

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ ИМПЕРАТОРА АЛЕКСАНДРА I»  
(ФГБОУ ВПО ПГУПС)

---



**Развитие элементной базы  
и совершенствование методов построения  
устройств железнодорожной автоматики  
и телемеханики**

Сборник научных трудов

Санкт-Петербург ■ 2014

УДК 656.25  
Р19

**Развитие элементной базы и совершенствование методов построения устройств железнодорожной автоматики и телемеханики** : сб. науч. трудов / Под ред. Вл. В. Сапожникова. – СПб. : ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2014. – 114 с.

**Component base development and railway automation and remote control devices design methods improvement** : scientific proceedings / edited by Vl. V. Sapozhnikov. – St. Petersburg : Petersburg State Transport University, 2014. – 114 p.

ISBN 978-5-7641-0597-0

Сборник научных трудов подготовлен кафедрой «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Петербургский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВПО ПГУПС). Сборник содержит статьи, посвященные вопросам надежности, безопасности и живучести устройств автоматики, электронного моделирования и документооборота, технической диагностики дискретных систем, а также развития железнодорожной автоматики и телемеханики.

Предназначен для разработчиков устройств и систем автоматики и телемеханики, аспирантов и студентов соответствующих специальностей.

Является 33-м кафедральным сборником.

УДК 656.25

#### **Редакционная коллегия:**

**Вл. В. Сапожников** – д-р техн. наук, главный редактор, заведующий кафедрой «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ПГУПС

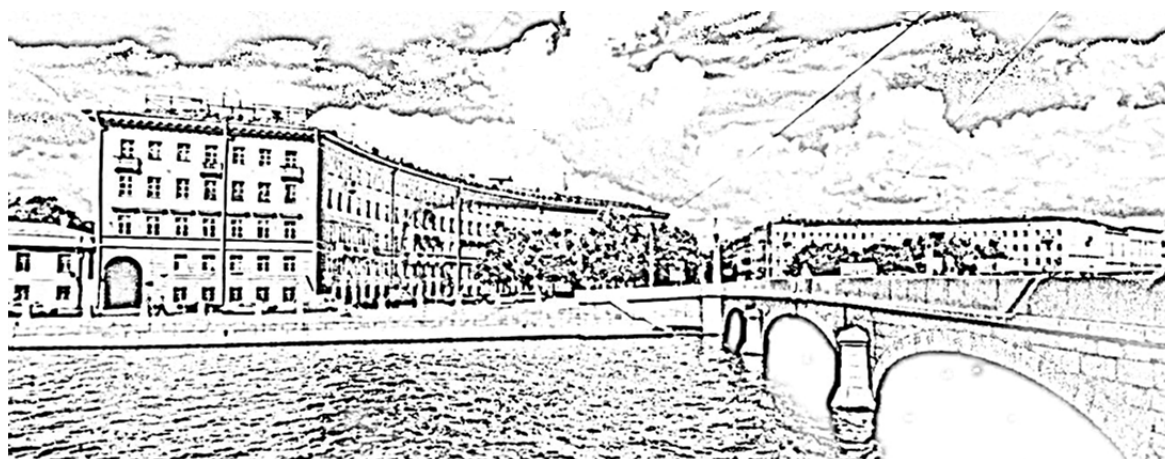
**В. В. Сапожников** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ПГУПС

**А. Б. Никитин** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ПГУПС

**Д. В. Ефанов** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ПГУПС

ISBN 978-5-7641-0597-0

© ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2014



## Содержание

### Надежность, живучесть, безопасность

**Манаков А. Д., Никитин А. Б.,  
Наседкин О. А., Шатохин В. А.**  
Задачи концепции защиты от перенапряжений  
инфраструктуры обеспечения движения  
поездов

5

**Бочкарев С. В., Лыков А. А., Марков Д. С.**  
Методика комплексной оценки показателей  
эффективности систем технического  
диагностирования и мониторинга

14

**Чухонин В. М., Горбунов Б. Л., Басалаев Е. В.**  
Нормирование активной мощности двигателей  
переменного тока при переводе стрелки

23

**Никитин А. Б., Ковкин А. Н.**  
Контроль исправности рабочей цепи  
электроприводов

26

**Плеханов П. А.**  
Обеспечение безопасности движения на  
железнодорожном транспорте в  
международном сообщении: отечественный  
опыт и зарубежная практика

### Стандартизация и сертификация

**Васильев Д. А., Гизлер С. В.,  
Наседкин О. А., Шайфер М. П.**  
Экспертная программа для проведения  
испытаний технологического программного  
обеспечения систем микропроцессорной  
централизации

39

### Электронное моделирование

**Марков Д. С., Соколов В. Б.**  
Метод порционного моделирования  
транспортных систем массового  
обслуживания

43

**Ходаковский В. А., Марков Д. С.,  
Соколов М. Б.**  
Методы и инструментальные средства  
имитационного моделирования рельсовых  
цепей

48

**Бакин М. Е.**  
Методика расчета растекания переменных  
составляющих тягового тока в рельсовых  
линиях

55

**Новиков Д. В.**  
Построение модели электромагнитного  
нейтрального реле в симуляторе *Ngspice*

60

### Электронный документооборот технической документации

**Булавский П. Е., Марков Д. С.**  
Метод оценки времени на выполнение  
процессов электронного  
документооборота технической  
документации

64

**Матушев А. А., Лобанов Ф. Н.**  
Современные подходы к переводу  
технической документации с бумажных  
носителей в электронный вид

70

**Горшков И. С., Ильюшко И. В.**

Принципы организации системы электронного документооборота с использованием электронной цифровой подписи при согласовании и утверждении проектной документации

75

#### **Вопросы технической диагностики**

**Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В.**

Классические и взвешенные коды Бергера в системах функционального контроля

81

**Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В.**

О синтезе монотонных комбинационных схем с обнаружением всех одиночных неисправностей

89

#### **Из истории развития железнодорожной автоматики**

**Лупал Н. В.**

Централизация стрелок и сигналов

102

**Abstracts**

109

**Авторы**

112

**Авторский указатель**

114

## Надежность, живучесть, безопасность

УДК 656.25

### Задачи концепции защиты от перенапряжений инфраструктуры обеспечения движения поездов

А. Д. Манаков, А. Б. Никитин, О. А. Наседкин, В. А. Шатохин

Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»

**Аннотация.** На этапе широкого применения компьютерных и микропроцессорных устройств на железнодорожном транспорте сформулированы задачи концепции защиты инфраструктуры обеспечения движения поездов от атмосферных и коммутационных перенапряжений.

**Ключевые слова:** концепция; инфраструктура; опасные электромагнитные воздействия; перенапряжения; устройства защиты от импульсных перенапряжений.

#### 1 Введение

Железнодорожный транспорт России представляет собой сложную систему, состоящую из большого количества хозяйств, технологических подразделений и технических средств. Структурные изменения в открытом акционерном обществе «Российские железные дороги» (ОАО РЖД) позволяют перейти от управленческой деятельности «по хозяйствам» к комплексной инфраструктурной управленческой модели.

В инфраструктуру железнодорожного транспорта входят подсистемы обеспечения движения поездов: электрификации и электроснабжения (Э); автоматики и телемеханики (Ш); информатизации и связи (НИС).

Технологические объекты этих хозяйств расположены в узкой полосе железной дороги, рассредоточены по всей ее длине и подвержены воздействию атмосферного электричества. Отказы технических средств в подсистемах Э, Ш и НИС связаны с задержками поездов и приводят к большим экономическим потерям ОАО РЖД. Так, опасные отказы технических средств в подсистеме Ш могут спровоцировать аварии и привести к человеческим жертвам.

Высокое напряжение и большие тяговые и аварийные токи в подсистеме Э на участках с электрической тягой поездов опасно воздействуют на устройства подсистем Ш и НИС и оказывают на них мешающее влияние. Подсистема Э обеспечивает электрической энергией устройства подсистем Ш и НИС. Распределенные сети систем электроснабжения возвышаются над поверхностью земли и наиболее подвержены прямым ударам молнии. Сети электроснабжения являются направляющими системами для волн атмосферных перенапряжений. Такие перенапряжения воздействуют на все технические средства, подключенные к распределительным сетям электроснабжения. Технические средства подсистем Ш и НИС могут располагаться как в отдельных зданиях, так и в одном служебно-техническом здании.

Все подсистемы обеспечения движения поездов широко используют для управления, сбора, обработки, хранения и передачи информации персональные компьютеры и микропроцессорные устройства. В подсистеме Э это: системы учета электрической энергии, телемеханические системы управления и контроля объектами электроснабжения, системы защиты от токов короткого замыкания тяговых сетей; в подсистеме Ш – системы управления стрелками и сигналами: микропроцессорные централизации, компьютерные диспетчерские централизации, электронные системы автоблокировки, автоматизированные системы диспетчерского контроля; в подсистеме НИС – системы передачи данных и организации всех видов связи.

Микроэлектронные устройства снизили уровни допустимых перенапряжений, дей-

ствующих на изоляцию устройств и на вводы устройств, за счет уменьшения междуэлектродного пространства, а также допустимых токов перегрузки (сверхток), действующих на вводы устройств, за счет уменьшения рабочей поверхности микроэлектронных компонентов. Традиционные методы и способы защиты технических средств и служебно-технических зданий от воздействий атмосферного электричества и коммутационных перенапряжений на железных дорогах России пришли в противоречие с допустимыми уровнями перенапряжений для микроэлектронных устройств. Для устранения этого противоречия требуется разработка новых нормативных документов, методов и средств защиты от перенапряжений.

Целью данной работы является постановка задач концепции защиты инфраструктуры обеспечения движения поездов от атмосферных и коммутационных перенапряжений.

## 2 Воздействие перенапряжений на устройства

Атмосферное электричество в результате прямого удара молнии в тяговую сеть, высоковольтные линии (ВЛ) электроснабжения, рельсовую линию, а также в результате электростатической индукции электрически заряженных облаков и электромагнитной индукции тока молнии при близких разрядах молнии в землю и между облаками создает в электропроводных цепях напряжения и токи, которые опасно воздействуют на устройства инфраструктуры обеспечения движения поездов и оказывают на них мешающее влияние.

*Опасные электромагнитные воздействия (ОЭМВ)* – напряжения и токи в цепях устройств, вызывающие повреждение технических средств (пробой изоляции, тепловое и (или) динамическое разрушение вводов), а также поражение электрической энергией обслуживающего персонала [1].

*Опасное воздействие на техническое средство* – это такое воздействие, которое связано с появлением недопустимо высоких напряжений и (или) токов в цепях технических средств, вызывающих необратимые процессы и повреждения в этих средствах [2].

*Мешающие электромагнитные влияния (МЭМВ)* – напряжения и токи в цепях устройств, в результате действия которых происходит ложное срабатывание и сбои в работе устройств [1].

В результате ОЭМВ происходит пробой изоляции в обмотках реле и трансформаторов, кабельных или воздушных линиях; соединение линейных проводов; сообщение линейных проводов с корпусом; расплавление кристалла полупроводника (короткое замыкание цепи) или испарение рабочей поверхности полупроводника (разрыв цепи).

На рис. 1 показана схема участка железной дороги с электрической тягой поездов на переменном токе, где ТП – тяговая подстанция; Т1...Т4 – трансформаторы питания линейных устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) типа ОЛ, ОМ, ЗНОЛ и ЗНОМ; РШ – релейный шкаф; Н, Ч, Ч1, Ч3, ... – светофоры системы микропроцессорной централизации (МПЦ); СП1 и СП2 – стрелочные приводы; ДГА – резервная электростанция (дизель-генераторный агрегат); ЛАЗ – линейно-аппаратный зал; ОУП – обслуживаемый усилительный пункт; ВЛ АБ 6(10) кВ – высоковольтная линия автоблокировки напряжением 6(10) кВ; ВЛ ПЭ 6(10) кВ – высоковольтная линия продольного электроснабжения напряжением 6(10) кВ; КЗ – место короткого замыкания контактного провода на рельс. Также на рис. 1 показаны: отрицательно заряженное грозовое облако, места прямых ударов молнии в ВЛ 110(220) кВ, ВЛ 6(10) кВ, контактный провод, ТП, ЛАЗ, пост МПЦ и ОУП; бегущие волны атмосферных перенапряжений на ВЛ 110(220) кВ и ВЛ 6(10) кВ; коэффициент магнитной связи ( $M_{p-k}$ ) обратного тягового тока в рельсах и магистрального кабеля связи. Величина бегущей волны атмосферных перенапряжений ограничена электрической прочностью изоляции ВЛ. Кроме того, на рис. 1 приведены зоны ответственности подсистем Э, Ш и НИС.

Из схемы на рис. 1 следует, что служебно-техническим зданиям (ТП, пост МПЦ, ЛАЗ, ОУП) требуется защита от прямых ударов молнии и от вторичных проявлений молнии в виде атмосферных перенапряжений. Тяговая подстанция и линейные транс-

форматоры устройств ЖАТ должны иметь защиту от волн атмосферных перенапряжений, набегающих с линии. Контактная сеть экранирует устройства ЖАТ от прямых ударов молнии. Токи короткого замыкания в тяговой сети наводят продольные (провод–земля) перенапряжения в жилах магистрального кабеля и кабеля связи поста МПЦ с напольными устройствами ЖАТ, что приводит к отказам контроллеров управления напольными устройствами ЖАТ и контроллеров связи системы диспетчерского контроля.

Схема воздействия волн атмосферных перенапряжений на обмотку трансформатора при электростатической индукции заряженных грозových облаков показана на рис. 2.

Высоковольтная обмотка (ВВО) трансформатора типа ОМ (однофазный масляный) подключается к нижним проводам высоковольтной линии (ВЛ) автоблокировки напряжением 10 кВ. При электростатической индукции заряженных грозových облаков через несовершенную изоляцию ВЛ на проводах накапливаются заряды противоположного знака, например, положительные заряды, которые электрически связаны с зарядом облака.

После разряда облака в землю или в смежные облака заряды на проводах освобождаются из связи с облаком и в виде волн атмосферных перенапряжений распространяются по ВЛ [3]. Учитывая, что расстояние между проводами мало по сравнению с расстоянием до грозového облака, несущего заряд, и что условия по изоляции проводов примерно равные, индуктированные напряжения и волны на ВЛ будут почти одинаковы по величине. Перенапряжения будут действовать между проводом каждой фазы и землей ( $u_{L1-3}$ ,  $u_{L2-3}$ ,  $u_{L3-3}$ ). Напряжения между проводами ( $u_{L1-L2}$ ,  $u_{L2-L3}$ ,  $u_{L1-L3}$ ) близки к нулю.

Для защиты изоляции трансформаторов устанавливают разрядники  $P_1$  и  $P_2$  (см. рис. 2) (например, РВП-10 – разрядники вентильные подстанционные), которые имеют разброс характеристик и срабатывают не одновременно. Например, если первым сработал разрядник  $P_1$ , то заряды с провода  $L_1$  стекают в землю, и между проводами  $L_1$  и  $L_2$  возникает разность потенциалов, которая в виде напряжения  $u_{L1-L2}$  прикладывается к высоковольтной обмотке трансформатора ОМ. Ско-

рость нарастания напряжения ( $du_{L1-L2}/dt$ ) определяется временем срабатывания разрядника  $P_1$  ( $t_{\text{вкл.}P_1}$ ).

Форма напряжения, действующая на высоковольтную обмотку трансформатора, показана на рис. 3 в виде заштрихованного треугольника  $MNK$ .

На время включения разрядника  $P_1$  напряжение в точке А (т. А) (см. рис. 2) будет снижаться со скоростью уменьшения напряжения на участке  $MN$  (см. рис. 3) до величины остающегося напряжения сработавшего разрядника. Таким образом, к началу высоковольтной обмотки – точка  $X$  (т.  $X$ ) по отношению к концу высоковольтной обмотки – точка А (т. А) (см. рис. 2) будет приложен импульс напряжения треугольной формы  $MNK$  с крутым фронтом, определяемым временем срабатывания разрядника  $P_1$ .

При условии, что разрядник  $P_2$  срабатывает первым, напряжение с крутым фронтом будет приложено к концу высоковольтной обмотки – т. А (по отношению к началу – т.  $X$ ).

Из рассмотренного примера следует, что продольные перенапряжения, действующие между проводом и землей, при срабатывании разрядников защиты изоляции трансформатора, установленных на его входе, преобразуются в поперечные перенапряжения с крутыми фронтами, действующими между проводами на вход трансформатора.

В результате воздействия поперечных перенапряжений (между проводами) в слоях высоковольтной обмотки происходит неравномерное распределение напряжения по длине слоев обмотки, возникают градиенты перенапряжений, которые пробивают изоляцию высоковольтной обмотки и выводят трансформатор из строя [4].

Рассмотренный процесс срабатывания средств защиты изоляции устройств и линий от перенапряжений показывает, что из-за несовершенства технических характеристик защиты от перенапряжений (разброс параметров по времени срабатывания) происходит преобразование продольных перенапряжений (провод–земля) в поперечные перенапряжения (провод–провод) с крутыми фронтами, обладающие высокой проникающей способностью. Поперечные перенапряжения на уровне рабочих сигналов приводят к

нарушению алгоритма работы устройств и являются помехами. При разработке технических средств для защиты от помех должны использоваться экраны и фильтры.

При близких разрядах молнии в землю и между облаками магнитное поле тока молнии смещает свободные носители зарядов в проводящей среде к одной стороне проводника, тем самым создавая разность потенциалов на концах проводника, которая называется продольной электродвижущей силой

(ЭДС). При этом напряжение на концах проводников по отношению к земле равно половине продольной ЭДС. Так как расстояние между проводниками одной цепи мало, по сравнению с расстоянием до канала тока молнии, то продольные ЭДС, наводимые на разных проводниках одной цепи, будут примерно одинаковые. В дальнейшем процесс преобразования продольных перенапряжений в поперечные перенапряжения аналогичен процессу, рассмотренному на рис. 3.

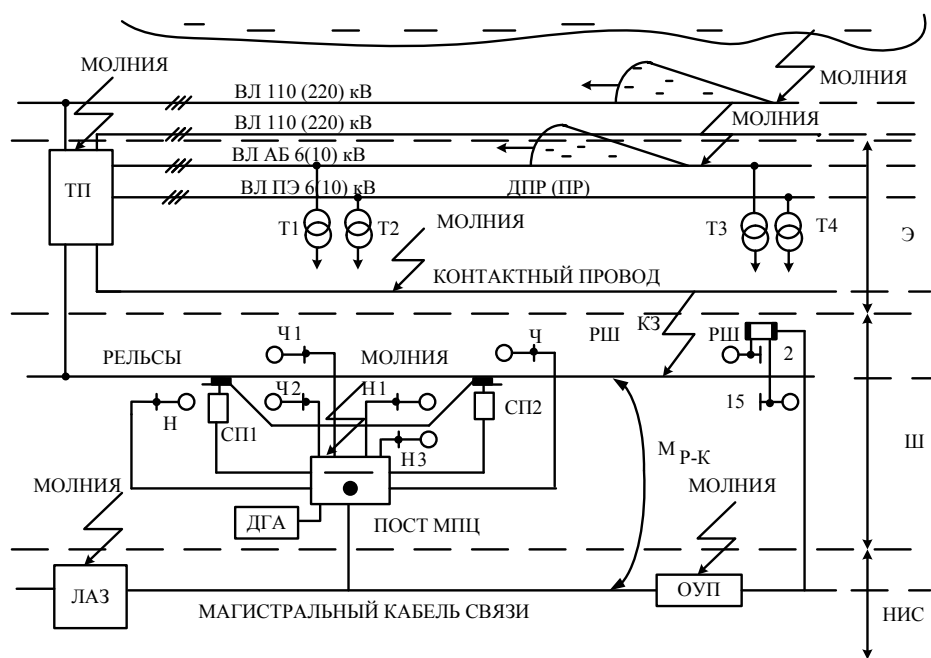


Рис. 1 Участок железной дороги

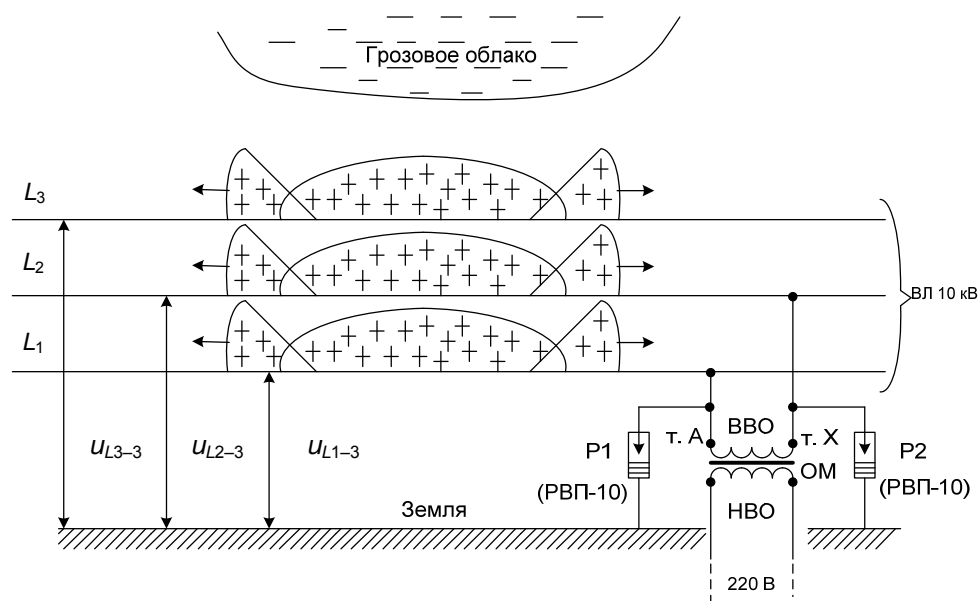


Рис. 2 Схема воздействия волн атмосферных перенапряжений на высоковольтную обмотку трансформатора ОМ



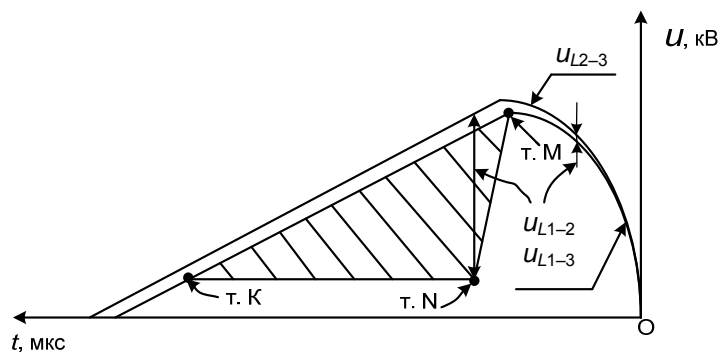


Рис. 3 Форма напряжения, действующая на высоковольтную обмотку трансформатора

### 3 Задачи концепции защиты от перенапряжений

*Концепция* – это определенный способ понимания, толкования каких-либо процессов, единый замысел и руководящая идея их развития и освещения [5].

Концепция защиты объектов инфраструктуры обеспечения движения поездов от атмосферных и коммутационных перенапряжений – это система цели, задач, принципов и основных направлений работ на заданный период, определяющих приоритеты, средства и пути решения проблемы защиты.

Концепция защиты объектов инфраструктуры обеспечения движения поездов от перенапряжений должна включать: организационные меры; нормативную базу; методическое обеспечение; типовые материалы проектирования; технические средства; обучение персонала; техническую эксплуатацию; составляющие основных затрат.

