАЗВИТИЯ ПАССАЖИРСКИХ И ПАССАЖИРСКИХ ТЕХНИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

|                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 10.1. Надежность работы пассажирского комплекса . . . . .                                                  | 178 |
| 10.2. Расчет числа путей в приемо-отправочных парках пассажирской<br>станции . . . . .                     | 181 |
| 10.3. Определение числа путей в парках приема и отправления па-<br>сажирской технической станции . . . . . | 184 |

## Глава 11

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ И ПРОСТОЯ ВАГОНОВ НА СОРТИРОВОЧНЫХ СТАНЦИЯХ МЕТОДОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ЭВМ

|                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------|-----|
| 11.1. Цели и задачи моделирования . . . . .                            | 188 |
| 11.2. Основные принципы моделирования станционной технологии . . . . . | 189 |
| 11.3. Расчет показателей работы станции . . . . .                      | 189 |

## Глава 12

### ОПТИМАЛЬНАЯ ЭТАПНОСТЬ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ СТАНЦИЙ

|                                                                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 12.1. Прогнозирование нагрузки на станционные системы . . . . .                                                                        | 192 |
| 12.2. Принципы оптимизации технологии и увеличения мощности<br>сортировочных станций . . . . .                                         | 197 |
| 12.3. Разработка методики расчета критерия оптимальности при<br>прогнозировании развития сортировочных станций . . . . .               | 203 |
| 12.4. Сортировочные станции высокой эксплуатационной надежности<br>для формирования и пропуска поездов большой массы и длины . . . . . | 206 |
| 12.5. Схемы путевого развития сортировочных станций. Стратегии<br>повышения пропускной и перерабатывающей способности . . . . .        | 216 |
| 12.6. Пример выбора оптимального развития сортировочной станции . . . . .                                                              | 221 |
| 12.7. Этапы повышения эксплуатационной надежности станции . . . . .                                                                    | 237 |
| Обозначения . . . . .                                                                                                                  | 239 |
| Список литературы . . . . .                                                                                                            | 241 |
| Предметный указатель . . . . .                                                                                                         | 243 |