Организационные меры предполагают: создание единой дирекции инфраструктуры обеспечения движения поездов; диспетчеризацию управления технической эксплуатацией инфраструктуры; создание общей службы метрологического обеспечения; создание единых испытательных центров средств и систем защиты от перенапряжений; создание единых дорожных мобильных высоковольтных комплексов для испытаний эффективности защиты от перенапряжений и заземлителей на реальных объектах.

Нормативная база должна обеспечиваться разработкой:

- требований к изоляции и токонесущей способности кабелей, оборудования и вводов устройств;

- норм испытательных воздействий токов молнии, атмосферных и коммутационных перенапряжений для различных зон электромагнитной обстановки, согласно зонной концепции защиты устройств от перенапряжений [6];

- импульсных норм молниезащитных заземлений;

- норм по применению внешней молниезащиты объектов инфраструктуры обеспечения движения поездов;

- требований к системам защиты для районов с различной грозовой активностью.

Необходимо переработать существующие нормативные документы по защите от перенапряжений с учетом современных представлений о характеристиках молнии. Так как длительные разряды молнии переносят заряды, против которых современные средства неэффективны, нужно создавать новые методы защиты:

- активную защиту вводов питания через управление источниками электропитания с использованием системы локации гроз;

- защищенные подходы к трансформаторам питания;

- системы защиты от перенапряжений с использованием защитных свойств линий и функциональных или дополнительно установленных трансформаторов.

Методическое обеспечение этих систем включает разработку методики испытаний:

- систем защиты от перенапряжений в испытательных центрах;

- систем защиты на реальных объектах с помощью мобильных высоковольтных комплексов;

- импульсных характеристик заземлителей с помощью мобильных высоковольтных комплексов.

Типовые материалы проектирования должны отражать:

- применение средств защиты от перенапряжений с учетом интенсивности движения поездов и риска потерь при отказе устройств от воздействия перенапряжений для разных категорий железных дорог (В – высокая эффективность защиты рекомендуется для дорог с особо интенсивным движением и высокой грозовой активностью; С – средняя эффективность защиты – для дорог с интенсивным движением поездов и низкой грозовой активностью; Д – допустимая эффективность защиты – для малоинтенсивных линий, где отказы средств защиты и устройств не приводят к значительным экономическим потерям, связанным с задержками поездов);

- использование различных средств защиты в зависимости от продолжительности гроз и характеристик молний в рассматриваемом районе, при этом для сбора статистических данных о молнии – частоте ударов в землю, силе тока, полярности разрядов – следует применять автоматические радиотехнические системы локации гроз;

- применение для особо ответственных объектов системы слежения за перемещением грозовых фронтов с переходом на резервное питание от автономных источников при близких грозовых разрядах.

Технические средства включают широкий спектр:

- устройств защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП) защищаемых устройств с рабочим напряжением до 1000 В (фирмы: DENN, NAKEL, ERICO, PHOENIX, и др.);

- устройств защиты изоляции высоковольтных цепей (более 1000 В) – разрядников, ограничителей перенапряжений (ОПН), длинноискровых разрядников.

Средства защиты на высоковольтных линиях и на вводах питания устройств железнодорожной автоматики, телемеханики и связи должны быть объединены в системы защиты, а согласование каскадов защиты необходимо проводить путем машинного моделирования.

Система устройств защиты от перенапряжений – скоординированная система правильно подобранных и установленных устройств защиты от перенапряжений, предназначенных для снижения числа отказов электрических и электронных систем [7].

Для обучения персонала требуется подготовить учебные пособия по созданию систем защиты от перенапряжений с использованием компьютерного эксперимента; в дисциплины специальности 190901.65 «Системы обеспечения движения поездов» ввести лекции по защите устройств от перенапряжений; слушателей Института повышения квалификации знакомить с новыми достижениями в области защиты от перенапряжений.

При технической эксплуатации устройств предлагается:

- применять метод технического обслуживания средств защиты от атмосферных перенапряжений по фактам воздействия молнии, а не ежегодно перед грозовым сезоном, при этом характеристики воздействия молнии следует определять с помощью систем локации гроз;

- проводить удаленный мониторинг состояния и количества срабатываний устройств защиты от перенапряжений с возможностью телемеханического управления резервом защиты;

- использовать для обоснования требования к защите от молнии на участках с высокой грозовой активностью статистические данные системы локации гроз;

- управлять источниками питания устройств с переключением на резервные автономные источники питания при близких грозовых разрядах, при этом степень опасности атмосферного электричества определять системой локации гроз.

К составляющим основных затрат следует отнести:

- создание испытательных центров средств и систем защиты отдельно по воздействию молнии и по воздействию токов короткого замыкания в тяговых сетях;

- создание дорожных мобильных высоковольтных испытательных комплексов на базе вагона-лаборатории;

- переработку существующих нормативных документов и создание объединенных

документов по защите от атмосферных и коммутационных перенапряжений объектов и устройств инфраструктуры обеспечения движения поездов;

- разработку новых документов, например, по расчету рисков дорог при отказах устройств в результате воздействия перенапряжений;

- создание электронного банка компьютерных моделей объектов инфраструктуры для проведения компьютерного моделирования систем защиты от перенапряжений.

Разрабатываемая концепция защиты объектов инфраструктуры должна предусматривать воздействие на перенапряжения в источнике, канале распространения, на вводе и в самом устройстве.

Линии и трансформаторы для волн перенапряжений являются устройствами функциональной защиты. В линии проявляется поверхностный эффект для высокочастотных составляющих волн перенапряжений. Обмотки трансформаторов обладают индуктивностью рассеивания, межслойной емкостью и емкостью на корпус, который заземляется. Магнитопровод трансформаторов обладает магнитной вязкостью и насыщением. При насыщении магнитопровода резко уменьшается количество энергии, передаваемой во вторичную обмотку трансформатора. Эффект магнитной вязкости состоит в том, что подвижность доменов магнитного материала различна. При определенной скорости нарастания тока намагничивания не все домены успевают ориентироваться по полю, создаваемому током намагничивания, при этом индуктивность намагничивания трансформатора уменьшается.

Предлагается в каналах распространения энергии перенапряжений создавать системы защиты от перенапряжений, в которых бы учитывались защитные свойства функциональных линий и трансформаторов (функциональная защита), и дополнительную защиту в виде устройств защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП). Для высокой эффективности таких систем защиты их элементы должны быть согласованы по пропускной способности по заряду (току) и остающемуся напряжению на средстве защиты, допустимому для следующего каскада защиты или

для защищаемых устройств. Согласование элементов функциональной и дополнительной защиты предлагается проводить с помощью компьютерного эксперимента.

Эксперимент предполагает выбор среды моделирования (PSpice, Simulink и т. п.) или метода анализа электрических схем. Другим условием является создание электронной базы компьютерных моделей объектов инфраструктуры при условии воздействия энергии атмосферных и коммутационных перенапряжений. Оценивать адекватность разработанных компьютерных моделей необходимо в испытательных центрах, способных создавать воздействия, аналогичные воздействию энергии атмосферных перенапряжений и токов и переходных процессов в тяговой сети и на ВЛ при аварийных режимах.

Разработка систем защиты от перенапряжений объектов инфраструктуры предполагает знание основ моделирования на компьютере и выбранной среды моделирования, физики процессов, происходящих в защищаемых устройствах и элементах защиты при воздействии предельных величин скоростей изменения характеристик энергии перенапряжений. При действии таких энергий проявляются эффекты близости, поверхностный, эффект насыщения и вязкости магнитных материалов. Создание базы знаний компьютерных моделей объектов инфраструктуры позволит широко использовать компьютерный эксперимент для разработки систем защиты от перенапряжений.

Современные знания о молнии показывают, что ее характеристики многообразны: полярность разряда, величины зарядов, амплитуда и скорость нарастания тока и т. д. Современные технические средства дают возможность получать характеристики молнии в реальном масштабе времени по мере созревания и движения грозового фронта. Системы локации гроз позволяют определять основные характеристики молний на расстоянии до 200 км с ошибкой по расстоянию до 1 км. Создание такой системы на железнодорожном транспорте даст возможность определить наиболее активные по воздействию грозы участки железной дороги и обосновать требования к защите от атмосферных перенапряжений на таких участках.

Знания о характеристиках гроз будут способствовать реализации метода обслуживания средств защиты от грозовых перенапряжений по факту воздействия. После прохождения грозового фронта с определенными характеристиками эксплуатационная бригада осматривает объекты и измеряет характеристики средств защиты без их отключения, например, при помощи тепловизора. Это необходимо делать и потому, что токи утечки ограничителя перенапряжения (ОПН) на ВЛ, которые выше нормы, создают поле помех, мешающее работе систем радиосвязи, все более широко применяющихся для построения систем управления движением поездов и в системах учета электроэнергии.

Система локации гроз позволяет реализовать активный метод защиты вводов питания устройств инфраструктуры обеспечения движения поездов при близких грозовых разрядах. На время прохождения грозового фронта с опасными характеристиками разрядов устройства подсистем Ш и НИС отключаются от внешних фидеров питания энергоснабжения и переходят на питание от автономных источников – устройств бесперебойного питания или дизель-генераторного агрегата. При этом ВЛ рассматриваются как антенны, принимающие прямые удары молнии и индуцированные перенапряжения при электростатической индукции грозовых облаков и при электромагнитной индукции близких грозовых разрядов в объекты и землю.

Создание системы удаленного мониторинга характеристик средств защиты и телемеханического управления резервом средств защиты позволит снизить затраты на техническую эксплуатацию защиты от перенапряжений и повысить надежность работы устройств и инфраструктуры перевозочного процесса.

Здания и сооружения, где располагаются компьютеры и микропроцессорные устройства, должны иметь защиту от прямых ударов молнии (внешняя защита) и от вторичного проявления молнии (внутренняя защита). К таким зданиям и сооружениям должны предъявляться единые требования независимо от подсистем инфраструктуры обеспечения движения поездов.

В каждой подсистеме есть специфичные задачи защиты объектов и персонала от пе-

ренапряжений. Конструкция заземлителей тяговых подстанций имеет особенности построения (сеточные заземлители) с учетом больших величин токов короткого замыкания. Такие задачи защиты от перенапряжений должны найти отражение в документах концепции защиты от перенапряжений объектов инфраструктуры. Подсистема Э имеет протяженные высоковольтные линии и контактные сети, расположенные выше объектов подсистем Ш и НИС. В качестве поддерживающих конструкций таких линий чаще используются железобетонные опоры, которые внутри имеют металлические стержни, связанные с землей. На таких опорах наиболее вероятно скопление зарядов при электростатическом влиянии грозовых облаков и прямой удар молнии в опору. После удара молнии в опору происходит перекрытие изоляции и распространение волн перенапряжений по контактному проводу и ВЛ. Объекты подсистемы Э наиболее часто подвергаются прямым ударам молнии. Контактная сеть защищает от прямых ударов молнии объекты, расположенные ниже, и для объектов подсистем Ш и НИС создает зону защиты  $O_B$  в соответствии с зонной концепцией защиты от перенапряжений [6].

Объединение подсистем Э, Ш и НИС в инфраструктуру обеспечения движения поездов позволяет направить усилия хозяйств на решение проблемы по защите объектов и устройств инфраструктуры от воздействия атмосферных и коммутационных перенапряжений на этапе широкого применения на железнодорожном транспорте микроэлектронных устройств для управления, хранения, обработки и передачи информации. Единое руководство инфраструктурой даст возможность согласовать интересы ранее разрозненных подсистем Э, Ш и НИС. Например, до структурных изменений устройства защиты от перенапряжений, устанавливаемые на высоковольтных линиях 6 (10) кВ, всегда решали только вопросы защиты изоляции высоковольтного оборудования (трансформаторов, разъединителей и др.). Подсистемы Ш и НИС организовывали защиту от перенапряжений на вводах питания своих устройств.

Инфраструктурные изменения позволят создавать высокоэффективные и надежные системы защиты от перенапряжений, объединяющие устройства защиты, ранее разделенные ведомственными интересами подсистем.

#### 4 Заключение

Реализация задач концепции защиты объектов инфраструктуры обеспечения движения поездов с помощью единого методологического подхода позволит:

- решить проблему защиты объектов и персонала от грозовых и коммутационных перенапряжений на этапе широкого применения компьютеров и микропроцессорных устройств;

- реализовать метод технического обслуживания объектов и средств защиты по факту воздействия молнии, характеристики которых определяются по системе локации гроз;

- реализовать активный метод защиты вводов питания объектов, при котором на время близких опасных грозовых разрядов объекты отключаются от внешних фидеров питания и переходят на автономные источники бесперебойного питания;

- создать высоконадежные системы защиты от перенапряжений (согласование элементов систем защиты предлагается проводить с помощью моделирования, а точечную оценку адекватности компьютерных моделей – с помощью эксперимента на физических моделях в специализированных испытательных центрах, при этом элементы

защиты, относимые ранее к разным подсистемам, должны быть объединены в единой системе защиты);

- преодолеть ведомственные интересы подсистем, при которых, например, подсистема электрификации и электроснабжения, решая задачу защиты изоляции высоковольтного оборудования (разъединителей, трансформаторов и др.), не учитывала интересы подсистем автоматики и телемеханики, информатизации и связи, защищающих микроэлектронные устройства, подключенные к той же высоковольтной линии.

#### Библиографический список

1. Бадер, М. П. Электромагнитная совместимость / М. П. Бадер. – Москва : УМПК МПС, 2002. – 638 с.
2. Кравченко, В. И. Грозозащита радиоэлектронных средств : справочник / В. И. Кравченко. – Москва : Радио и связь, 1991. – 264 с.
3. Основы электротехники / К. А. Круг, А. И. Даревский, Г. В. Зевеке и др.; под ред. К. А. Круга. – Москва–Ленинград : Госэнергоиздат, 1952. – 422 с.
4. Геллер, Б. Импульсные процессы в электрических машинах / Б. Геллер, А. Веверка. – Москва : Энергия, 1973. – 440 с.
5. Словарь иностранных слов. – Москва : Русский язык, 1981. – 624 с.
6. Концепция защиты устройств железнодорожной автоматики и телемеханики от перенапряжений / А. Б. Никитин, О. А. Наседкин, А. Д. Манаков, В. А. Шатохин // Ж.-д. трансп. Сер. «Сигнализация и связь». ЭИ/ЦНТИ. – 2006. – Вып. 3. – С. 1–25.
7. IEC 62305-1, Ed. 1: Protection against lightning – Part 1: General principles, 2010. – 67 p.

## Методика комплексной оценки показателей эффективности систем технического диагностирования и мониторинга

С. В. Бочкарев, А. А. Лыков, Д. С. Марков

Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»

**Аннотация.** Предложена методика комплексной оценки показателей эффективности систем технического диагностирования и мониторинга (СТДМ) устройств и систем железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ). Она базируется на расчете многоуровневой системы показателей с учетом особенностей объектов диагностирования.

**Ключевые слова:** системы технического диагностирования и мониторинга; показатели эффективности; показатели надежности; методика и алгоритм комплексной оценки показателей эффективности.

### 1 Введение

В последние десятилетия на железных дорогах России осуществляется поэтапное внедрение и модернизация СТДМ ЖАТ.

Внедрение СТДМ, которые осуществляют непрерывный контроль работоспособности устройств железнодорожной автоматики, позволяет сократить количество отказов и снизить эксплуатационные расходы на техническую эксплуатацию систем ЖАТ.

В конечном счете, основным назначением СТДМ является обеспечение безопасной и безотказной работы устройств ЖАТ.

Для достижения вышеперечисленных целей СТДМ должна решать такие функциональные задачи, как:

- выявление отказов и сбоев в работе устройств ЖАТ;
- прогнозирование технического состояния устройств ЖАТ (выявление предотказных состояний);
- сокращение времени восстановления устройств ЖАТ при отказах.

Для решения вышеперечисленных функциональных задач СТДМ должна:

- автоматически измерять параметры и оценивать характеристики устройств ЖАТ;
- выполнять автоматическую регистрацию изменений параметров или состояний устройств ЖАТ;

- протоколировать режимы работы;
- осуществлять сбор, обработку, передачу, хранение и отображение диагностической информации.

Кроме того, СТДМ должны интегрироваться с действующими и создаваемыми информационными и управляющими системами различных служб железнодорожного транспорта.

Принятие решений СТДМ должно проводиться на основе системного подхода, т. е. на основе количественной оценки показателей эффективности СТДМ для различных вариантов ее организации.

Существует несколько подходов к оценке эффективности систем диагностирования.

1. *Определение показателей качества работы СТДМ* [1].

Методы, реализующие данный подход, позволяют определить показатели качества работы СТДМ путем анализа оценки состояний диагностируемых устройств. Недостаток подхода – отсутствие оценки показателей надежности диагностируемой системы.

2. *Определение показателей надежности эксплуатируемой системы* [2].

Методы рассматриваемого подхода позволяют оценить влияние характеристик СТДМ на бесперебойность и безопасность работы диагностируемых устройств и систем.

С точки зрения диагностирования систем ЖАТ недостаток подхода – отсутствие оценки влияния системы на безопасность и бесперебойность движения поездов; затраты, связанные с техническим обслуживанием.

3. *Определение показателей безопасности и бесперебойности процесса, управляемого эксплуатируемой системой.*

В этом случае можно оценить влияние сокращения отказов эксплуатируемой системы ЖАТ на сбои в движении поездов при внедрении СТДМ. При таком подходе рассматривают коэффициент безопасности и

коэффициент технического использования при отсутствии и внедрении СТДМ.

Недостаток подхода – не учитывается изменение эксплуатационных расходов при внедрении СТДМ.

4. *Определение экономической эффективности системы диагностирования* [3].

Суть метода заключается в сравнении сокращения потерь от отказов СЖАТ и затрат на внедрение СТДМ.

Недостаток подхода – не учитываются показатели безопасности и безотказности работы устройств, безопасности и бесперебойности движения поездов.

Таким образом, представляется целесообразным разработать методику комплексной оценки эффективности СТДМ, которая бы учитывала и особенности эксплуатации устройств СЖАТ, такие как:

- непрерывный характер работы;
- территориальная рассредоточенность;
- длительный срок службы;
- сетевое внедрение;
- сложные условия эксплуатации.

## 2 Методика оценки эффективности

### 2.1 Комплексная система показателей эффективности СТДМ

Работа СТДМ должна оцениваться на основе анализа показателей надежности устройств ЖАТ и эффективности перевозочного процесса с учетом особенностей объекта диагностирования. Для таких СТДМ концепция оценки эффективности базируется на иерархической многоуровневой системе взаимосвязанных показателей и характеристик, в которой показатели данного уровня рассчитываются только с использованием характеристик предыдущего. Причем система должна включать на нижнем уровне показатели оценки собственно СТДМ (например, вероятность правильной оценки состояния диагностируемых устройств), на следующем – показатели надежности диагностируемых устройств (например, коэффициент технического использования и коэффициент безопасности устройств ЖАТ), на верхнем уровне – показатели безопасности и бесперебойности движения поездов. Предлагаемая

в работе система показателей представлена на рис. 1 и базируется на сформулированной выше концепции. По мнению авторов, она позволяет наиболее полно оценить СТДМ в соответствии с ее назначением. Система является иерархической и включает 6 уровней.

К первому уровню относятся показатели безопасности и бесперебойности движения поездов. Показатель бесперебойности  $S_3$  определяется как вероятность задержки поездов  $P_{зп}$ .

Под задержкой движения поездов будем понимать событие, когда время восстановления  $T_v$  превысило некоторое допустимое значение времени  $T_{доп}$ .

Пусть  $T_{пер}$  – период графика движения поездов;  $V_{п}$  – количество поездов в графике движения;  $T_p$  – время, в течение которого устройство находилось в работоспособном состоянии:  $T_p = K_{ти} \cdot T_{пер}$ . Тогда количество поездов, которые проследуют без задержек:

$$V_{сп} = \frac{V_{п} T_p}{T_{пер}}. \quad (1)$$

Вероятность задержки поезда

$$P_{зп}(T_c) = \frac{V_{п} - V_{сп}}{V_{п}} \cdot K_{оз}, \quad (2)$$

где  $K_{оз}$  – вероятность того, что произошедший отказ приведет к задержке поезда.

$$K_{оз} = \frac{N_3}{N_0},$$

где  $N_0$  – общее количество отказов;

$N_3$  – количество отказов, которые привели к задержке поездов.

Безопасность движения ( $S_6$ ) – свойство движения поезда не переходить в опасное состояние. Показатель безопасности движения поездов – вероятность следования поезда без перехода его в опасное состояние  $P(T_c)$  за интервал времени  $T_c$ :

$$P(T_c) = 1 - Q(T_c), \quad (3)$$

где  $Q(T_c)$  – вероятность движения поездов с переходом в опасное состояние за время  $T_c$ .

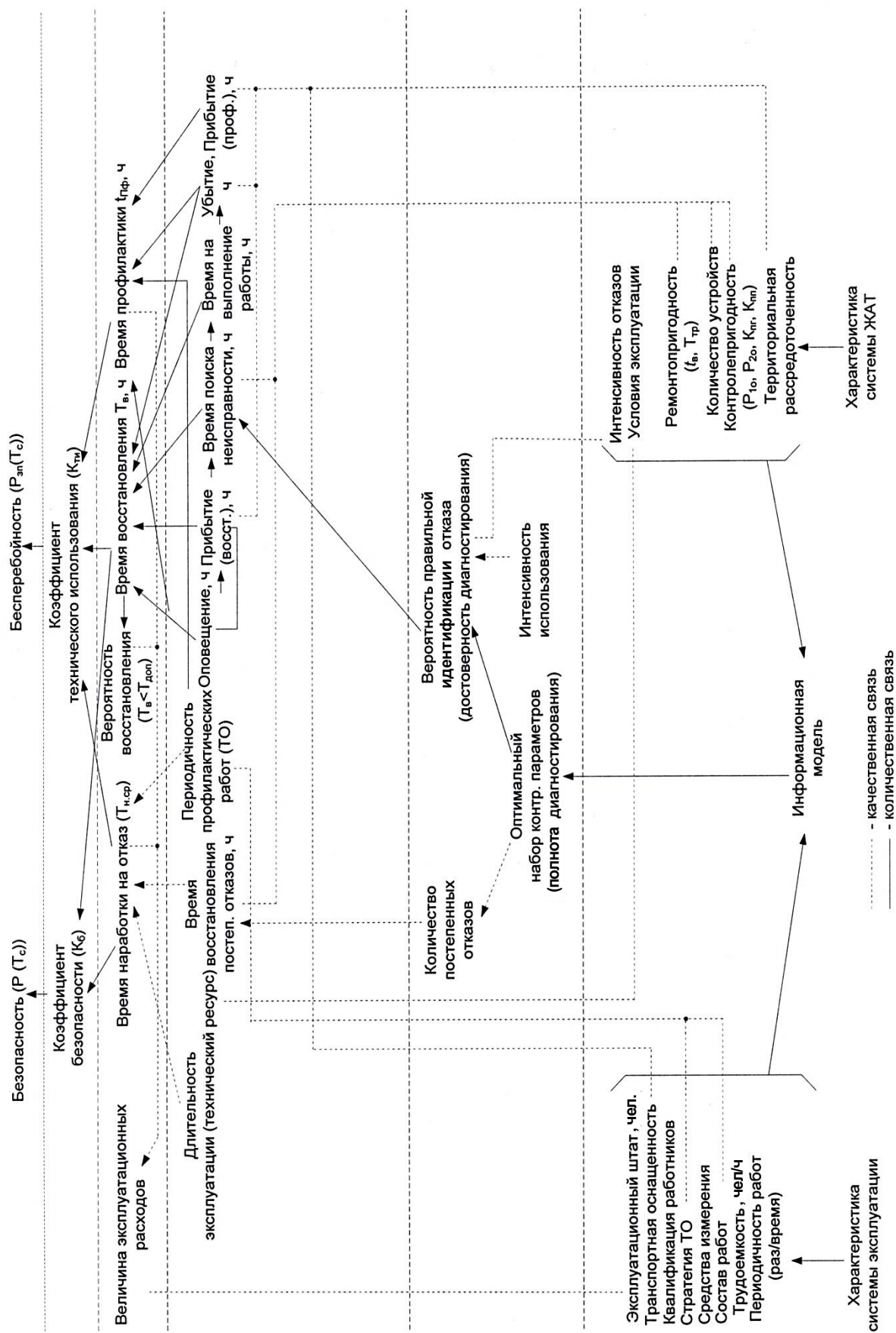


Рис. 1 Система показателей эффективности СТДМ



$$Q(T_c) = P_{oo}(T_c) \cdot (1 - K_6), \quad (4)$$

где  $K_6$  – коэффициент безопасности, отражающий вероятность того, что система окажется в работоспособном или защитном состоянии в произвольный момент времени;

$P_{oo}$  – вероятность того, что опасный отказ вызовет переход движения поездов в опасное состояние за интервал времени  $T_c$ .

$$P_{oo}(T_c) = \frac{N_{оп}(T_c)}{N_o(T_c)}, \quad (5)$$

где  $N_{оп}$  – количество опасных отказов, которые привели к переходу в опасное состояние

Безопасность движения зависит от количества отказов, которые приводят к опасным состояниям, и от интенсивности движения.

На втором уровне выделим показатели эффективности, связанные с надежностью [4] устройств СЖАТ, которые обеспечивают безопасность движения:

- коэффициент технического использования [4]:

$$K_{ти} = \frac{T_{нсп}}{T_{нсп} + T_v + T_{пф}}, \quad (6)$$

где  $T_{нсп}$  – средняя наработка на отказ;

$T_v$  – среднее время восстановления;

$T_{пф}$  – математическое ожидание времени нахождения объекта в отключенном состоянии для производства профилактических работ;

- коэффициент безопасности [4], определяемый как

$$K_6 = \frac{T_{бсп}}{T_{бсп} + T_v}, \quad (7)$$

где  $T_{бсп}$  – средняя наработка на опасный отказ.

Величина  $T_v$  [5] определяется следующей суммой:

$$T_v = t_{опв} + t_{впб} + t_{тз} + t_{срп} + t_{сру} + t_{уб}, \quad (8)$$

где  $t_{опв}$  – время оповещения о неисправности;

$t_{срп}$  – среднее время поиска неисправности;

$t_{сру}$  – время устранения неисправности;

$t_{впб}$  – среднее время прибытия к объекту при восстановлении;

$t_{уб}$  – среднее время убытия от объекта после восстановления;

$t_{тз}$  – техническая задержка [5].

Средняя наработка на опасный отказ:

$$T_{бсп} = \frac{1}{\omega(t)} = \frac{T_c}{N_{oo}(T_c)}, \quad (9)$$

где  $N_{oo}$  – количество опасных отказов за период  $\Delta t$ .

На третьем уровне рассмотрены показатели эффективности, которые отражают техническое состояние устройств СЖАТ в процессе эксплуатации и техническое обслуживание (ТО):

- время наработки на отказ:

$$T_{нсп} = \frac{1}{\omega(t)} = \frac{T_c}{N_o(T_c)}; \quad (10)$$

- вероятность восстановления  $S(t)$  – вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния объекта не превысит заданного времени  $t$ :

$$S(t) = P(T_v < T_{доп});$$

- время профилактики  $T_{пф}$ :

$$T_{пф} = t_{поб} + t_p + t_{уб}, \quad (11)$$

где  $t_{поб}$  – среднее время прибытия к объекту при профилактике;

$t_p$  – время выполнения самой работы;

- время восстановления  $T_v$ ;

К четвертому уровню относятся показатели, определяющие количество и качество ТО:

- длительность эксплуатации;

- время восстановления работоспособного состояния при возникновении постепенных отказов;

- периодичность профилактических работ;

- временные составляющие, характеризующие время восстановления и время профилактики.

На пятом уровне выделены характеристики СТДМ:

- оптимальный набор контролируемых параметров (полнота диагностирования).

Показатель полноты диагностирования  $D_n$  рассчитывается как

$$D_n = \frac{\overline{\Pi_n}}{\Pi}, \quad (12)$$

где  $\Pi$  – общее число диагностических параметров, которые характеризуют состояние объекта диагностирования (ОД);

$\overline{\Pi_n}$  – число измеряемых диагностических параметров.

- количество постепенных отказов [6];
- вероятность правильной идентификации отказа (достоверность диагностирования) [1]:

$$D_d = \frac{P_o^2 (P_T + q_p)}{P_o^2 (P_T + q_p) + Q_o (q_{no} P_T + Q_o q_p)}, \quad (13)$$

где  $P_o$  – вероятность безотказной работы ОД;

$Q_o$  – вероятность отказа ОД;

$P_T$  – вероятность безотказной работы СТДМ;

$q_{no}$  – вероятность необнаружения отказов;

$q_p$  – вероятность того, что технические средства диагностирования (ТСД) из-за возникших дефектов оценивают объект как работоспособный:

$$q_p = \frac{\sum_{i=1}^{m_e} \lambda_i}{\sum_{i=1}^L \lambda_i},$$

где  $m_e$  – количество элементов, отказ в которых приводит к одному типу проявления неисправности;

$L$  – общее число измерительных блоков СТДМ;

$\lambda_i$  – интенсивность отказа  $i$ -го элемента.

Достоверность диагностирования позволяет определить коэффициент эффективности поиска  $K_{\Pi}$  [7]:

$$K_{\Pi} = \frac{\sum_{i=1}^{m_p} t_{\Pi i}}{D_d}, \quad (14)$$

где  $t_{\Pi}$  – время проверки элемента, неисправность которого привела к отказу объекта диагностирования.

Согласно рассматриваемому методу проверка начинается с самого ненадежного или быстро проверяемого элемента. Тогда среднее время поиска неисправности:

$$t_{\text{ср.п}} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{\Pi i}}{n}, \quad (15)$$

где  $n$  – количество типов проявления неисправности.

На шестом уровне выделены характеристики и показатели системы эксплуатации устройств ЖАТ, которые составляют информационную модель объекта диагностирования, включающую в себя характеристики СТДМ, такие как: набор контролируемых параметров, алгоритмы поиска неисправностей, алгоритмы фиксации предотказных состояний, контроль выполнения графика ТО, контроль функционирования устройства; информационные характеристики эксплуатируемой системы, такие как статистика результатов измерения параметров устройства, статистика нарушений в работе устройства, способы проведения измерений параметров устройства, техническая оснащенность.

К расчетным характеристикам системы ЖАТ относятся:

1. Контролепригодность [8]:

- вероятность обнаружения отказа – вероятность фиксации отказа в момент его возникновения  $P_{10}$ :

$$P_{10} = \frac{N_p}{N_o}, \quad (16)$$

где  $N_p$  – количество отказов, фиксируемых в момент их возникновения;

$N_o$  – общее количество отказов;

- вероятность фиксации отказа в момент срабатывания устройства  $P_{20}$ :

$$P_{20} = \frac{N_c}{N_o}, \quad (17)$$

где  $N_c$  – количество отказов, фиксируемых в момент срабатывания устройства;

- коэффициент глубины поиска дефекта:

$$K_{\Pi} = \frac{F}{R}, \quad (18)$$

где  $F$  – число составных узлов устройства, в которых определяется отказ;

$R$  – общее число составных узлов устройства, в которых требуется определить отказ;

- коэффициент полноты проверки исправности:

$$K_{\Pi} = \frac{\lambda_k}{\lambda_o}, \quad (19)$$

где  $\lambda_k$  – суммарная интенсивность отказов проверяемых составных частей изделия;

$\lambda_o$  – суммарная интенсивность отказов всех составных узлов устройства;

▪ средняя продолжительность поиска отказа  $t_{\text{срп}}$ .

2. Ремонтопригодность [9]:

▪ среднее время восстановления [10]:

$$t_{\text{в}} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i \lambda_i}{\sum_{i=1}^N \lambda_i}, \quad (20)$$

где  $\lambda_i$  – интенсивность отказов составной части (или блока), замена которой возможна в эксплуатации в случае отказа;

$t_i$  – время, которое необходимо на выполнение работ по восстановлению работоспособности изделия в случае отказа составной части (или блока);

$N$  – количество составных частей (или блоков), которые могут быть заменены в эксплуатации в случае их отказа.

Статистически интенсивность отказов определяется по формуле [4]:

$$\lambda(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{\text{ср}} \Delta t}, \quad (21)$$

где  $N_{\text{ср}} = \frac{N_i + N_{i+1}}{2}$  – среднее число исправно работающих объектов в интервале  $\Delta t$ ;

$N_i$  – число исправных объектов в момент времени  $t - \frac{\Delta t}{2}$ ;

$N_{i+1}$  – число исправных объектов в момент времени  $t + \frac{\Delta t}{2}$ ;

$n(\Delta t)$  – число объектов, отказавших в интервале времени от  $t - \Delta t / 2$  до  $t + \Delta t / 2$ ;

▪ средняя трудоемкость восстановления  $T_{\text{тр}}$  [10].

$$T_{\text{тр}} = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i (t_{1i} m_{1i} + t_{2i} m_{2i} + \dots + t_{7i} m_{7i})}{\sum_{i=1}^N \lambda_i}, \quad (22)$$

где  $m_{1i}, m_{2i}, \dots, m_{7i}$  – количество человек, занятых при выполнении ремонта;

$t_{1i}$  – затраты времени на подготовку изделия к ремонту;

$t_{2i}$  – затраты времени на выполнение работ, обеспечивающих доступ к отказавшей составной части или подсистеме;

$t_{3i}$  – затраты времени на снятие отказавшего блока;

$t_{4i}$  – затраты времени на установку исправного блока взамен отказавшего;

$t_{5i}$  – затраты времени на приведение изделия в состояние готовности для проведения контроля технического состояния после ремонта;

$t_{6i}$  – затраты времени на проведение контроля после ремонта;

$t_{7i}$  – затраты времени на приведение изделия в работоспособное состояние после текущего ремонта.

К расчетной характеристике системы эксплуатации относится трудоемкость (затраты труда на измеритель):

$$v_i = \sum_{j=1}^M \left( \sum_{i=1}^{K-X} 1,07 \cdot n_{\text{впр}} f \cdot 1,226 + \sum_{l=1}^X 1,07 \cdot n_{\text{впр}} f \cdot 1,226 \right), \quad (23)$$

где  $M$  – количество устройств одного класса;

$K$  – количество регламентных работ, утвержденных инструкцией ЦШ-720-09;

$X$  – количество автоматизированных проверок;

$n_{\text{впр}}$  – норма времени на измеритель;

1,07 – разница трудозатрат за 4 недели и месяц;

1,226 – коэффициент, учитывающий время на подготовительно-заключительные действия ( $T_{\text{пз}}$ ), время обслуживания рабочего места ( $T_{\text{об}}$ ), время на отдых и личные нужды ( $T_{\text{от.л}}$ ).

На основе характеристик (квалификация работников, стратегия ТО, транспортная оснащенность, средства измерения) и показателей (состав, периодичность, трудоемкость профилактических работ) эксплуатации устройств ЖАТ определяется величина эксплуатационных расходов.

Изменение эксплуатационных расходов на техническое содержание и обслуживание технических средств ЖАТ определяется разницей между эксплуатационными расходами до внедрения СТДМ и с учетом внедрения средств автоматизации.

Значения  $M$ ,  $N_i$ ,  $N_{i+1}$ ,  $N_p$ ,  $N_o$ ,  $N_{oo}$ ,  $N_c$ ,  $N_{оп}$ ,  $N_3$  определяются по данным подсистемы учета отказов АСУ-III.

Значения  $F$ ,  $R$ ,  $m_i$ ,  $f$ ,  $n_{вpi}$ ,  $K$ ,  $X$  определены в Инструкции по техническому обслуживанию устройств ЖАТ ЦШ-720-09.

## 2.2 Алгоритм оценки показателей эффективности СТДМ

Разработанная система показателей эффективности СТДМ позволила синтезировать алгоритм их расчета (рис. 2) по предложенным на рис. 1 уровням снизу вверх.

*Исходные данные:*

- характеристики системы эксплуатации объекта диагностирования ( $F$ ,  $R$ ,  $m_i$ ,  $f$ ,  $n_{в.i}$ ,  $K$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $\Pi$ ,  $\overline{\Pi_i}$ );
- статистика отказов ( $N_i$ ,  $N_{i+1}$ ,  $N_p$ ,  $N_o$ ,  $N_{oo}$ ,  $N_c$ ,  $N_{оп}$ ,  $N_3$ );
- временные составляющие профилактических и восстановительных работ ( $t_{ппб}$ ,  $t_{впб}$ ,  $t_{уб}$ ,  $t_{тз}$ ,  $t_{опв}$ ,  $t_{пр}$ );
- интенсивность отказов узлов объекта диагностирования ( $\lambda_k$ ,  $\lambda_o$ ,  $\lambda_i$ );
- количество человек, занятых выполнением технического обслуживания ( $m_i$ );
- список автоматизированных измерений объекта диагностирования ( $X$ );
- количество поездов в графике движения поездов ( $V_p$ );
- период анализа графика движения поездов ( $T_{пер}$ ,  $T_c$ );
- общее число измерительных блоков СТДМ ( $L$ );
- вероятность безотказной работы СТДМ ( $P_T$ ).

**VI уровень:** построение информационной модели, расчет показателей систем эксплуатации устройств ЖАТ (операторы 4–8), расчет показателей систем ЖАТ (операторы 9, 10).

**V уровень:** расчет полноты диагностирования (операторы 11–17), расчет достоверности диагностирования (операторы 18–22).

**IV уровень:** расчет времени поиска неисправности (операторы 25, 27).

**III уровень:** расчет времени восстановления, время предотвращения (восстановления) предотказных состояний (постепенных отказов) и время профилактики (операторы 26, 28), определение вероятности восста-

новления (операторы 29, 30), расчет времени наработки на отказ (операторы 31, 32).

**II уровень:** расчет коэффициента безопасности (оператор 33), расчет коэффициента технического использования (оператор 34).

**I уровень:** оценка безопасности движения поездов (операторы 35, 36), оценка бесперебойности движения поездов (операторы 37–39), определение величины эксплуатационных расходов.

Методика опробована на примере расчета показателей эффективности внедрения СТДМ для стрелочного электропривода постоянного тока и схемы управления.

Внедрение средств технического диагностирования и мониторинга учитывается в системе показателей при расчете следующих величин:  $K_{пп}$ ,  $K_{пп}$ ,  $v$ ,  $D_p$ ,  $T_v$ ,  $T_{нсп}$ ,  $T_{бсп}$ ,  $K_{ти}$ ,  $K_b$ ,  $P_{зп}$ ,  $Q(T_c)$ .

## 3 Заключение

Разработана методика комплексной оценки показателей эффективности, позволяющая учесть характеристики как СТДМ, так и систем ЖАТ и их влияние на движение поездов.

Корректность методики подтверждается полученными результатами расчетов показателей II уровня для стрелочного электропривода (СЭП) и схемы управления:  $K_b = 0,985$ ,  $K_{ти} = 0,63$  – по инструкции ЦШ-720-09 и  $K_b = 0,986$ ,  $K_{ти} = 0,77$  – при внедрении СТДМ, что не противоречит известным значениям показателей.

Предложенная методика позволяет оценить:

- изменение величины эксплуатационных расходов на обслуживание устройств ЖАТ (операторы 8–10);
- выбор оптимального количества контролируемых параметров устройств ЖАТ (операторы 11–17);
- достоверность диагностирования и прогнозирования технического состояния устройств ЖАТ (операторы 18–22).

Развитием методики расчета показателей эффективности является совершенствование метода расчета безопасности и бесперебойности движения поездов.

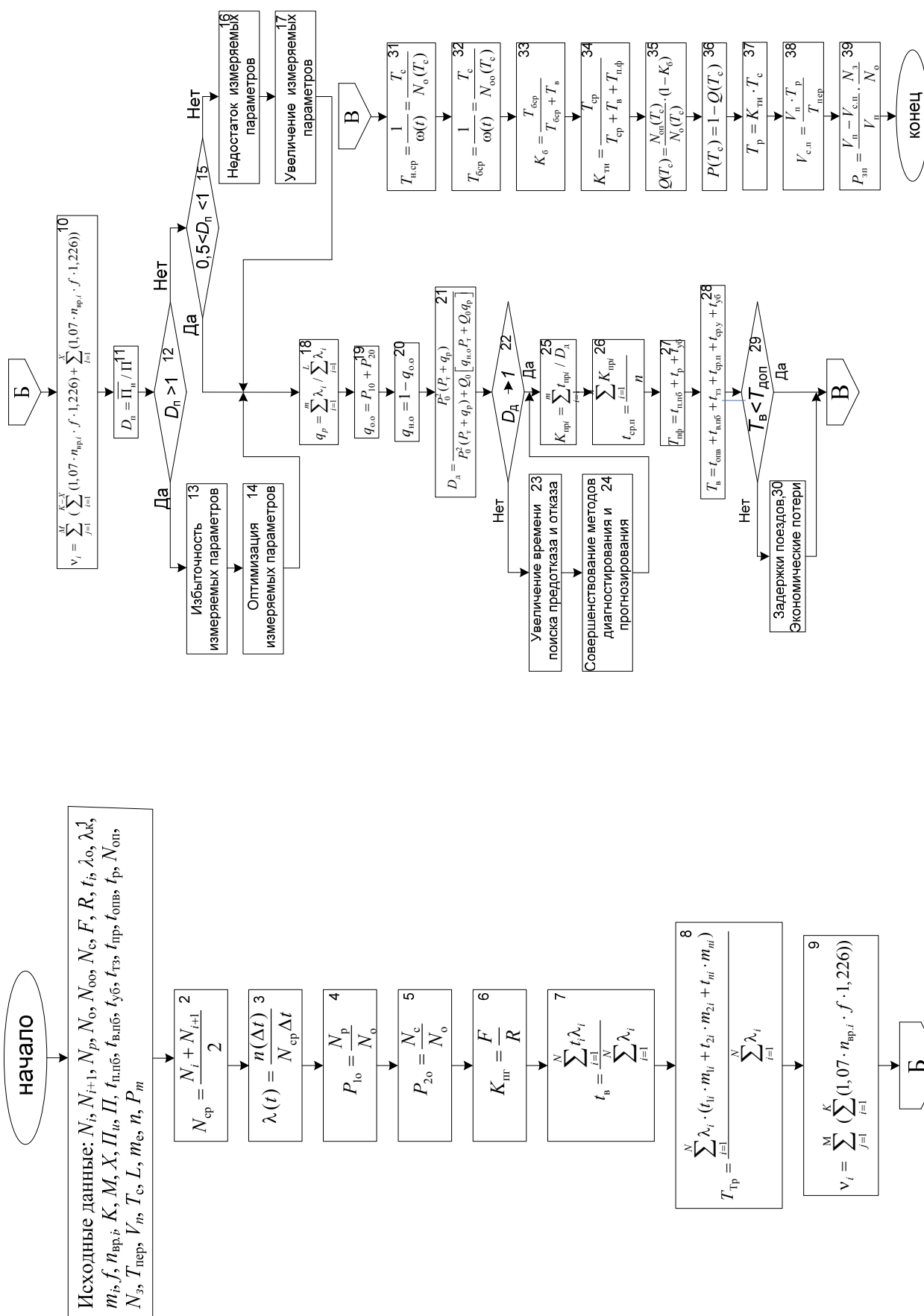


Рис. 2 Алгоритм расчета показателей эффективности СТДМ

Предложенный алгоритм может использоваться при моделировании и анализе показателей эффективности СТДМ для решения следующих задач:

- разработка механизма розыгрыша значений случайных переменных (параметры СТДМ и систем ЖАТ);
- организация сбора и хранения промежуточных результатов моделирования;
- предварительная обработка результатов моделирования (статистические оценки показателей эффективности СТДМ различных уровней).

Такой подход предполагает разработку соответствующего программного обеспечения.

### Библиографический список

1. *Калявин, В. П.* Надежность и диагностика элементов электроустановок: учебное пособие для вузов / В. П. Калявин, Л. М. Рыбаков. – Санкт-Петербург: Элмор, 2009. – 336 с. – ISBN 978-5-7399-0150-7.
2. *Горяинов, А. Н.* Определение эффективности систем диагностирования в теории транспортной диагностики / А. Н. Горяинов. – Харьков: ХНАГХ. – 2012. – С. 64–70.
3. *Сапожников, Вл. В.* Эффективность систем технической диагностики и мониторинга состояния устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / Вл. В. Сапожников, А. А. Лыков,

Д. В. Ефанов, Н. А. Богданов // Транспорт Российской Федерации. – 2010. – № 4 (29). – С. 47–49.

4. *Сапожников, В. В.* Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи: учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, В. И. Шаманов; под ред. Вл. В. Сапожникова. – Москва: Маршрут, 2003. – 263 с. – ISBN 5-89035-119-2.

5. *ОСТ 45.65–96.* Методика расчета среднего времени восстановления оборудования электро-связи. – Москва, 1997. – 8 с.

6. *Сапожников, Вл. В.* Понятие предотказного состояния / Вл. В. Сапожников, А. А. Лыков, Д. В. Ефанов // Автоматика, связь, информатика. – 2011. – № 12. – С. 6–8.

7. *Перникис, Б. Д.* Предупреждение и устранение неисправностей в устройствах СЦБ / Б. Д. Перникис, Р. Ш. Ягудин. – Москва: Транспорт, 1994. – 254 с. – ISBN 5-277-01433-0.

8. *ГОСТ 26656–85.* Техническая диагностика. Контролепригодность. Общие требования. – Москва, 2009. – 10 с.

9. *ГОСТ 21623–76.* Система технического обслуживания и ремонта техники. Показатели для оценки ремонтпригодности. Термины и определения. – Москва, 2006. – 13 с.

10. *Животкевич, И. Н.* Надежность технических изделий / И. Н. Животкевич, А. П. Смирнов. – Москва: Институт испытаний и сертификации вооружений и военной техники, 2004. – 472 с. – ISBN 5-98040-003-6.

УДК 656.257+681.518.5

## Нормирование активной мощности двигателей переменного тока при переводе стрелки

В. М. Чухонин, Б. Л. Горбунов, Е. В. Басалаев

Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»

**Аннотация.** Предлагается решение задачи нормирования активной мощности, потребляемой электродвигателем при переводе стрелки, оборудованной электроприводом с двигателем переменного тока.

**Ключевые слова:** железнодорожная стрелка; стрелочный электропривод; двигатель переменного тока; активная мощность двигателя; усилие перевода стрелки.

### 1 Введение

Опыт эксплуатации стрелок, оборудованных электроприводами с двигателями переменного тока, показывает, что не решен вопрос непрерывного контроля усилия перевода стрелки. Один вариант выхода из сложившейся ситуации – это контроль электрических параметров стрелочного электропривода. Для более детальных исследований данного вопроса и решения поставленной задачи был разработан контроллер КДУПС, который в настоящее время проходит опытную эксплуатацию. Проведенные исследования [1, 2] показали, что активную мощность, потребленную двигателем переменного тока, при работе стрелочного привода можно использовать как косвенный параметр, характеризующий усилие перевода стрелки. После выбора параметра необходимо решить вопрос его нормирования. Вариант нормирования активной мощности при переводе стрелки и будет рассмотрен в данной статье.

### 2 Параметры исследуемого электропривода и результаты экспериментов

В качестве примера пронормируем мощность для стрелочного перевода с параметрами:

- крестовина – 1/11;
- рельс – Р-50;

- привод – СП6-БМ (МСТ-0,3, 500 Вт).

Введем следующие понятия:

*мощность нормального перевода* – активная мощность, потребляемая электроприводом во время перевода стрелки ( $P_{нп}$ );

*мощность фрикции* – активная мощность, потребляемая электроприводом во время работы его на фрикцию ( $P_{фр}$ ).

В 2012 г. были проведены испытания стрелочных электроприводов НО–1010 на стенде проверки Армавирского ЭМЗ. На рис. 1 показана полученная зависимость активной мощности ( $P$ ) от усилия ( $F$ ), прикладываемого к шиберу электропривода СП-6. Будем считать данную зависимость эталонной для всех электроприводов данного типа.

В 2013 г. были проведены испытания на действующей стрелке одной из станций Петербургского метрополитена. Зависимость мощности  $P$  от  $F$  перевода СП-6БМ в реальных условиях показана на рис. 2 (усилие менялось настройкой фрикционного механизма и контролировалось прибором УКРУП). Перед проведением измерений стрелка была смазана и проверена в соответствии с техническим регламентом. Будем считать данную зависимость эталонной для данного типа стрелочного перевода.

Сравнивая графики на рис. 1 и 2, можно сделать вывод, о том, что активная мощность двигателя при работе его в составе стрелочного перевода возрастает в отличие от измеренной на заводском стенде в среднем на 27,6 % (табл. 1).

В [3] приведены нормативные усилия перевода стрелки при работе на фрикцию:

- 2100 Н – минимальное;
- 3000 Н – максимальное.

Максимальное усилие нормального перевода составляет 1550 Н [4]. По данным значениям и графику рис. 1 определим нор-

мативы активной мощности для двигателя в заводских условиях. Ранее было установлено, что активная мощность электропривода возрастает при использовании его в составе стрелочного перевода (в эксплуатационных

условиях) на 27,6 %, поэтому необходимо полученные нормы соответственно увеличить. Результаты расчета норм активной мощности для разных режимов работы стрелочного перевода приведены в табл. 2.

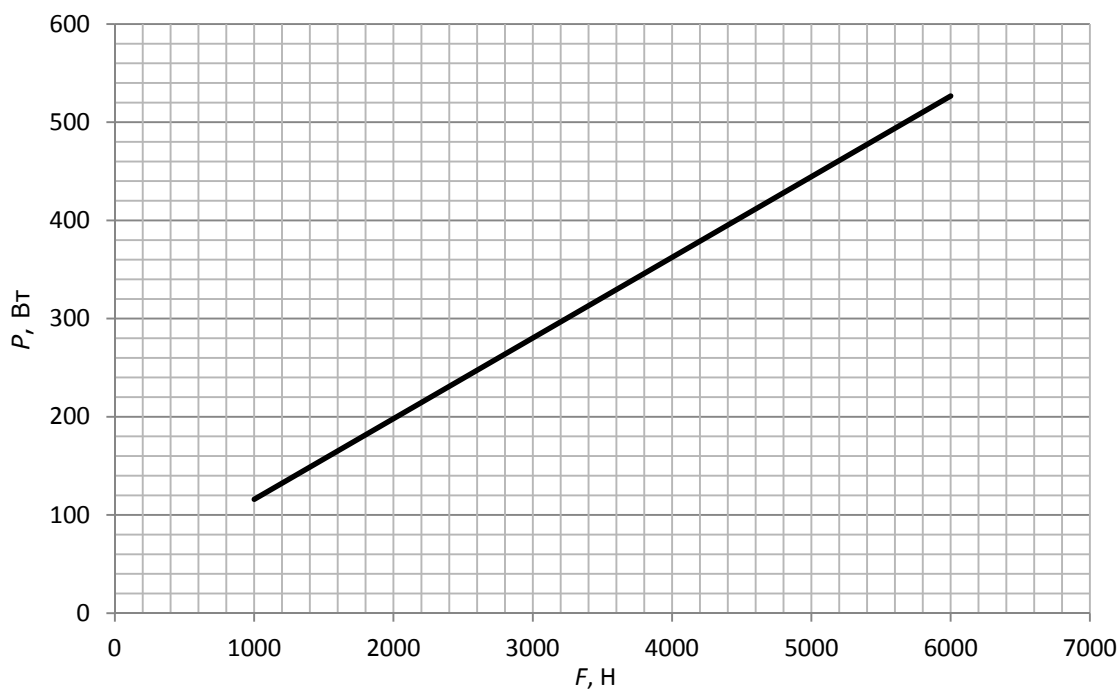


Рис. 1 Мощность и усилие перевода стрелки в заводских условиях

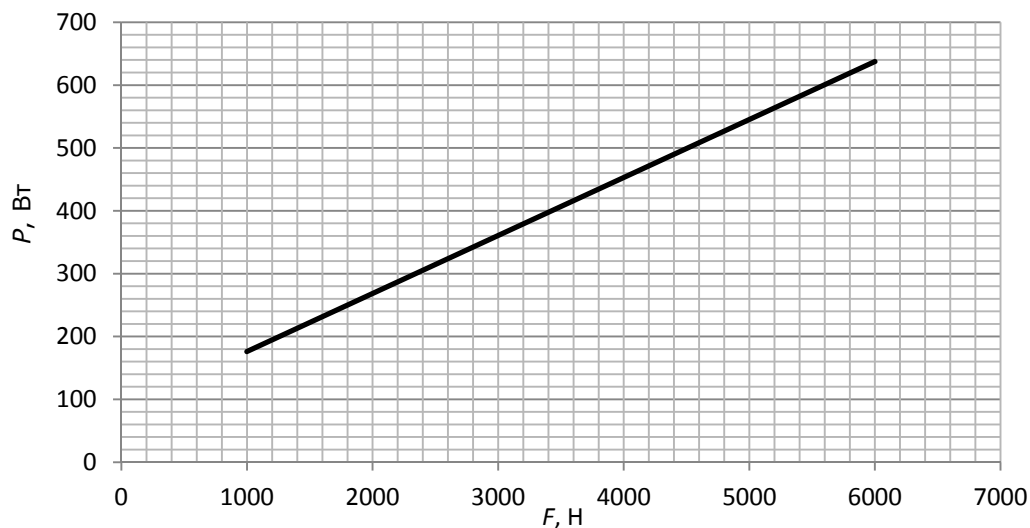


Рис. 2 Мощность и усилие перевода на реально работающей стрелке

ТАБЛИЦА 1 Относительная разница мощностей

Параметр	Усилие, Н			
	2000	3000	4000	5000
Мощность (рис. 1), Вт	200	280	365	425
Мощность (рис. 2), Вт	270	360	450	525
Относительная разность, %	35	28,57	23,29	23,53



ТАБЛИЦА 2 Рассчитанные нормы активной мощности

Параметры	Нормы активной мощности		
	при нормальном переводе	при работе на фрикцию	
	максимум	минимум	максимум
Усилие, Н	1550	2100	3000
Мощность в заводских условиях, Вт	160	210	260
Мощность в эксплуатационных условиях, Вт	204	267	331

### 3 Заключение

Актуальность полученных таким образом норм на активную мощность подтверждает временная диаграмма одного из переводов на действующей стрелке, обслуживаемой в соответствии с требованиями регламента ТО (рис. 3).

Среднее значение мощности нормального перевода по графику (см. рис. 3) составляет 150 Вт, что меньше 204 Вт, а следовательно, стрелка в данный момент работала в штатном режиме.

Среднее значение мощности при работе на фрикцию по графику на рис. 3 составляет

280 Вт, т. е. находится в диапазоне от 276 до 331, что также подтверждает штатную работу стрелки.

Для нормирования активной мощности для других типов стрелочных переводов необходим сбор соответствующей статистической информации и дальнейшая ее обработка вышеуказанным методом.

Следует сказать, что контроль активной мощности электродвигателя и времени перевода стрелки может существенно повысить качество диагностирования всего стрелочного перевода в режиме реального времени.

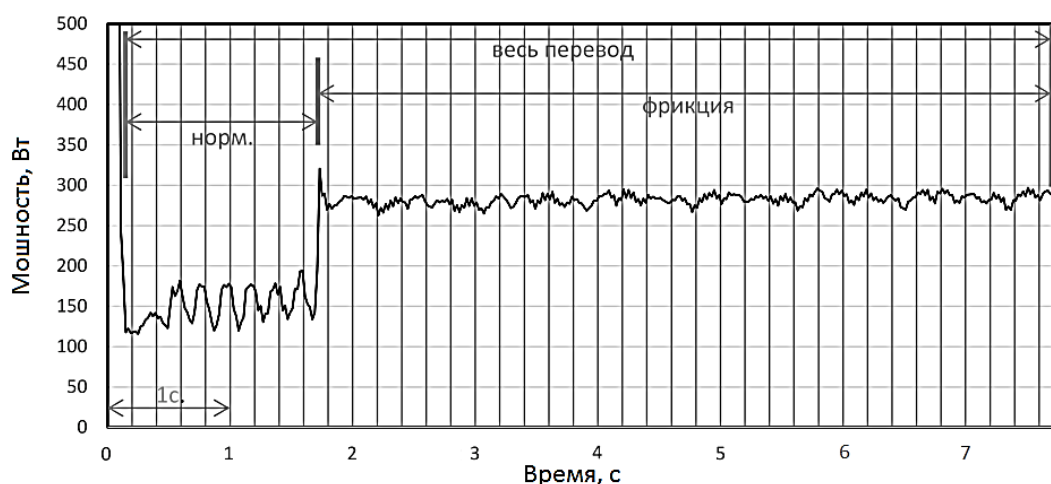


Рис. 3 Временная диаграмма изменения мощности при переводе стрелки

### Библиографический список

1. Чухонин, В. М. Измерение фазовых соотношений в стрелочных электроприводах с двигателями переменного тока / В. М. Чухонин, Б. Л. Горбунов // Разработка и эксплуатация новых устройств и систем железнодорожной автоматики и телемеханики: сб. науч. трудов; под. ред. Вл. В. Сапожникова. – Санкт-Петербург: ПГУПС, 2004. – С. 21–24. – ISBN 978-5-7641-0219-1.

2. Автоматизированный контроль усилия перевода стрелки / В. М. Чухонин, Б. Л. Горбунов, Д. В. Ефанов, В. Г. Алексеев // Автоматика, связь, информатика. – 2012. – № 7. – С. 2–4.

3. Сборник технологических карт по обслуживанию устройств сигнализации, централизации и блокировки СЦБ на Петербургском метрополитене. – Санкт-Петербург, 2010. – 322 с.

4. Инструкция по технической эксплуатации устройств и систем сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) // ЦШ-720-09. – 2009. – 99 с.

## Контроль исправности рабочей цепи электроприводов

А. Б. Никитин, А. Н. Ковкин

Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»

**Аннотация.** Обосновывается актуальность непрерывного диагностирования рабочей цепи электроприводов в системах железнодорожной автоматики. Приводятся принципы реализации непрерывного диагностирования и требования к диагностическим схемам контроля. Рассматривается диагностическая схема контроля рабочей цепи, разработанная для применения в составе аппаратуры микропроцессорной централизации МПЦ-МПК.

**Ключевые слова:** *электрический привод; рабочая цепь; контрольная цепь; диагностическая схема контроля.*

### 1 Введение

Электрический привод является важнейшим элементом систем железнодорожной автоматики. На железных дорогах электроприводы используются для централизованного перевода стрелок, дистанционного закрепления составов тормозными упорами УТС, управления шлагбаумами переездной сигнализации, устройствами заграждения на переездах, разъединителями в контактной сети при наличии на станции различных систем электрической тяги. Электроприводы применяются также в метрополитенах для управления электромеханическими автостопами, осуществляющими принудительную остановку поезда при проезде запрещающего показания. Одним из требований к разрабатываемым вновь средствам диагностирования для данных устройств можно считать наличие функции упреждающего обнаружения отказов, т. е. до того, как возникает необходимость в управлении объектом. Возможность раннего обнаружения отказов позволит свести к минимуму негативное влияние отказов устройств на выполнение задач транспортного комплекса. При этом наиболее эффективным является метод раннего обнаружения отказов путем непрерывного контроля исправности цепей.

Непрерывный контроль исправности имеет особое значение для выявления предотказных состояний, представляющих собой постепенное ухудшение электрических соединений. В качестве примера можно привести схему управления стрелочным электроприводом (СЭП). Нарушение контакта в рабочей цепи СЭП на ранних этапах может возникать кратковременно и только при интенсивном механическом воздействии на привод при движении поезда по стрелочному переводу или по близко расположенным путям. В процессе установки маршрутов привод может функционировать нормально. Однако со временем электрическое соединение может ухудшиться настолько, что кратковременный обрыв цепи превратится в постоянный, и перевод стрелки станет невозможным. Очевидно, что такого развития событий можно было бы избежать при наличии технической возможности выявлять кратковременное нарушение контакта в периоды времени, когда стрелка не переводилась.

В релейных и релейно-процессорных системах централизации для контроля исправности рабочей цепи СЭП переменного тока используется фазоконтрольный блок, формирующий при исправной цепи напряжение для удержания реле НПС [1, 2]. Однако контроль в этом случае осуществляется лишь во время перевода стрелки, и решить задачу раннего обнаружения отказов таким образом невозможно.

Следует отметить, что в такой постановке задача диагностирования наиболее актуальна для схем управления, в которых рабочая цепь электропривода отделена от контрольной цепи, поскольку любой отказ рабочей цепи в таких схемах при отсутствии соответствующих средств диагностирования может быть обнаружен лишь в процессе управления объектом. Если схема предусматривает использование общих проводов для управления и контроля (например, двух-

проводная схема управления СЭП), острота проблемы несколько снижается. Однако и в этом случае существуют отказы, которые не могут быть обнаружены ранее, чем потребуется включить электродвигатель. И если в контрольной цепи любой отказ обнаруживается немедленно, без использования каких-либо дополнительных средств, то для контроля исправности рабочей цепи при выключенном двигателе электропривода необходимо специальное техническое решение – диагностическая схема контроля (ДСК).

## 2 Требования к диагностическим схемам контроля исправности рабочей цепи

ДСК относятся к устройствам, не реализующим функций, связанных с безопасностью, но работающим в составе оборудования, отвечающего за безопасность. Наиболее важным требованием к ДСК является отсутствие опасного влияния на аппаратуру и напольные объекты при нормальном функционировании и возникновении любых неисправностей. Применительно к электроприводам железнодорожной автоматики это означает, что должна исключаться возможность несанкционированного вращения ротора электродвигателя как неподвижного, так и ранее вращающегося. Если рабочая цепь совмещена с контрольной цепью, дополнительно должна быть исключена возможность получения ложного контроля состояния напольного объекта [3].

Помимо требований, связанных с безопасностью, можно выделить два обязательных требования, обеспечивающих правильное функционирование ДСК. Во-первых, должна быть обеспечена совместимость ДСК с контролируемым оборудованием. Это означает, что ДСК не должна повреждаться в процессе функционирования привода и оказывать мешающего влияния на работу привода и схемы управления. Выполнения данного требования можно добиться двумя путями. Первый путь – обеспечить отключение ДСК на время работы электродвигателя привода, второй – создать схему, устойчивую к воздействию рабочего напряжения и предусматривающую ограничение мощности, потребляемой от контролируемой цепи при работе электродвигателя. Во-вторых, должна

обеспечиваться работоспособность ДСК на кабельных линиях любой длины в пределах максимально допустимой для контролируемого оборудования и устойчивость ДСК к влияниям других цепей через емкость кабельной линии.

И, наконец, следует сформулировать последнее требование, которое является особенно важным для неотключаемых ДСК. Данное требование состоит в том, что ДСК не должна снижать надежность реализации основных функций контролируемого оборудования. Это означает, что отказы ДСК не должны приводить к повреждению устройств управления приводом и невозможности реализации функций электропривода как при управлении напольным оборудованием, так и при контроле его состояния. Кроме того, желательно, чтобы все элементы ДСК размещались на посту (или входили в состав постового оборудования). Иными словами, наиболее предпочтительным является использование ДСК с централизованным размещением.

Эффективным методом контроля исправности электрической цепи является измерение электрических параметров при подключении к ней источника напряжения или тока. Род напряжения (тока) зависит от особенностей конкретной цепи.

В настоящее время в СЭП при новом проектировании разрешены только трехфазные асинхронные двигатели. Исключить опасное воздействие ДСК на такой электродвигатель достаточно легко как на постоянном, так и на переменном токе. В то же время, если рабочая цепь привода совмещена с вентильной контрольной цепью, использование постоянного напряжения (тока) для работы ДСК достаточно проблематично, так как требуется решение, исключающее возможность появления в контрольной цепи постоянной составляющей, способной привести к ложному контролю. Если рабочая цепь отделена от контрольной цепи, использование постоянного напряжения (тока) можно считать наиболее предпочтительным решением, поскольку в этом случае проще обеспечить работоспособность ДСК на длинных кабельных линиях, имеющих значительную емкость.

### 3 Схема контроля исправности рабочей цепи в системе МПЦ-МПК

Рассматриваемая в данной статье ДСК разработана для использования в составе аппаратуры управления электроприводами стрелок и электромеханических автостопов системы микропроцессорной централизации МПЦ-МПК. Данная ДСК позволяет обнаруживать обрывы в рабочей цепи и обмотках трехфазного асинхронного двигателя электропривода, а также выявлять разомкнутое состояние блок-контактов в приводе в промежутках времени, когда двигатель электропривода не работает. Особенностью схем управления электроприводами в системе МПЦ-МПК является то, что рабочая цепь электропривода отделена от контрольной цепи, поэтому для работы ДСК используется постоянное напряжение.

Упрощенная принципиальная схема описываемого технического решения приведена на рисунке. ДСК состоит из нескольких одинаковых узлов контроля, количество которых на единицу меньше количества проводов рабочей цепи. ДСК, разработанная для системы МПЦ-МПК, позволяет контролировать как трехпроводную, так и пятипроводную рабочую цепь и содержит четыре узла контроля. В целях упрощения показано только два узла (см. рисунок), что достаточно для контроля трехпроводной рабочей цепи. Кроме того, на рисунке не показаны элементы защиты от перенапряжений и цепи формирования опорных напряжений. Постоянное напряжение подается в контролируемую цепь через DC/DC-конвертер с гальванической развязкой, что исключает объединение рабочих цепей разных приводов через источник питания ДСК. Узлы контроля подключаются к каждому проводу рабочей цепи, кроме первого, соединенного непосредственно с плюсовым выводом DC/DC-конвертера. В случае использования схемы совместно с пятипроводной рабочей цепью плюсовой вывод конвертера подключается к проводу, имеющему постоянное соединение с обмотками двигателя для обоих направлений вращения. При исправной рабочей цепи ток от плюсового вывода конвертера протекает через все узлы контроля на минусовый

вывод конвертера. Напряжение с датчиков тока Рдт через интегрирующие цепи Ри, Си поступает на входы компараторов, выполненных на основе операционных усилителей. Напряжение, снимаемое с датчика тока, превышает опорное напряжение  $U_{оп2}$ , и на выходе компараторов формируется высокий потенциал. Указанный потенциал приводит к появлению тока через светодиоды оптопар VU, и транзисторы оптопар замыкают выходную цепь ДСК. Если в рабочей цепи имеется обрыв, в цепи хотя бы одного узла контроля будет отсутствовать ток, то соответствующая оптопара обеспечит разомкнутое состояние выходной цепи. Параметры компаратора определяются величиной опорного напряжения  $U_{оп2}$  и обеспечивают работоспособность схемы на кабельных линиях любой длины в пределах допустимой для аппаратуры управления электроприводом.

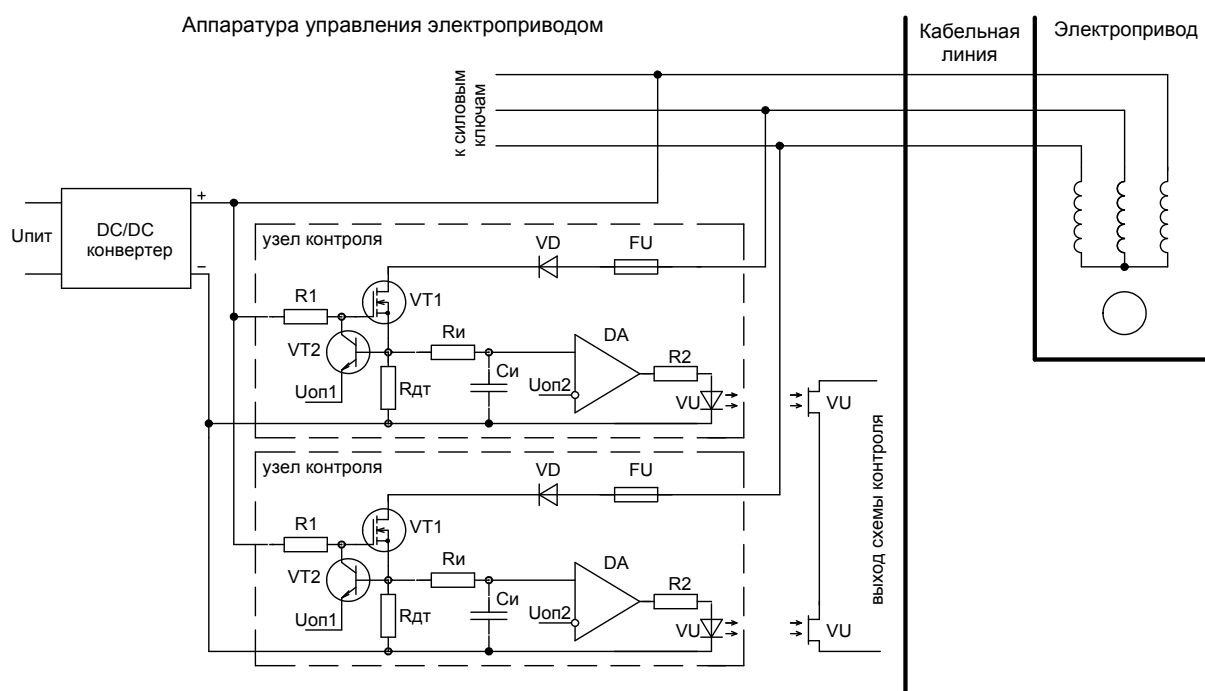
Предложенная схема контроля не отключается от рабочей цепи во время работы двигателя электропривода. Чтобы исключить перегрузку ДСК и шунтирование рабочей цепи, предусмотрена схема ограничения тока, выполненная на транзисторах VT1 и VT2. При выключенном состоянии электропривода транзистор VT1 открыт положительным потенциалом, поступающим через резистор R1. Ток в цепи определяется значением напряжения на датчике тока, при котором транзистор VT2 остается в закрытом состоянии. Если полярность напряжения в цепи при работе двигателя будет увеличивать ток, проходящий через узел контроля, напряжение на датчике тока превысит опорное напряжение  $U_{оп1}$ , транзистор VT2 начнет открываться и шунтировать цепь затвора VT1, обеспечивая поддержание установленного значения тока через узел контроля. При воздействии напряжения противоположной полярности протекание тока через узел контроля исключается за счет наличия диодов VD.

Интегрирующие цепи Ри, Си обеспечивают устойчивое обнаружение обрывов в рабочей цепи при наличии влияния других цепей через емкость кабельной линии. За счет наличия интегрирующих цепей исключается ложное переключение компараторов под воздействием импульсов тока, вызванных данным влиянием. Параметры интегрирую-

щих цепей оптимизируются с учетом необходимого подавления влияний частотой 50 Гц и обеспечения достаточного быстродействия схемы контроля, позволяющего обнаруживать кратковременные обрывы.

Предохранители FU исключают влияние отказов схемы контроля на работоспособность электропривода. Благодаря предохранителям не происходит шунтирования рабочей цепи при возникновении отказов схем ограничения тока. Если возникают такие от-

казы, то под воздействием рабочего напряжения электродвигателя предохранители перегорают и отключают отказавшие узлы контроля от рабочей цепи. ДСК в этом случае будет формировать сигнал о неисправности рабочей цепи. Однако в результате логической обработки указанной последовательности событий (успешный перевод стрелки и формирование сигнала о неисправности сразу после окончания перевода) можно сделать вывод о некорректной работе самой ДСК.



Диагностическая схема контроля в системе МПЦ-МПК

#### 4 Заключение

Контроль за исправностью рабочей цепи электроприводов в системах железнодорожной автоматики позволяет эффективно и своевременно выявлять отказы, препятствующие реализации основных функций электрического привода. Принципы построения схем контроля должны соответствовать специфике контролируемого оборудования, исключать возможность опасного и мешающего воздействия на работу контролируемых устройств, а также устойчиво функционировать в условиях воздействия помех, присутствующих в кабельных линиях значительной длины.

Одним из эффективных методов контроля исправности рабочей цепи является

измерение величины тока, протекающего в цепи при подключении к ней источника постоянного напряжения. Областью применения такого метода контроля являются стрелочные и автостопные электроприводы с двигателями переменного тока, в которых рабочая цепь отделена от контрольной цепи. Предложенная схема контроля исправности рабочей цепи электропривода предназначена для использования в трех- и пятипроводных рабочих цепях электроприводов. Данная схема реализована в составе модулей управления электроприводами системы МПЦ-МПК. Выходная цепь схемы контроля передает информацию о состоянии рабочей цепи стрелочного электропривода или электропривода электромеханического автостопа в

управляющий вычислительный комплекс системы МПЦ-МПК, обеспечивая необходимую полноту диагностирования аппаратуры управления стрелками и автостопами, кабельной сети, электрических соединений и контактов, имеющих в рабочей цепи, а также обмоток электродвигателя. Работоспособность предложенного технического решения и его соответствие перечисленным выше требованиям подтверждаются результатами испытаний.

### Библиографический список

1. *Переборов, А. С.* Телеуправление стрелками и сигналами : учебник для вузов ж.-д. трансп. /

А. С. Переборов, А. М. Брылеев, В. Ю. Ефимов, И. М. Кокурин, Л. Ф. Кондратенко; под ред. А. С. Переборова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1981. – 390 с.

2. *Сапожников, Вл. В. и др.* Микропроцессорные системы централизации : учебник для техникумов и колледжей железнодорожного транспорта; под ред. Вл. В. Сапожникова. – Москва : ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. – 398 с. – ISBN 978-5-89035-525-6.

3. *Сапожников, В. В.* Безопасность железнодорожной автоматики и телемеханики. Термины и определения / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, В. И. Талалаев и др. // Автоматика, телемеханика и связь. – 1992. – № 4. – С. 30–32.

УДК 656.2

## Обеспечение безопасности движения на железнодорожном транспорте в международном сообщении: отечественный опыт и зарубежная практика

П. А. Плеханов

Кафедра «Радиотехника»

**Аннотация.** Рассмотрены отечественный опыт и зарубежная практика обеспечения безопасности движения на железнодорожном транспорте в международном сообщении. Сформулированы принципы обеспечения безопасности движения на железнодорожном транспорте в международном сообщении государств-участников Содружества.

**Ключевые слова:** *безопасность движения; международные железнодорожные перевозки.*

### 1 Введение

При организации международных перевозок железнодорожным транспортом на пространстве государств-участников Содружества – бывших союзных республик СССР – важнейшим вопросом является гарантированное обеспечение приемлемого уровня качества и безопасности единой перевозочной услуги.

Формирование целевой системы управления безопасностью движения в международном сообщении на едином Пространстве 1520 (железных дорог с шириной колеи 1520 мм) должно происходить с учетом принципов обеспечения безопасности, выработанных на основе отечественной (МПС СССР) и зарубежной (железные дороги Европейского Союза) практики. Ключевыми принципами являются принцип приемлемого риска (относительной безопасности движения) и гармонизация национальных нормативных документов по безопасности и технической политике для обеспечения безопасности движения в международном сообщении.

### 2 Опыт СССР

Как показывает статистика, железнодорожный транспорт СССР был одним из самых безопасных в мире (табл. 1): по количеству погибших на 1 млн пассажиров советские железные дороги в конце 1980-х гг. уступали только японским, а по количеству погибших на 1 млрд пассажиро-километров находились на первом месте.

На советских железных дорогах действовала централизованная система административного управления качеством и безопасностью продукции, работ и услуг с использованием строго обязательной нормативной базы [1] (рис. 1).

Можно выделить следующие основные принципы обеспечения безопасности движения на железных дорогах СССР [3, 4]:

- цели и задачи в области обеспечения безопасности движения определялись государством. При этом безопасность движения была подтверждена документально выполнением всех предусмотренных нормативами требований по безопасности (рис. 2);
- приоритет безопасности движения перед эксплуатационными показателями движения;
- абсолютная безопасность движения – недопущение нарушений;
- единство нормативной базы и технической политики;
- отделение ревизорского контроля за безопасностью движения от технологий работы железных дорог;
- несогласованность требований по безопасности движения с экономической целесообразностью;
- приоритет жестких мер перед мотивацией персонала (административно-командный способ управления, при котором основным принципом обеспечения безопасности является использование системы поиска и наказания виновных).

Таким образом, система обеспечения безопасности движения на сети железных дорог МПС СССР представляла собой жестко централизованную административную систему, построенную на принципах многократного контроля, личной ответственности за безопасность и целенаправленного распределения ресурсов. Многие из этих принципов действуют и сегодня на железных дорогах государств-участников Содружества.

ТАБЛИЦА 1 Показатели безопасности перевозки пассажиров по железным дорогам различных стран мира (на конец 1980-х гг.)<sup>1</sup>

Показатель	СССР	США	ФРГ	Франция	Япония
Перевезено пассажиров (1989 г.), млн чел.	4 322,5	312,0	994,2	810,0	6 884,0
Пассажирооборот (1989 г.) млрд пассажиро-км	411,2	19,8	39,2	63,3	194,2
Среднее за год количество погибших пассажиров (1980–1988 гг.)	42	8	43	37	7
Кол-во погибших на 1 млн пассажиров	<u>0,010</u>	0,026	0,040	0,046	0,001
Кол-во погибших на 1 млрд пассажиро-км	<u>0,10</u>	0,40	1,09	0,58	0,24

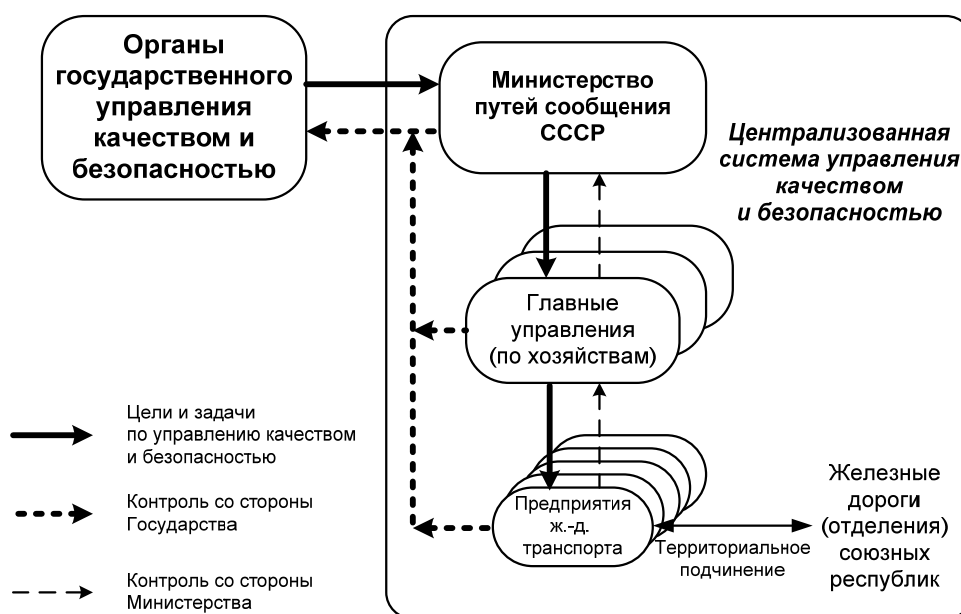


Рис. 1 Система управления качеством и безопасностью на железнодорожном транспорте СССР

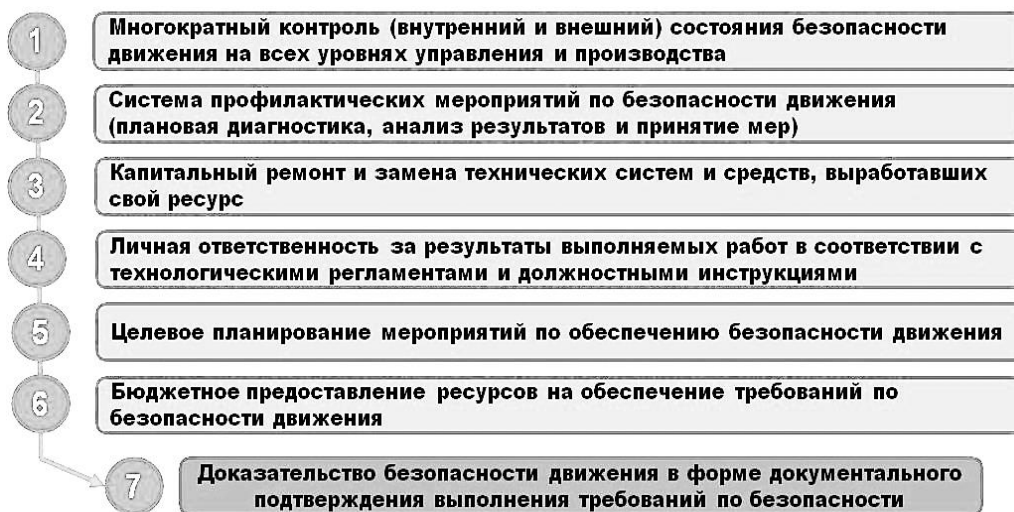


Рис. 2 Нормативные требования по безопасности движения

<sup>1</sup> По данным [4].



### 3 Опыт государств Европейского Союза

К началу 1990-х гг. развитие единой железнодорожной сети Европы зависело от решения следующих проблем в области эксплуатационной совместимости и безопасности при организации международных перевозок [5]:

- в эксплуатации находилось более 20-ти различных и несовместимых между собой систем управления движением поездов;
- в каждой стране действовали свои правила эксплуатации железных дорог, некоторые из них даже противоречили друг другу;
- в каждой стране действовали свои национальные требования по сертификации безопасности;
- в каждой стране использовались свои системы подготовки и лицензирования машинистов;
- применялись пять различных систем тягового электроснабжения;
- использовались восемь различных и несовместимых между собой систем связи и радиосвязи;
- свой язык почти в каждой стране.

Указанные проблемы и их последствия (простои на границах, значительные издержки и, как следствие, высокие тарифы) резко снижали конкурентоспособность и привлекательность железнодорожного транспорта по сравнению с автомобильным для перевозок пассажиров и грузов в международном сообщении. Выходом из сложившейся ситуации стало создание единой европейской системы, обеспечивающей эксплуатационную совместимость и безопасность движения на железнодорожном транспорте в международном сообщении, которое было обусловлено согласованием Миссий<sup>1</sup>, Целей<sup>2</sup> и Политик<sup>3</sup> национальных железнодорожных администраций в области обеспечения безопасности. На этой основе удалось сформировать ключевые элементы новой системы [4]:

- органы проектирования безопасности;

- регулирующие и консультативные органы;
- нормативную базу безопасности;
- системно-технические решения.

Органы проектирования безопасности представлены европейскими институтами CENELEC<sup>4</sup>, ERRI<sup>5</sup>, IRSE<sup>6</sup> и другими, ассоциациями производителей и пользователей железнодорожных технологий (UNIFE<sup>7</sup>, UNISIG<sup>8</sup>, EIM<sup>9</sup> и т. д.), а также крупными компаниями и другими организациями.

Регулирующими и консультативными органами по обеспечению безопасности движения на железных дорогах Европы являются Европейская комиссия и Европейское железнодорожное агентство (European Railway Agency, ERA) [6–8]. Организационная структура Управления безопасности ERA представлена на рис. 3.

При этом в каждом государстве Европейского Союза (ЕС) существуют свои национальные органы по регулированию железнодорожной безопасности.

Основным нормативным документом – документом «верхнего уровня», регламентирующим вопросы обеспечения безопасности движения на железных дорогах государств-участников ЕС, является Директива Европейского парламента и Совета ЕС 2004/49/ЕС «О безопасности железных дорог Сообщества» [9, 10], предусматривающая введение:

- единых для всех государств-участников правил по безопасности, основанных на общих нормах безопасности и эксплуатационной совместимости;
- единого порядка обучения, сертификации и допуска к работе персонала железных дорог, режима и норм его труда и отдыха;
- единого порядка допуска железнодоро-

<sup>1</sup> Миссия – это документ, провозглашающий приоритет безопасности движения перед экономическими показателями.

<sup>2</sup> Цели – документ, устанавливающий количественные показатели безопасности движения.

<sup>3</sup> Политика – документ, устанавливающий способы достижения количественных показателей безопасности движения.

<sup>4</sup> Comité Européen de Normalisation Électrotechnique (фр.) – Европейский комитет по стандартизации в области электротехники.

<sup>5</sup> European Rail Research Institute – Европейский институт железнодорожных исследований.

<sup>6</sup> Institute of Railway Signal Engineers – Институт инженеров в области систем железнодорожной сигнализации.

<sup>7</sup> Union of European Railway Industries – Объединение европейских предприятий железнодорожной промышленности.

<sup>8</sup> Union Industry of Signalling – Объединение производителей систем железнодорожной сигнализации.

<sup>9</sup> European Rail Infrastructure Managers – Европейская ассоциация операторов железнодорожной инфраструктуры.

рожного подвижного состава на инфраструктуру;

- обязательных процедур расследования случаев нарушений безопасности и регулярного предоставления отчетов о состоянии безопасности;

- систем менеджмента безопасности (СМБ) для каждого железнодорожного предприятия, отвечающих единым требованиям и содержащих общие компоненты, адаптированные под особенности деятельности предприятия;

- единых процедур проведения сертификации безопасности и выдачи сертификатов.

Последнее обстоятельство является особенно важным, поскольку гарантирует потребителям железнодорожной продукции и услуг предприятий, внедривших у себя СМБ, их соответствие требованиям по безопасности, установленным законодательством ЕС и национальными правилами.

Документами более низкого уровня являются технические спецификации по эксплуатационной совместимости (Technical Specification for Interoperability, TSIs), общие цели (Common Safety Targets, CSTs), показа-

тели (Common Safety Indicators, CSIs) и методы (Common Safety Methods, CSMs) в области безопасности, а также стандарты железнодорожной безопасности, важнейшими из которых являются стандарты Комитета CENELEC [11].

Среди европейских документов в области организации управления безопасностью на железнодорожном транспорте можно выделить следующие:

- двухтомный документ под названием «Engineering Safety Management – The Yellow Book» («Менеджмент организационно-технической безопасности – Желтая Книга»), опубликованный Комитетом по железнодорожной безопасности и стандартам (Rail Safety and Standards Board, RSSB) от имени железнодорожной промышленности Великобритании [12];

- документы общеевропейского проекта SAMRAIL: «Safety Management in Railways» («Менеджмент безопасности на железнодорожном транспорте») [13–16].

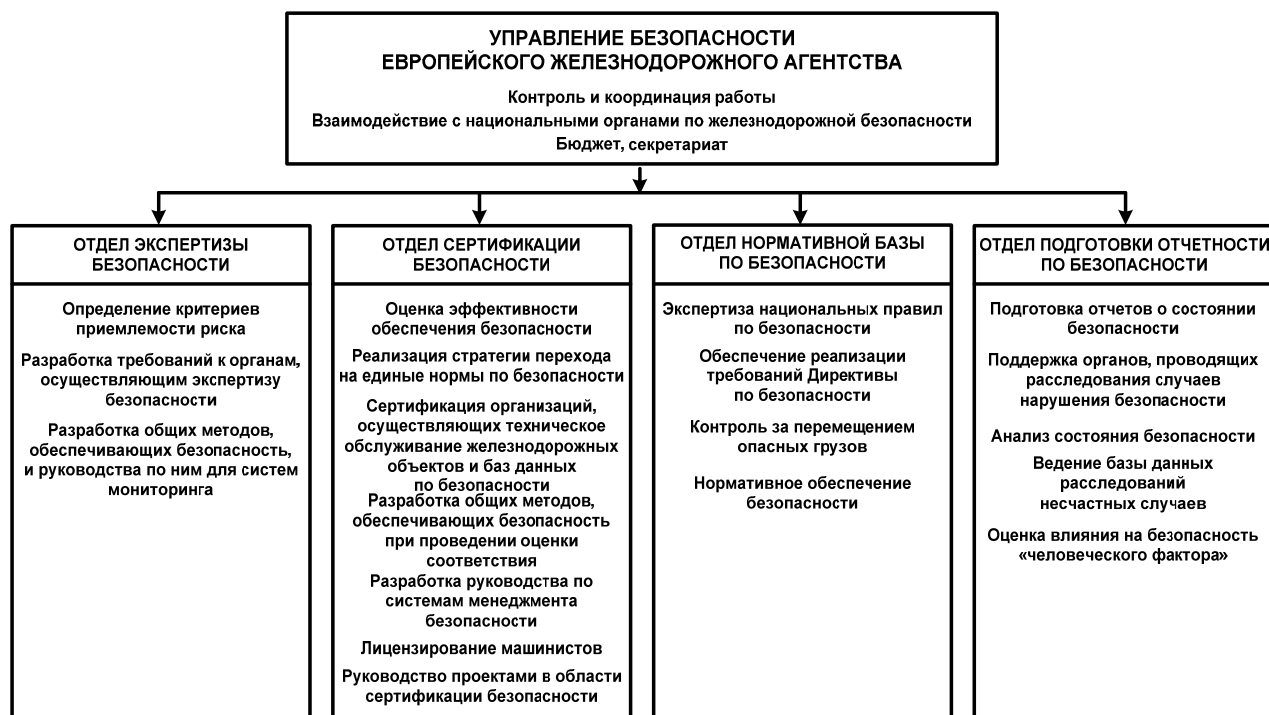


Рис. 3 Организационная структура Управления безопасности Европейского железнодорожного агентства

В указанных документах наряду с организацией управления *внутренними* рисками при нарушении безопасности вводится понятие *внешних* и *распределенных* рисков [2, 17] и раскрываются методы управления.

1. *Внутренние риски* – это риски, всецело обусловленные деятельностью данного предприятия. Примерами внутренних рисков являются неисправности оборудования, ошибки человека, упущения в организации и руководстве производством работ.

2. *Внешние риски* – риски, обусловленные деятельностью других предприятий, никоим образом не подконтрольных данному предприятию. Это могут быть риски, вызванные поставками ненадлежащего оборудования и комплектующих, опасные природные (снежные заносы), техногенные (застывший на переезде автомобиль) и социальные (терроризм, вандализм) факторы.

3. *Распределенные риски* – риски, связанные с деятельностью нескольких предприятий. Это новая группа рисков, вызванных, главным образом, отделением инфраструктуры железнодорожного транспорта от перевозочной деятельности. Примерами такого рода рисков являются риски, возникающие при взаимодействии движущихся составов с железнодорожной инфраструктурой, включающей путь, контактную сеть, системы автоматики и телемеханики, искусственные сооружения и другие устройства.

*Важнейшим системно-техническим решением* по обеспечению эксплуатационной совместимости и безопасности движения обычных и высокоскоростных железнодорожных линий в международном сообщении государств-участников ЕС является внедрение системы ERTMS/ETCS (European Rail Traffic Management System / European Train Control System – Европейская система управления железнодорожными перевозками / Европейской системы управления движением поездов), использующей стандарт цифровой сотовой связи GSM-R (Global System for Mobile Communications – Railways – Глобальная система подвижной связи на железнодорожном транспорте) [18–21].

В целом, европейская система обеспечения безопасности движения на железно-

рожном транспорте в международном сообщении продемонстрировала достаточно высокую эффективность, и ее возможности изучаются сегодня всем мировым железнодорожным сообществом. На рис. 4 приведена статистика гибели пассажиров на железных дорогах Европы за период 1968–2004 гг.

Из рис. 4 видно, что меры по гармонизации национальных систем обеспечения безопасности движения на железнодорожном транспорте европейских государств, принятые в этот период, привели к снижению случаев гибели пассажиров более чем в пять раз.

#### 4 Заключение

Анализ отечественного и зарубежного опыта по обеспечению безопасности движения на железнодорожном транспорте в международном сообщении показывает, что в МПС СССР управление безопасностью строилось на административных принципах с использованием «жесткой» (строго обязательной) нормативной базы, а в Европейском Союзе безопасность на железных дорогах обеспечивается посредством согласования Миссий, Целей и Политик национальных железных дорог при помощи «гибкой» (добровольно-обязательной) нормативной базы (рис. 5) [22, 23].

На едином Пространстве 1520 Совет по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества обеспечивает только координацию взаимодействия национальных железнодорожных администраций по вопросам обеспечения безопасности движения в международном сообщении (рис. 6).

В этой связи для решения главной проблемы, которая может быть сформулирована как «отсутствие целостной системы управления безопасностью движения на железнодорожном транспорте в международном сообщении государств-участников Содружества», необходимо создать единую систему управления безопасностью движения на железнодорожном транспорте в международном сообщении государств-участников Содружества на основе как отечественного [24–27], так и международного (европейского) опыта [28–30].

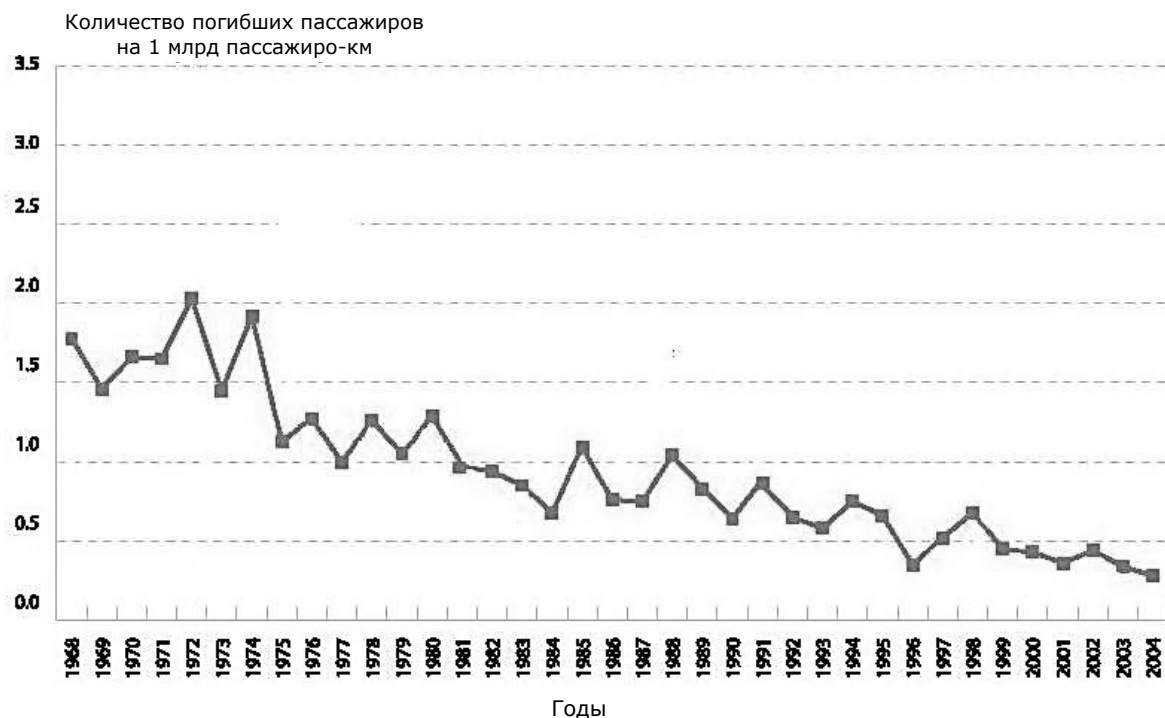


Рис. 4 Статистика гибели пассажиров на железных дорогах Европы

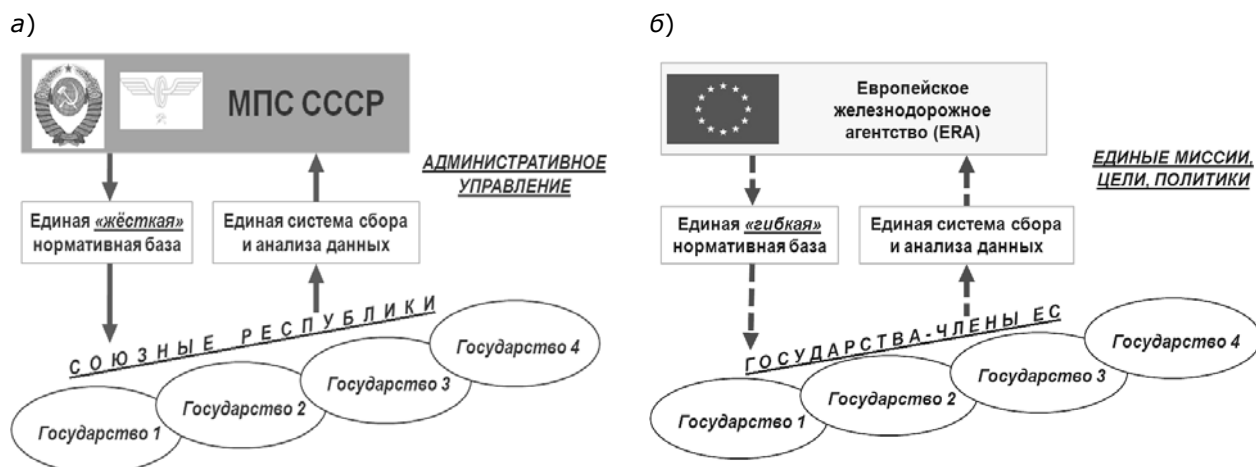


Рис. 5 Управление безопасностью движения на железнодорожном транспорте в международном (межреспубликанском) сообщении в МПС СССР (а) и в Европейском Союзе (б)



Рис. 6 Управление безопасностью движения на железнодорожном транспорте в международном сообщении государств-участников Содружества

В табл. 2 приведены предлагаемые принципы обеспечения безопасности движения в целевой системе в сравнении с принципами, действовавшими в МПС СССР.

Как видно из табл. 2, основным элементом целевой системы является процесс управления

рисками нарушений безопасности движения на железнодорожном транспорте в международном сообщении государств-участников Содружества.

ТАБЛИЦА 2 Принципы обеспечения безопасности движения, действовавшие в МПС СССР, и принципы построения целевой системы безопасности

Принципы обеспечения безопасности движения		
№ п/п	в МПС СССР	в целевой системе
1	Цели и задачи в области обеспечения безопасности движения определялись государством	Миссия, цели и политика в области обеспечения безопасности движения определяются собственниками железных дорог (национальными железнодорожными администрациями) в соответствии с национальной нормативной базой
2	Приоритет безопасности движения перед эксплуатационными показателями движения	
3	Абсолютная безопасность движения – недопущение происшествий	Относительная безопасность движения – принцип приемлемого риска
4	Единство нормативной базы и технической политики	Гармонизация национальных нормативных документов и технической политики в области организации международного сообщения
5	Отделение ревизорского контроля за безопасностью движения от технологий работы железных дорог	
6	Несогласованность требований по безопасности движения с экономической целесообразностью	Приемлемость риска настолько, насколько это целесообразно с точки зрения экономических показателей и имиджа национальных железных дорог
7	Приоритет жестких мер перед мотивацией персонала	Приоритет мотивации перед жесткими мерами по отношению к персоналу

## Библиографический список

1. *Управление безопасностью субъектов предпринимательства* / В. В. Шматченко, В. Г. Иванов, В. В. Конюшков, П. А. Плеханов // *Экономическое возрождение России*. – 2009. – № 4 (22). – С. 23–29.

2. *Красковский, А. Е.* Система обеспечения безопасности движения поездов в межгосударственном сообщении / А. Е. Красковский, П. А. Плеханов // *Евразия Вести*. – 2008. – № 11. – С. 22.

3. *Красковский, А. Е.* Формирование системы обеспечения безопасности движения в межгосударственном сообщении / А. Е. Красковский, В. В. Шматченко, П. А. Плеханов // *Железнодорожный транспорт*. – 2009. – № 8. – С. 46–50.

4. *По следам крушений*. Вып. 4. – Москва : Ассоциация «Фонд железнодорожной безопасности СССР», 1990. – 48 с.

5. *Анализ состояния безопасности движения на железных дорогах ОАО РЖД в 2010 году* // Утв. вице-президентом ОАО РЖД А. Г. Тишаниным 21.02.2011 г. – Москва : ОАО РЖД, 2011. – 392 с.

6. *Деятельность Европейского железнодорожного агентства* // *Железные дороги мира*. – 2008. – № 9. – С. 14–18.

7. *Европа на пути к единой железнодорожной системе* // *Железные дороги мира*. – 2008. – № 9. – С. 9–13.

8. *Павлов, Л. Н.* Обеспечение безопасности движения: европейский опыт / Л. Н. Павлов, Т. Н. Зайцева, О. Л. Целищева, В. Г. Майоров // *Железнодорожный транспорт*. – 2007. – № 7. – С. 74–77.

9. *Черкашин, Ю. М.* Безопасность движения железнодорожного подвижного состава : сб. науч. трудов ВНИИЖТ. – Москва : Интекст, 2010. – 176 с.

10. *Якунин, В. И.* Проблемы международной гармонизации железнодорожного права России / В. И. Якунин. – Москва : Научный эксперт, 2008. – 224 с.

11. *Braband, J.* The CENELEC standards regarding functional safety / J. Braband at alias. – Hamburg (Germany): Eurailpress, 2006. – 216 p.

12. Engineering Safety Management (The Yellow Book). Volumes 1 and 2. Fundamentals and Guidance. Issue 4. – London (United Kingdom, UK): Rail Safety and Standards Board on behalf of the UK rail industry, 2007. – 361 p.
13. SAMRAIL. Acceptable Risk Level. – SAMRAIL / DB / PM / WP2.4 / V1.0, 2004. – 53 P.
14. SAMRAIL. Analysis of existing approaches. – SAMRAIL / TIFSA / JF / WP2.1 / D.2.1.1 / V4, 2003. – 86 p.
15. SAMRAIL. Guidelines for the Safety Management System. – SAMRAIL / SM / D2.2.2 / V3.0, 2004. – 56 p.
16. SAMRAIL. Position paper on Common Safety Indicators. – SAMRAIL / SM / D2.6.1-A, 2004. – 49 p.
17. Плеханов, П. А. Формирование нормативной базы обеспечения безопасности движения в условиях реформирования российских железных дорог / П. А. Плеханов, В. Г. Иванов // Вестник транспорта Поволжья. – 2011. – № 4 (28). – С. 6–13.
18. Системы автоматики и телемеханики на железных дорогах мира : учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта / Э. Андерс и др.; пер. с англ.; под ред. Г. Тега и С. Власенко. – Москва : Интекст, 2010. – 496 с.
19. Гапанович, В. А. Безопасность движения на железных дорогах на основе применения многофункциональных комплексных систем регулирования движения поездов / В. А. Гапанович и др.; под ред. В. И. Якунина. – Москва : ИПЦ «Дизайн. Информация. Картография», 2008. – 280 с.
20. Плеханов, П. А. Вопросы обеспечения безопасности железнодорожных телекоммуникационных систем международных транспортных коридоров / П. А. Плеханов // Бюллетень результатов научных исследований (электронный научный рецензируемый журнал). – 2012. – № 3 (2). – С. 85–97.
21. Опыт и проблемы внедрения сетей радиосвязи стандарта GSM-R / Д. Н. Роенков, В. В. Шматченко, П. А. Плеханов, М. Р. Федоров // Автоматика, связь, информатика. – 2008. – № 12. – С. 39–41.
22. Красковский, А. Е. Менеджмент безопасности движения поездов на «Пространстве 1520» / А. Е. Красковский, В. А. Касаткин, П. А. Плеханов // Железнодорожный транспорт. – 2011. – № 5. – С. 51–56.
23. Красковский, А. Е. Развитие системы управления безопасностью движения на железнодорожном транспорте в международном сообщении / А. Е. Красковский, В. Г. Рейнгардт, П. А. Плеханов // Транспорт Российской Федерации. – 2010. – № 6 (31). – С. 40–43.
24. Беляев, В. М. Основы менеджмента на транспорте / В. М. Беляев и др. – Москва : Издательский центр «Академия», 2010. – 320 с.
25. Буралев, Ю. В. Менеджмент на транспорте / Ю. В. Буралев и др.; под общ. ред. Н. Н. Громова и В. А. Персианова. – Москва : Издательский центр «Академия», 2010. – 528 с.
26. Покровский, А. К. Исследование систем управления (транспортная отрасль) / А. К. Покровский. – Москва : Кнорус, 2010. – 360 с.
27. Покровский, А. К. Риск-менеджмент на предприятиях промышленности и транспорта / А. К. Покровский. – Москва : Кнорус, 2011. – 160 с.
28. Красковский, А. Е. Проблемы обеспечения безопасности движения на пространстве 1520 мм / А. Е. Красковский, П. А. Плеханов // Евразия Вести. – 2011. – № 1 – С. 22.
29. Шматченко, В. В. Интеграция систем менеджмента качества, охраны труда, охраны природы и безопасности движения / В. В. Шматченко, В. Г. Иванов, П. А. Плеханов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2009. – № 3 (20). – С. 207–219.
30. Шматченко, В. В. Проектирование интегрированных систем менеджмента / В. В. Шматченко, В. Г. Иванов, П. А. Плеханов // Эксплуатация морского транспорта. – 2009. – № 3 (57). – С. 15–20.

# Стандартизация и сертификация

УДК 656.257:681.32

## Экспертная программа для проведения испытаний технологического программного обеспечения систем микропроцессорной централизации

*Д. А. Васильев, С. В. Гизлер, О. А. Наседкин, М. П. Шайфер*

Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»

**Аннотация.** Авторами разработана эталонная модель станции, позволяющая описать зависимости, лежащие в основе логики микропроцессорной централизации. На ее основе реализована экспертная программа, применяемая для проведения испытаний технологического программного обеспечения систем микропроцессорной централизации.

**Ключевые слова:** микропроцессорная централизация; технологическое программное обеспечение; испытания на безопасность; эталонная модель станции; экспертная программа.

### 1 Введение

При проведении испытаний технологического программного обеспечения (ТПО) систем микропроцессорной централизации на безопасность функционирования ключевыми задачами являются определение набора тестов и анализ результатов тестирования. В настоящий момент в основном эти задачи решаются экспертным методом, однако большой объем работы и ее сложность обуславливают высокую вероятность ошибки в процессе их решения – легко можно пропустить ту или иную проверку в программе испытаний или не обратить внимания на некорректное поведение тестируемой программы. Очевидно, что следует стремиться к автоматизации максимально возможного количества тестов, оставив эксперту только нетривиальные проверки, чтобы минимизировать влияние человеческого фактора.

Таким образом, необходимо разработать программу, определяющую минимальный набор тривиальных проверок ТПО с учетом специфики конкретной системы микропроцессорной централизации, особенностей то-

пологии станции и эксплуатационных условий и анализирующую поведение ТПО в процессе испытаний на наличие нарушений безопасности и корректности функционирования.

Экспертная программа (ЭП), реализующая вышеприведенные требования, была разработана в ИЦ ЖАТ ПГУПС и применялась для испытаний ТПО системы ЭЦ-ЕМ, а также для определения перечня необходимых проверок при замене ТПО ЭЦ-ЕМ на станциях в связи с внесением изменений в топологию станции.

### 2 Описание экспертной программы

Исходными данными для ЭП являются односторонний план станции, таблица взаимозависимостей и информация об особенностях тестируемой системы. Для получения списка проверок необходимо задать цель испытаний и критерий отбора проверок. В случае замены ТПО при изменении топологии станции нужно указать экспертной программе измененные объекты станции, характер этих изменений и, возможно, дополнительные требования к построению тестов. После этого ЭП автоматически формирует программы проверок, которые могут использоваться для испытаний ТПО как часть комплексного тестирования системы или для сравнения с программами проверок, предложенными разработчиками системы.

Анализ поведения ТПО может производиться как в реальном времени, в процессе испытаний, так и после проведения испытаний, на основе полученных протоколов. И в том и в другом случае ЭП анализирует поведение ТПО, обрабатывая информацию о со-

бытиях, происходящих в процессе тестирования, и выдавая сообщения в случае, если обнаруживаются ошибки в функционировании программного обеспечения системы микропроцессорной централизации. Для анализа в реальном времени ЭП имеет интерфейс для подсоединения к имитатору, на ко-

тором проводятся испытания ТПО различных систем МПЦ (рис. 1).

Структура имитатора и его применение при проведении испытаний программного обеспечения систем МПЦ подробно рассмотрены в [1, 2].

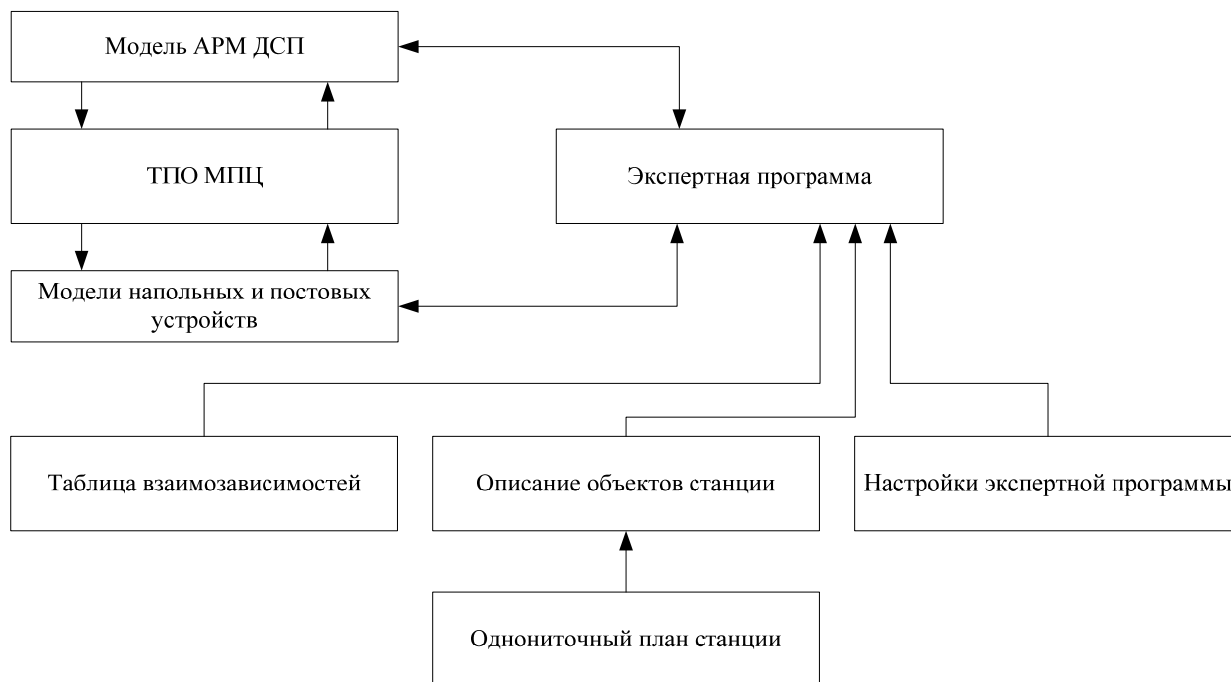


Рис. 1 Применение экспертной программы для тестирования ТПО МПЦ в реальном времени

### 3 Эталонная модель станции

ЭП должна реализовывать эталонную модель станции (ЭМС), построенную на базе одноточного плана станции и таблицы взаимозависимостей (ТВЗ). Основу ЭМС составляет граф станции, состоящий из таких элементов, как участки, стрелки, светофоры, тупики и др., что аналогично традиционному географическому принципу, используемому при создании релейных систем электрической централизации. Однако в ЭМС добавлены особые типы связей для моделирования различных отношений между элементами и особые, дополнительные типы элементов (ДЭ), позволяющие более полно и эффективно проводить моделирование и анализ системы ЭЦ. Среди введенных в ЭМС дополнительных элементов можно указать такие элементы, как «граница области» и «вариант прохождения».

Дополнительный элемент «граница области» используется для выделения подмножества элементов графа, объединенных некоторым общим свойством. Это позволяет описать границы станции, парка, горловины, области изменений, зоны управления дежурного и т. п.

Дополнительный элемент «вариант прохождения» используется для описания прохождения маршрута через узел графа станции. В зависимости от типа узла графа это может быть вариант прохождения стрелки, светофора, участка или стрелочной секции. «Вариант прохождения» дает возможность получить список маршрутов, проходящих через любой узел графа станции в заданном направлении и при заданных условиях (например, при данном положении стрелки). Важно, что элементы типа «вариант прохождения» и их связи строятся автоматически, путем перебора таблицы маршрутов.



Некоторые элементы являются составными. Входящие в них подэлементы указываются с помощью связей. Такими элементами являются, например, «стрелочная секция» и «маршрут».

Для каждого элемента в базу данных заносится запись, содержащая символьное имя, символьный тип, список дополнительных характеристик элемента, список связей с другими элементами и блок двоичных данных. В блоке двоичных данных содержатся адреса записей другой базы данных, в которых с отметкой времени фиксируются события, происходящие с элементами в процессе моделирования работы системы железнодорожной автоматики и телемеханики.

Отношения между некоторыми парами элементов задаются с помощью направленных связей. Первый элемент в паре связываемых элементов назовем начальным, а второй — конечным. Для каждой связи всегда имеется связь и противоположного направления. Все связи элемента, для которых он является начальным, организованы в список, который, в свою очередь, включен в запись элемента в базе данных. Порядок связей в списке в ряде случаев имеет смысловую нагрузку. Например, в записи маршрута присутствует список связей с вариантами прохождения элементов и секций. Порядок в этом списке связей соответствует последовательности прохождения трассы маршрута через эти элементы и секции.

Каждая связь имеет идентификатор связи, тип конечного элемента, имя конечного элемента, идентификатор обратной связи (от конечного элемента к начальному) и ссылку на конечный элемент в базе данных. Для выбранного начального элемента в его списке связей все идентификаторы связей различны. Сортировка по этому идентификатору обеспечивает нужный порядок связей в списке. Тип связи определяется типами начального и конечного элементов. Идентификатор связи раскладывается на две составляющие: одна составляющая позволяет выделить группу связей из общего списка связей данного начального элемента, а вторая составляющая позволяет выделить связь из группы, в которой связи упорядочены. Группа связей может состоять и из одной связи. Каждая группа связей имеет определенную смысловую нагрузку. Так, в элементе «стрелочная сек-

ция» имеется группа связей с элементами типа «стрелка». Наличие такой связи в этой группе означает, что стрелка входит в секцию.

Такая схема хранения в ЭМС информации о маршрутах и связях маршрутов с элементами, через которые они проходят, дает больше возможностей, чем прямая связь маршрута с элементами. Например, при анализе объекта станции мы можем легко получить список маршрутов, проходящих через данный объект в заданном направлении.

#### 4 Структура экспертной программы

Структура экспертной программы представлена на рис. 2. Основу ее составляют две базы данных — *база данных статических объектов*, содержащая постоянную, не изменяющуюся в процессе испытаний информацию, и *база состояний объектов*, содержащая динамически изменяющиеся характеристики объектов с привязкой ко времени их изменения. Эти базы данных являются основой реализации ЭМС в экспертной программе.

Поступающие от имитатора в процессе проведения испытаний технологические события (например, информация о занятости секций, положении стрелок, показаниях сигналов) обрабатываются *модулем анализа событий*, который на основании последовательности событий по каждому объекту и заданных параметров выдает сообщения об ошибке в случае обнаружения некорректного поведения тестируемого ПО.

*Модуль генерации программ* проверок формирует тестовые программы для проведения испытаний ТПО, основываясь на анализе информации, получаемой из *базы данных статических объектов*, в том числе на информации об изменениях топологии станции.

Для ввода данных в ЭП на основе документации по станции используется *модуль подготовки данных для экспертной программы*. Он включает визуальные средства ввода данных и механизм контроля их корректности с возможностью автоматического вычисления всех возможных характеристик объектов. *Модуль импорта данных из форматов других программ*, как следует из его названия, позволяет загружать в экспертную программу данные, представленные, например, в формате имитатора или какой-либо системы МПЦ.

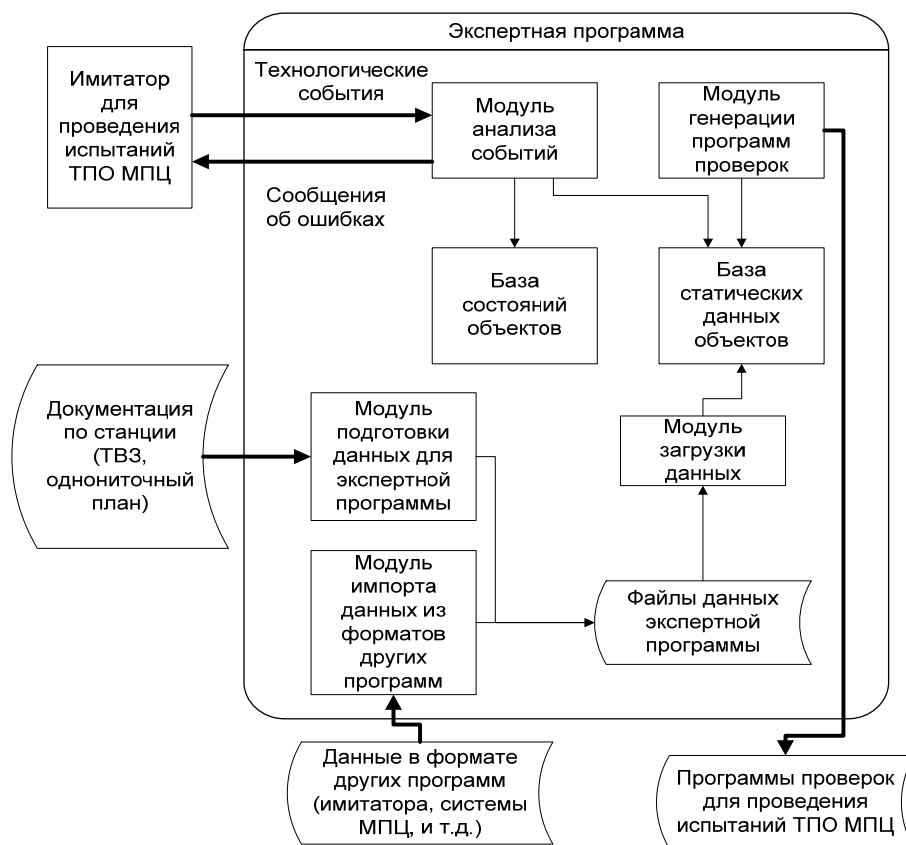


Рис. 2 Структура экспертной программы

## 5 Заключение

Экспертная программа, разработанная специалистами ИЦ ЖАТ ПГУПС, применялась в составе имитационного комплекса при проведении испытаний на безопасность технологического программного обеспечения различных систем микропроцессорной централизации. Возможности программы также широко использовались для определения набора необходимых проверок при замене ТПО на станциях, оборудованных системами ЭЦ-ЕМ и МПЦ-2. Ограничения для применения ЭП были вызваны в основном отсутствием единообразного и формализованного представления всей информации по станции

в электронном виде, что приводило к необходимости прибегать к ручному вводу данных. В остальном использование экспертной программы подтвердило целесообразность ее разработки.

## Библиографический список

1. Наседкин, О. А. Методическое и техническое обеспечение испытаний микропроцессорных систем // Автоматика, связь, информатика / О. А. Наседкин, Д. А. Васильев, А. М. Белоус. – 2013. – № 12. – С. 23–27.
2. Gavzov, D. W. Sicherheitsnachweise für mikroelektronische Eisenbahnsignaltechnik // Signal+Draht – 2001. – № 12. – Pp. 44–47.

# Электронное моделирование

УДК 519.876.5

## Метод порционного моделирования транспортных систем массового обслуживания

Д. С. Марков, В. Б. Соколов

Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»

**Аннотация.** Предложен метод порционного моделирования сложных систем массового обслуживания (ССМО). Метод позволяет выполнять исследования в различных направлениях жизнедеятельности систем железнодорожной автоматики в рамках ССМО с минимальными затратами вычислительных ресурсов и машинного времени.

**Ключевые слова:** дискретные процессы; системы массового обслуживания; имитационное моделирование; метод порционного моделирования.

### 1 Введение

На кафедре «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ПГУПС в течение многих лет проводятся работы по созданию единого ряда имитационных моделей (ИМ) автоматизированных технологических комплексов управления движением поездов; объектов информационного обеспечения процессов технической эксплуатации систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ); систем электронного документооборота технической документации СЖАТ и др.

Концептуальной основой ИМ в приведенных приложениях является широко распространенная для исследования дискретных процессов математическая схема массового обслуживания, причем объекты моделирования рассматриваются как сложные сетевые системы массового обслуживания (ССМО) [1, 2] с разнородными потоками обслуживаемых заявок. В качестве заявок в зависимости от назначения исследуемой системы рассматриваются: подвижные единицы; вагоны и грузы; пассажиры; информационные сообщения; электрические сигналы; комплекты технических документов и т. п. Следует отметить, что в классических моделях систем

массового обслуживания заявки рассматриваются как единичные объекты. Именно такой подход применен в указанных выше ИМ. Это дает возможность исследовать временные характеристики обслуживания потоков заявок, но требует, особенно для сложных систем, больших затрат машинного времени на проведение серий имитационных экспериментов. Однако в тех случаях, когда интерес представляют такие показатели, как дефицит (профицит) пропускных способностей устройств и подсистем исследуемого объекта, наличие в системе очередей заявок и их величина, распределение данных характеристик во времени и т. п., можно использовать подход, позволяющий значительно уменьшить объем вычислительных процедур и на порядки сократить затраты времени на моделирование. Для решения поставленных задач в данной работе предложен метод порционного моделирования (МПМ) ССМО. Основным понятием МПМ является *порция заявок*.

### 2 Метод порционного моделирования

*Порция* – это совокупность заявок, поступающих в систему за заданный интервал времени, которая рассматривается как элемент потока заявок со своими характеристиками в каждом конкретном исследовании. Порция  $P$  описывается следующими характеристиками.

1. *Размер порции*  $K_p$ . Максимальным размером порции является весь поток заявок за исследуемый период времени, например за смену, сутки и т. д., минимальным – одна заявка – единичная порция. Размер порции от максимального до минимального значения выбирается в зависимости от задач исследования, например, во время наибольшей нагрузки системы.

2. Событие  $E_{kp}(t+\Delta t)$ , состоящее в поступлении порции в систему в момент  $t+\Delta t$ , если предыдущая порция поступила в момент времени  $t$ .

3. Функция  $F(\Delta t, K_p)$  распределения длительности интервалов между моментами поступления порций в систему и их величин.

4. Функция  $\lambda_t = f(t)$ , определяющая интенсивность поступления порций заявок от текущего времени.

Функции  $F(\Delta t, K_p)$  и  $\lambda_t = f(t)$  для транспортных и распределенных информационных систем чаще всего определяются обработкой автоматически регистрируемых статистических данных по потокам заявок.

Предложенное описание порции заявок дает возможность построить универсальные программные блоки их генерации и выполнить привязку генераторов к конкретному потоку на уровне исходных данных. Моделирование процесса обслуживания заявок МПМ основано на расчете характеристик обслуживания порций заявок по пропускным способностям устройств и емкостям накопителей. Данный метод позволяет оценивать операционные характеристики исследуемых систем и не требует выполнения большого объема вычислительных процедур. При использовании МПМ описание процесса обслуживания  $P$  устройством в течение шага моделирования  $\Delta t$  заключается в следующем:

1) вычисляется пропускная способность устройства  $u$  в течение шага моделирования  $Nu_{\Delta t}$ :

$$Nu_{\Delta t} = \frac{Nu_n \cdot \Delta t}{K_{пр}}, \quad (1)$$

где  $Nu_n$  – нормативная пропускная способность устройства за единицу времени;

$\Delta t$  – шаг моделирования;

$K_{пр}$  – коэффициент, необходимый для приведения  $Nu_n$  и  $\Delta t$  к одной временной единице;

2) определяется величина очереди  $Qu_{\Delta t}$  перед устройством или профицита (при отрицательном значении  $Qu_{\Delta t}$ ) обслуживания порции заявок размером  $K_p$ :

$$Qu_{\Delta t} = K_p - Nu_{\Delta t}; \quad (2)$$

3) вычисляется загрузка устройства  $Zu_{\Delta t}$ :

$$Zu_{\Delta t} = \frac{Qu_{\Delta t}}{Nu_{\Delta t}}. \quad (3)$$

Величина очереди определяет дефицит пропускной способности устройства, причем, чем выше значение  $Zu_{\Delta t}$ , тем больше дефицит. Отрицательное значение  $Zu_{\Delta t}$  указывает на профицит  $Nu_{\Delta t}$ .

При описании процесса обслуживания порции  $P$  в течение шага моделирования  $\Delta t$  многоканальным обслуживающим устройством (МОУ) или группой однотипных устройств вычисление пропускной способности  $Nu_{M\Delta t}$  осуществляется аналогично выражению (1) с учетом количества однотипных устройств в группе  $M$ :

$$Nu_{M\Delta t} = \frac{M \cdot Nu_{\Delta t} \cdot \Delta t}{K_{пр}}. \quad (4)$$

Для формализации очередей  $Q$  в МПМ используются объекты – накопители заявок, которые представляют например, платформы, вестибюли станций метрополитена; парки приема и отправления поездов на железнодорожных станциях; память вычислительных машин и т. п. В случае превышения размерами очередей  $\sum_{i=1}^n Qu_{i\Delta t}$  емкости накопителя  $S$  количество заявок, не поступающих в накопитель  $L$ , определяется по выражению

$$L = \sum_{i=1}^n Qu_{i\Delta t} - S; \quad (5)$$

4) представление в МПМ многофазности обработки порций заявок осуществляется формализованным описанием последовательности их обслуживания устройствами (маршруты заявок). Для определения следования порций заявок в фазе обслуживания МОУ используется их вероятностное, логическое или смешанное распределение по отдельным устройствам с последующим объединением по маршруту. Распределение порций заявок по каналам конкретного МОУ может осуществляться, например, при помощи вероятностных логических условий  $p_r$ :

$$r = 1 \div R - 1,$$

где  $R$  – количество каналов в МОУ:

$$p_r = \begin{cases} 1 - c & \text{вероятностью } V_r; \\ 0 - c & \text{вероятностью } 1 - V_r. \end{cases} \quad (6)$$

### 3 Модель пересадочного узла метрополитена

В данной работе представлена построенная на основе МПМ модель обслуживания пассажиропотоков пересадочного узла (ПУ) метрополитена. Модель предназначена для оценки загрузки устройств ПУ (эскалаторов на вход и выход, эскалаторов на переходах, турникетов различного назначения, касс, входных и выходных дверей и т. п.), выбора режимов работы устройств в соответствии с величинами пассажиропотоков и определения парности поездов на линиях метрополитена.

Исходными данными для МПМ являются пропускная способность устройств, емкость накопителей (вестибюли, платформы, зоны между турникетами и эскалаторами, пешеходные переходы внутри ПУ), допустимая наполняемость вагонов. Значения всех перечисленных данных принимаются в соответствии с нормативными документами метрополитена.

Заявками на обслуживание устройствами ПУ и поездами метрополитена являются пассажиропотоки [3]. Порция  $P$  – это совокупность заявок, поступивших в ПУ за конкретный период времени  $\Delta t$ . Количество заявок в порции определяется длительностью интервала  $\Delta t$  и интенсивностью потока, зависящей от текущего времени суток  $\lambda_t = f(t)$ ,  $F(\Delta t, K_p)$ .

Длительность  $\Delta t$  может быть постоянной или переменной в зависимости от целей конкретного исследования. Значения пассажиропотоков на станции ПУ в привязке к текущему времени берут по данным автоматизированной системы контроля оплаты проезда (АСКОП-М) с минимальным интервалом 5 минут. На основе данных АСКОП-М для каждой серии имитационных экспериментов определяются величины  $\Delta t$  и соответствующее количество заявок в порциях  $P$  по всему потоку [4].

Пересадочный узел и его устройства представляются в МПМ ПУ в виде сложной сетевой модели массового обслуживания.

Последовательность действий и логических условий по обслуживанию заявок устройствами описывается в виде множества сетевых моделей ПУ (маршрутов), выполненных на языке параллельных логических схем алгоритмов (ПЛСА) [5].

В соответствии с этим МПМ ПУ (рис. 1) включает в себя следующие сетевые модели:

- модели входа пассажиров в вестибюли ПУ ( $U_1, U_2, U_3, U_4$ );
- модели выхода пассажиров в вестибюли ПУ ( $U_5, U_6, U_7, U_8$ );
- модель распределения пассажиров по платформам и переходам ПУ.

На рис. 2 представлена сетевая модель  $U_1$  входа пассажиров для вестибюля 1 станции 1 ПУ и даны элементы алфавита ПЛСА для этой модели.

На языке ПЛСА эта модель описывается следующим образом:

$$U_1 = u_1 p_1 \uparrow^1 u_2 \downarrow^1 p_2 \uparrow^2 p_3 \uparrow \uparrow^3 u_4 \omega \uparrow^5 \downarrow^3 u_5 \omega \uparrow^6 \downarrow^2 u_3 \downarrow^5 \downarrow^6 u_6. \quad (7)$$

Аналогично производится описание моделей  $U_2, U_3, U_4$ :

$$U_2 = u_7 p_4 \uparrow^1 u_8 \downarrow^1 p_5 \uparrow^2 p_6 \uparrow^3 u_{10} \omega \uparrow \uparrow^5 \downarrow^3 u_{11} \omega \uparrow^6 \downarrow^2 u_9 \downarrow^5 \downarrow^6 u_{12}, \quad (8)$$

$$U_3 = u_{13} p_7 \uparrow^1 u_{14} \downarrow^1 p_8 \uparrow^2 p_9 \uparrow \uparrow^3 u_{16} \omega \uparrow^5 \downarrow^3 u_{17} \omega \uparrow^6 \downarrow^2 u_{15} \downarrow^5 \downarrow^6 u_{18}, \quad (9)$$

$$U_4 = u_{19} p_{10} \uparrow^1 u_{20} \downarrow^1 p_{11} \uparrow^2 p_{12} \uparrow \uparrow^3 u_{22} \omega \uparrow^5 \downarrow^3 u_{23} \omega \uparrow^6 \downarrow^2 u_{21} \downarrow^5 \downarrow^6 u_{24}, \quad (10)$$

Значения переменных ПЛСА (7)–(10) идентичны:  $u_1(7,13,19)$ ;  $u_2(8,14,20)$ ;  $u_3(8,14,20)$ ;  $u_3(9,15,21)$ ;  $u_4(10,16,22)$ ;  $u_5(11,17,23)$ ;  $u_6(12,18,24)$ ;  $p_1(4,7,10)$ ;  $p_2(5,8,11)$ ;  $p_3(6,9,12)$ .

На рис. 3 представлена сетевая модель  $U_5$  выхода пассажиров для вестибюля 1 станции 1 ПУ и показаны элементы алфавита ПЛСА для этой модели.

На языке ПЛСА эта модель описывается следующим образом:

$$U_5 = u_{25} u_{26} u_{27}. \quad (11)$$

Аналогично производится описание моделей  $U_6, U_7, U_8$ :

$$U_6 = u_{28} u_{29} u_{30}, \quad (12)$$

$$U_7 = u_{31} u_{32} u_{33}, \quad (13)$$

$$U_8 = u_{34} u_{35} u_{36}. \quad (14)$$

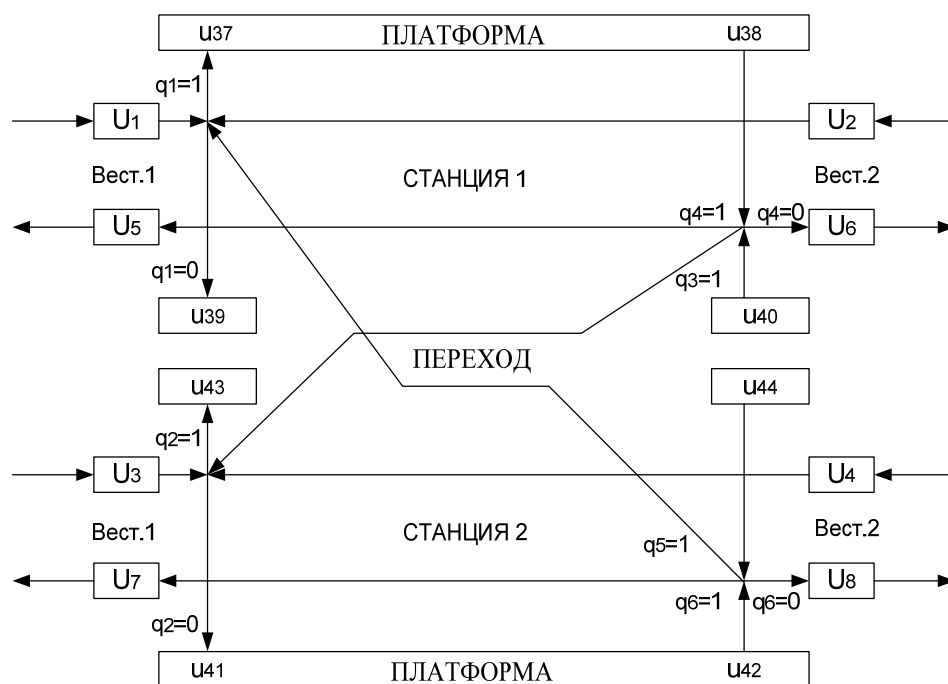
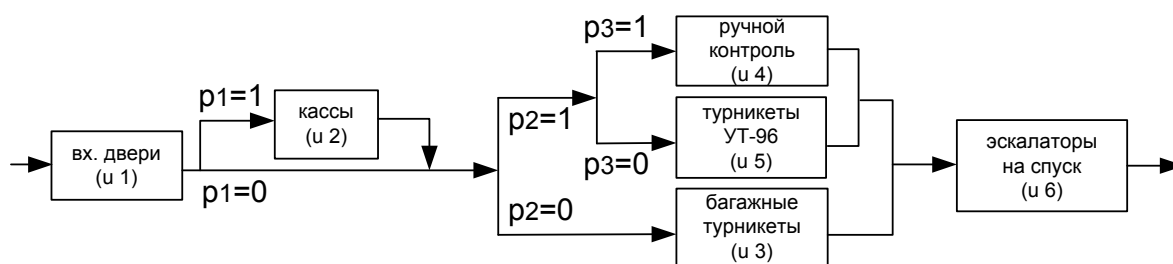
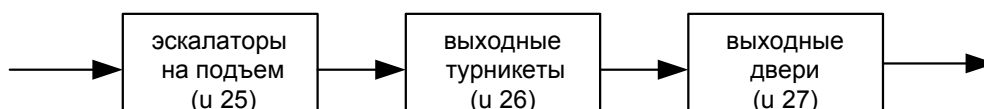


Рис. 1 Сетевая модель пересадочного узла

Рис. 2 Сетевая модель  $U_1$  входа пассажиров для вестибюля 1 станции 1 пересадочного узлаРис. 3 Сетевая модель  $U_5$  выхода пассажиров для вестибюля 1 станции 1 пересадочного узла

Значения переменных ПЛСА (11)–(14) идентичны:  $u_{25}(28,31,34)$ ;  $u_{26}(29,32,35)$ ;  $u_{27}(30,33,36)$ .

Алфавит ПЛСА для модели распределения пассажиров по платформам и переходам ПУ содержит следующие элементы:

– операции:

$u_{37}$  – посадка на поезда четного направления на станции 1;

$u_{38}$  – высадка из поездов четного направления на станции 1;

$u_{39}$  – посадка на поезда нечетного направления на станции 1;

$u_{40}$  – высадка из поездов нечетного направления на станции 1;

$u_{41}$  – посадка на поезда четного направления на станции 2;

$u_{42}$  – высадка из поездов четного направления на станции 2;

$u_{43}$  – посадка на поезда нечетного направления на станции 2;

$u_{44}$  – высадка из поездов нечетного направления на станции 2;

– логические условия:

$q_1 = 1$  – на поезда четного направления станции 1 с вероятностью  $V'_1$ ;

$q1 = 0$  – на поезда нечетного направления станции 1 с вероятностью  $(1 - V_1')$ ;

$q2 = 1$  – на поезда четного направления станции 2 с вероятностью  $V_1''$ ;

$q2 = 0$  – на поезда нечетного направления станции 2 с вероятностью  $(1 - V_1'')$ ;

$q3 = 1$  – на переход из поездов станции 1 с вероятностью  $V_2''$ ;

$q3 = 0$  – на выходы из поездов станции 1 с вероятностью  $(1 - V_2'')$ ;

$q4 = 1$  – на выход 1 станции 1 с вероятностью  $V_3'$ ;

$q4 = 0$  – на выход 2 станции 1 с вероятностью  $(1 - V_3')$ ;

$q5 = 1$  – на переход из поездов станции 2 с вероятностью  $V_2''$ ;

$q5 = 0$  – на выходы из поездов станции 2 с вероятностью  $(1 - V_2'')$ ;

$q6 = 1$  – на выход 1 станции 2 с вероятностью  $V_3''$ ;

$q6 = 0$  – на выход 2 станции 2 с вероятностью  $(1 - V_3'')$ .

Таким образом, процесс обработки порций заявок в МПМ ПУ на языке ПЛСА описывается так:

$$U_9 = u_{42}u_{44}q_5 \uparrow^1 U_1 U_2 q_1 \uparrow^2 u_{37} \omega \uparrow^3 \downarrow^2 u_{39} \omega \uparrow^4 \downarrow^1 q_6 \uparrow^5 U_7 \omega \uparrow^6 \downarrow^5 U_8 \downarrow^3 \downarrow^4 \downarrow^6; \quad (15)$$

$$U_{10} = u_{38}u_{40}q_3 \uparrow^1 U_3 U_4 q_2 \uparrow^2 u_{43} \omega \uparrow^3 \downarrow^2 u_{41} \omega \uparrow^4 \downarrow^1 q_4 \uparrow^5 U_5 \omega \uparrow^6 \downarrow^5 U_6 \downarrow^3 \downarrow^4 \downarrow^6, \quad (16)$$

где  $U_9$  и  $U_{10}$  описывают обслуживание пассажиропотоков устройствами первой и второй станций соответственно с учетом их движения по переходу в разных направлениях.

#### 4 Заключение

Предложенная модель ПУ позволяет:

1) оценивать дефицит и профицит пропускной способности устройств ПУ;

2) определять показатели качества обслуживания пассажиропотоков (операционные характеристики);

3) оценивать влияние надежности устройств ПУ (в первую очередь различных эскалаторов и турникетов) на показатели первой и второй групп;

4) оценивать режимы работы пересадочного узла;

5) определять требуемую парность поездов.

Показатели п. 1–4 определяются в зависимости от значений  $\Delta t$ ,  $\lambda_t = f(t)$ ,  $F(\Delta t, K_p)$ .

В настоящее время проводятся работы по более полному учету временных параметров при обслуживании порций заявок в МПМ. Предполагается использовать модернизированный метод порционного моделирования для исследования распределенных информационных систем в области железнодорожной автоматики и телемеханики.

#### Библиографический список

1. *Советов, Б. Я.* Моделирование систем / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. – Москва : Высшая школа, 2001. – 343 с.
2. *Марков, Д. С.* Матричный метод формализации имитационных моделей сложных систем массового обслуживания / Д. С. Марков, П. Е. Булавский // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2010. – № 4. – С. 186–195.
3. *Имитационная модель обслуживания пассажиропотоков на метрополитене* / М. Н. Василенко, Д. С. Марков, В. Б. Соколов, К. Г. Сорокин, Т. Ю. Константинова // Конструирование, сертификация и техническая эксплуатация устройств и систем железнодорожной автоматики и телемеханики : сб. науч. тр.; ПГУПС, 2003. – С. 17–25.
4. *Марков, Д. С.* Определение загрузки станций и узлов Петербургского метрополитена в экспертной системе / Д. С. Марков, В. А. Яковлев, В. Б. Соколов // Автоматика и телемеханика железных дорог России. Техника, технология, сертификация : сб. науч. тр. ПГУПС, 2009. – С. 45–50.
5. *Лазарев, В. Г.* Синтез управляющих автоматов / В. Г. Лазарев, Е. И. Пийль. – Москва : Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.

УДК 004.942+656.25

## Методы и инструментальные средства имитационного моделирования рельсовых цепей

В. А. Ходаковский\*, Д. С. Марков\*\*, М. Б. Соколов\*\*

\*Кафедра «Математика и моделирование»

\*\*Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»

**Аннотация.** Процесс анализа внедренных и синтеза разрабатываемых рельсовых цепей требует применения специальных методов. Решение этих задач в полном объеме затруднено из-за отсутствия соответствующих методов и инструментальных средств. Существующие методы анализа рельсовых цепей не позволяют обеспечить решение поставленных задач, так как не рассматривают модель реального сигнала и его преобразования элементами цепей. Разработке новых подходов и инструментальных средств для анализа и синтеза схемотехнических решений с учетом реальных условий эксплуатации посвящена данная работа.

**Ключевые слова:** процессная модель рельсовой цепи; инструментальное средство; функциональный блок модели; гибридная экспертная система.

### 1 Введение

Рельсовые цепи (РЦ) являются основным элементом всех систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ), обеспечивающих безопасность движения поездов.

Процесс модернизации существующих и разработки новых РЦ представляется непрерывным и в связи с усложнением схемотехники требует создания новых подходов и инструментальных средств для анализа и синтеза схемотехнических решений. Следует отметить что анализ РЦ с учетом реальных условий эксплуатации (изменение уровня питающего напряжения, сезонное изменение сопротивления изоляции, внешние электромагнитные воздействия и т. п.), в частности при отказах аппаратуры, является сложной научно-технической задачей, предполагающей применение специальных математических методов [1].

В настоящее время решение задач анализа и синтеза РЦ в полном объеме [2–6] за-

труднено из-за отсутствия соответствующих методов и инструментальных средств (ИС).

Существующие методы (метод замены четырехполусниками [3], обобщенный [4], относительных рельсовых цепей [5], индивидуальных регулировочных таблиц [6]) не позволяют выполнять анализ и синтез РЦ с учетом эксплуатационных условий, так как не рассматривают модель реального сигнала и его преобразования элементами рельсовых цепей.

### 2 Основные положения

Перспективное ИС должно сопровождать весь жизненный цикл РЦ и являться основой создания ряда АРМов для решения задач разработки, проектирования и эксплуатации рельсовых цепей, а именно: «АРМ разработчика РЦ», «АРМ проектировщика РЦ», «АРМ анализа схемотехнических решений РЦ», «АРМ эксплуатации», «ИС для разработки диагностической подсистемы РЦ в системах технического диагностирования и мониторинга (СТДМ)», «ИС для создания обучающих курсов по РЦ в автоматизированной обучающей системе (АОС) СЖАТ». В свою очередь АРМы должны представлять собой системы поддержки принятия решений, реализованные по схемам гибридных экспертных систем (ГЭС), в которых основу базы знаний составляет имитационная модель РЦ [7]. Использование ГЭС особенно эффективно при распознавании образов, обнаружении неисправностей в технических системах и т. д., то есть в отраслях, где присутствуют как четкие, так и нечеткие знания.

*АРМ разработчика РЦ* – это функционально полный АРМ, наиболее гибкий по использованию функциональных возможностей имитационной модели РЦ, наименее



формализованный с точки зрения принятия схемотехнических решений, содержащий имитаторы технических средств воздействия и измерения. АРМ предполагает интерактивный режим работы по проверке правильности функционирования отдельных схемных узлов, разработке новых схемотехнических решений, а также подбору параметров элементов РЦ [7].

*АРМ проектировщика* РЦ обеспечивает проверку правильности проектных решений; составление регулировочных таблиц; подбор параметров отдельных элементов для конкретных рельсовых цепей по проекту [7].

*АРМ анализа схемотехнических решений РЦ* обеспечивает выполнение имитационных экспериментов по программе проведения испытаний для доказательства безопасности функционирования РЦ во всех режимах.

*АРМ эксплуатации* обеспечивает проверку функционирования отдельных схемных узлов и рельсовой цепи в целом при внешних воздействиях и изменении параметров рельсовых линий, а также составление регулировочных таблиц сезонного графика техобслуживания.

*ИС для разработки диагностической подсистемы РЦ в СТДМ* обеспечивает формирование на основе проведения серий имитационных экспериментов, в том числе и при отказах элементов РЦ, базы данных графических образов («базы образов») соответствующих сигналов. Использование накопленной «базы образов» сигналов нормально работающей и отказавшей рельсовой цепи дает возможность повысить качество диагностирования РЦ.

*ИС для создания обучающих курсов (ИСО) в АОС СЖАТ* – это виртуальная «лабораторная установка» для проведения исследований обучающимися, составления регулировочных таблиц и настройки РЦ по ним; создания тренажеров по поиску неисправностей. В соответствии с этим ИСО должно включать имитаторы внешних воздействий, средств измерения и программы поиска неисправностей в РЦ.

Решение поставленных выше задач обеспечивается разработкой имитационной модели (ИМ) рельсовой цепи как электротехнического устройства. В работе предлагается применить одну из разновидностей ИМ – процессную модель [8], позволяющую моделировать преобразования электрического сигнала элементами РЦ [9]. В такой постановке процессная модель РЦ (ПМРЦ) – это совокупность математических моделей, имитирующих реальные процессы преобразования сигналов в функциональных блоках (ФБ), причем под ФБ в данном случае понимается множество элементов электрической схемы РЦ, принадлежащих к определенному функционально законченному устройству [8].

Очевидно, что ПМРЦ должна представлять собой программно реализованный «заменитель» реальной рельсовой цепи и может являться основой базы знаний всех указанных выше АРМов. С учетом предложенного выше определения ПМРЦ как символьная модель обладает классификационными характеристиками, представленными на рис. 1.

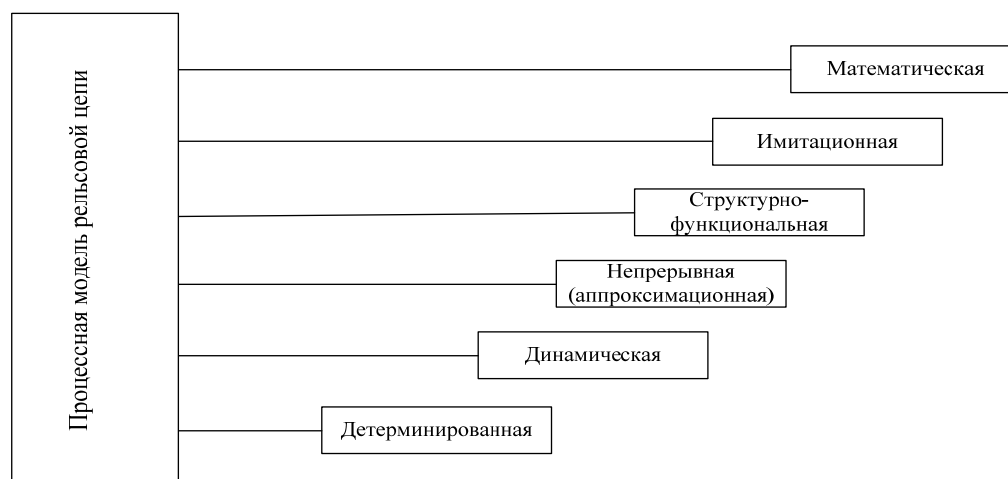


Рис. 1 Характеристика процессной модели рельсовых цепей

Приведенные свойства характеризуют ПМРЦ как единую модель с разных сторон: с математической – аналитическое описание ФБ; имитационной – алгоритмическое и информационное соединение аналитических моделей ФБ по топологии РЦ; структурно-функциональной – аналитически описанные функции, реализуемые ФБ, соединяются в соответствии со структурой РЦ; непрерывной и динамической – отображение реального сигнала и его преобразований в моделях ФБ. По мнению авторов, некоторого пояснения требует определение ПМРЦ как детерминированной модели.

Очевидно, что на реальную рельсовую цепь воздействует множество случайных факторов, характеризующих реальные условия эксплуатации. Кроме того, элементы РЦ имеют случайные технологические разбросы параметров и сложные зависимости сопротивлений изоляции и рельсовых линий от внешних факторов и качества технического обслуживания. Однако имитационные эксперименты на ПМРЦ с учетом указанных факторов должны проводиться как детерминированные с конкретными количественными значениями исследуемых факторов и оценкой их влияния на функционирование РЦ. Такие эксперименты позволяют определить значения случайных факторов, при которых возникают интересующие пользователя состояния РЦ. Вероятностные характеристики возникновения тех или иных состояний РЦ должны рассчитываться с использованием других аналитических или имитационных моделей, а именно, моделей надежности функционирования РЦ, рассмотрение которых выходит за рамки данной работы.

### 3 Концепция синтеза процессной модели рельсовой цепи

В данной работе для синтеза моделей ФБ использована математическая схема «черного ящика», позволяющая воспроизвести переходную функцию ФБ по известным соотношениям входных воздействий и откликов на них. Условно все ФБ рельсовых цепей разделены на следующие группы:

- блоки, генерирующие некоторые сигналы (процессы);
- блоки, преобразующие входные сигналы в сигналы другого вида (фильтры);

- блоки, выполняющие логические (переключателные) функции.

В свою очередь генерирующие блоки либо имитируют процесс генерации путем учета функционирования элементов блока, либо формируют сигнал путем считывания из блока памяти, либо синтезируют сигнал как сумму импульсов, имеющих ограниченный в некоторой полосе спектр.

Преобразующие блоки выполняют следующие функции:

- преобразование входной совокупности сигналов (процессов) в выходную совокупность (например, модуляция или демодуляция);
- преобразование входного процесса в выходной процесс (например, трансформация).

Набор входных воздействий (сигнатур) должен быть достаточно представительным, чтобы модель ФБ была адекватна образцу. Зная отклики реального образца на данные сигнатуры, строится имитационная математическая модель, которая на каждую сигнатуру выводит соответствующую реакцию. В простейшем случае такая модель должна включать логическую схему, распознающую сигнатуру и выдающую на выход модели соответствующий отклик, хранящийся в памяти. Следует отметить, что переходная функция ФБ может быть получена как путем натурных измерений, так и расчетным при наличии соответствующих аналитических моделей элементов ФБ. Аналогичным образом формируются модели ФБ с учетом отказов элементов, которые представляются в ПМРЦ в виде формализованных схем отказов (ФСО).

## 4 Модели функциональных блоков

На основе предложенной концепции разработаны и ниже приведены математические модели основных ФБ тональных рельсовых цепей.

### 4.1 Модель амплитудного модулятора

Процесс амплитудной модуляции сигнала в генераторах тональных рельсовых цепей (ТРЦ) описывается выражением:

$$U_m(t) = A_0 \cos(\omega t)(1 + k \cos(\Omega t)), \quad (1)$$

где  $A_0$  – амплитуда несущей частоты;  $\omega$  – частота несущей;

$\Omega$  – модулирующая частота;  
 $k$  – коэффициент глубины модуляции.

При коэффициенте глубины модуляции  $k = 1$  спектр такого сигнала имеет три компоненты – несущую (с мощностью 0,5 мощности сигнала) и две боковые с частотами  $(\omega + \Omega)$  и  $(\omega - \Omega)$  (каждая мощностью по 0,25 мощности сигнала).

На рис. 2 приведен график сигнала вида (1).

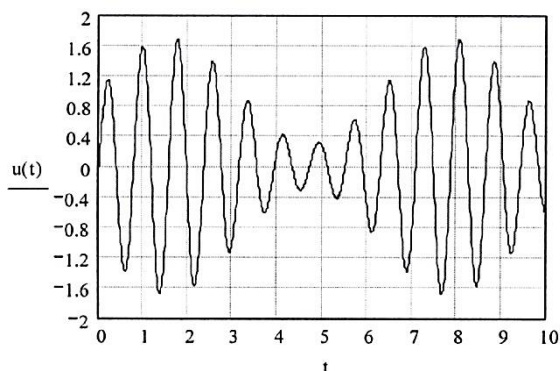


Рис. 2 Модель сигнала на выходе амплитудного генератора

#### 4.2 Модель генератора сложного сигнала

Сложный сигнал генератора ТРЦ описан как сумма импульсов, имеющих ограниченный спектр:

$$S(t) = \sum_{i=1}^n A_i \psi(2\pi f t - \pi i),$$

$$\psi(x) = \begin{cases} \frac{\sin(x)}{x} & \text{при } |x| > 0,001, \\ 1, & \text{при } |x| < 0,001, \end{cases} \quad (2)$$

где  $A_i$  – амплитуда импульса;

$2\pi f$  – верхняя граничная частота в спектре сигнала.

Для примера пусть сложный сигнал (пилообразный импульс) представлен 20 отсчетами при верхней граничной частоте  $f = 10$  Гц:

$$A := (0 \ 4 \ 3.5 \ 2.5 \ 2 \ 1.5 \ 1 \ 0 \ -1 \ -1.5 \ -2 \ -2.5 \ -3 \ -3.5 \ -4 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)^T \quad (3)$$

На рис. 3 приведен график такого сигнала.

В качестве второго примера (рис. 4) можно привести сигнал в виде одиночного синусоидального импульса, отсчеты которого представляются выражением:

$$\omega := 1 \ i : 0 \dots 19 \quad A_{i1} := 5 \sin\left(2\pi\omega \cdot \frac{i}{20}\right). \quad (4)$$

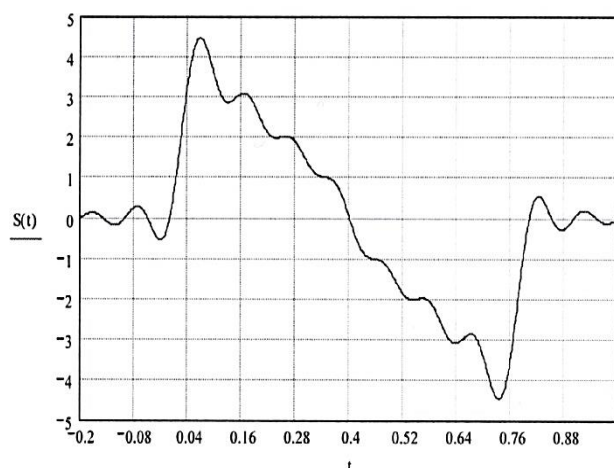


Рис. 3 Модель пилообразного импульса при  $f = 10$  Гц

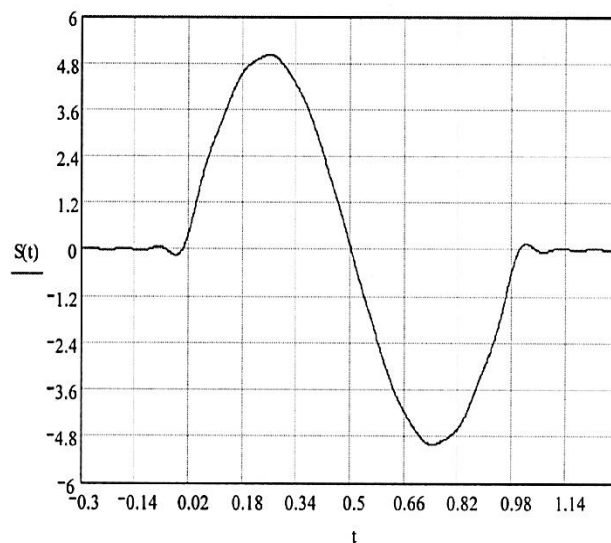


Рис. 4 Модель сигнала в виде синусоидального импульса

#### 4.3 Модель двухконтурного полосового фильтра

Полосовой фильтр фазочувствительных, кодовых и тональных РЦ представлен как последовательность фильтра высокой частоты с частотой среза  $f_v$  и фильтра низкой частоты с частотой среза  $f_n$ .

Для описания полосового фильтра используется вспомогательная функция (весовая функция идеального фильтра низкой частоты (ФНЧ) с частотой среза  $f$ ):

$$si(f, t) = \begin{cases} \frac{\sin(2\pi ft)}{2\pi ft}, & \text{при } |2\pi ft| > 0,0001, \\ 1, & \text{при } |2\pi ft| \leq 0,0001. \end{cases} \quad (5)$$

С учетом (5) весовая функция двухконтурного полосового фильтра с показателем добротности  $d$ , центральной частотой  $f_p$  и частотами среза верхней  $f_n$  и нижней  $f_v$  примет вид:

$$h(t) = si\left(f_v, t - \frac{2d}{f_p}\right) - si\left(f_n, t - \frac{2d}{f_p}\right) \quad (6)$$

Тогда обработка сигнала в полосовом фильтре описывается интегралом свертки входного сигнала и весовой функции фильтра:

$$U_{\text{вых}}(t) = \int_{t-\frac{d}{f_p}}^{t+\frac{d}{f_p}} S(\tau)h(\tau-t)d\tau. \quad (7)$$

Частотная характеристика модели полосового фильтра и реального фильтра путевого приемника ТРЦ представлена на рис. 5.

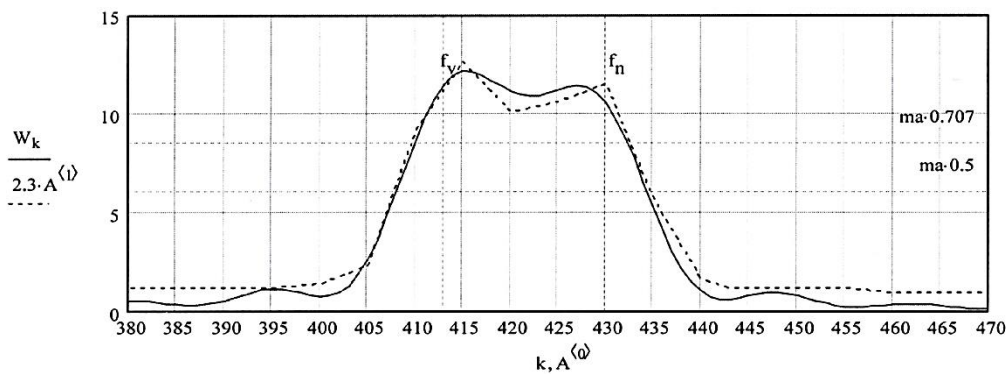


Рис. 5 Частотная характеристика модели полосового фильтра с показателем добротности  $d = 15$  и частотами среза  $f_v = 413$  Гц и  $f_n = 430$  Гц (сплошная линия) и реального фильтра путевого приемника (пунктир)

#### 4.4 Модель амплитудного демодулятора (детектора)

Процесс обработки сигнала в амплитудном демодуляторе путевого приемника ТРЦ представлен последовательными процессами:

- вычислением модуля;
- низкочастотной фильтрацией.

Вычисление модуля описано выражением:

$$U_{\text{mod}}(t) = |U_{\text{вх}}(t)|, \quad (8)$$

а низкочастотная фильтрация интегралом скользящего среднего с интервалом, равным периоду несущей частоты  $f$ :

$$U_f(t) = \frac{f}{2} \int_{t-\frac{2}{f}}^{t+\frac{2}{f}} U_{\text{mod}}(t)dt. \quad (9)$$

Итог процессов обработки сигнала в детекторе и фильтре приведен на рис. 6.

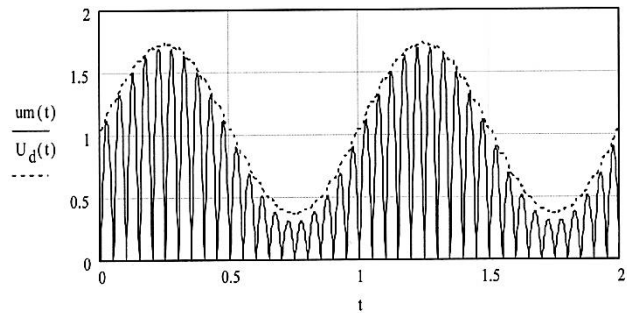


Рис. 6 Осциллограммы сигналов на выходе детектора (сплошная линия) и низкочастотного фильтра (пунктир)

#### 5 Метод соединения ФБ по топологии РЦ

Соединения функциональных блоков между собой описываются двумя матрицами инцидентий — матрицей связей входов функциональных блоков:

$$I_n = \{I_{n_{i,j}}\} \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n, \quad (10)$$

где  $m$  — число функциональных блоков, входящих в модель;

$n$  — число входов в  $i$ -й функциональный блок

и матрицей связей выходов функциональных блоков:

$$Out = \{I_{n_{i,k}}\} \quad i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, l, \quad (11)$$

где  $m$  – число функциональных блоков, входящих в модель;

$l$  – число выходов из  $i$ -го функционального блока.

Элементами матриц инцидентий является вектор, указывающий номер блока и номер выхода (для матрицы связей входов) или входа (для матрицы связей выходов).

Текущее состояние каждого функционального блока описывается двумя матрицами:

- матрицей состояния входов

$$S = \{S_{ij}\} \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n, \quad (12)$$

в которой хранятся ссылки, позволяющие вывести график процесса текущего состояния  $j$ -го входа  $i$ -го функционального блока;

- матрицей состояния выходов

$$S = \{S_{i,k}\} \quad i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, l, \quad (13)$$

где  $m$  – число функциональных блоков, входящих в модель;

$l$  – число выходов из  $i$ -го функционального блока.

В этой матрице хранятся ссылки, позволяющие вывести график процесса текущего состояния  $k$ -го выхода  $i$ -го функционального блока.

Содержание матриц состояния и графики процессов на входах и выходах функциональных блоков обновляются на каждом шаге моделирования, который выбирается исследователем.

## 6 Структура ИС

Основными требованиями к ИС моделирования РЦ являются:

- наличие достаточных математических ресурсов для описания таких сложных объектов, как рельсовая линия;
- возможность программной реализации методологического обеспечения АРМов анализа и синтеза РЦ;
- наличие сервисных возможностей, обеспечивающих интерактивный режим работы «АРМ-пользователь».

Анализ известных инструментальных средств электронного моделирования [3–5] показал, что ни одно из них не удовлетворяет предъявленным требованиям. В связи с этим в качестве платформы для апробации моделей и методов построения ПМРЦ был выбран пакет MathCad, обладающий достаточными математическими и сервисными возможностями. Однако дальнейшее развитие ИС предполагает детальный анализ и выбор программных средств, отвечающих требованиям построения АРМов РЦ.

Предложенные методы и модели с учетом сформулированных выше требований позволили синтезировать функциональную структуру ИС ПМРЦ (рис. 7).

Предложенная схема ИС ПМРЦ является функционально полной и позволяет перейти к разработке АРМов РЦ как ГЭС с использованием программных средств, позволяющих решить поставленные задачи.

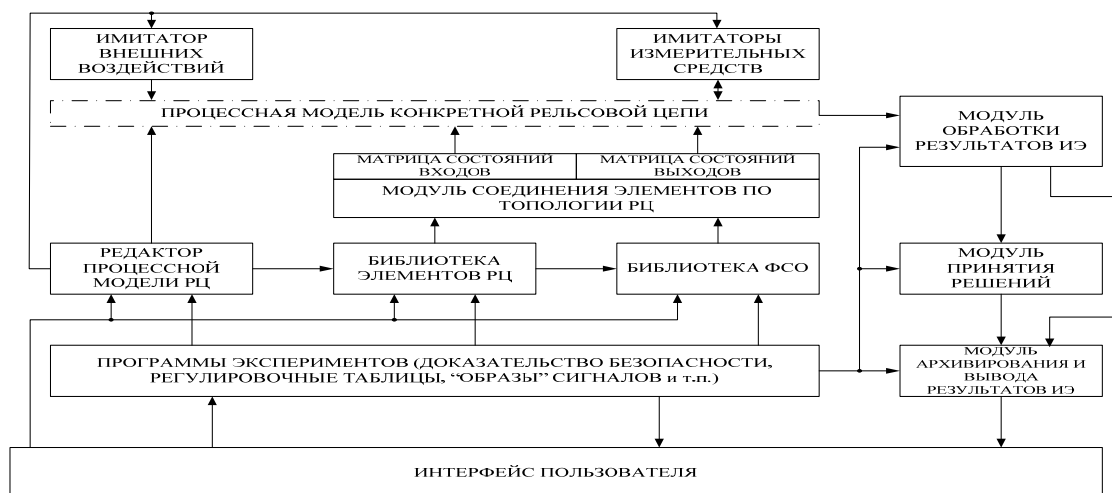


Рис. 7 Структура инструментального средства моделирования РЦ

## 7 Заключение

1. На основе предложенных концепции и математических схем ФБ в среде MathCad выполнена разработка процессной модели тональных рельсовых (ПМТРЦ). Проведены имитационные эксперименты, подтвердившие адекватность ПМТРЦ и возможность использования полученных моделей и методов как основы построения ИС для анализа и синтеза рельсовых цепей,

2. Дальнейшая разработка ИС процессного моделирования РЦ и предложенных в данной работе АРМов предполагает проведение исследований и выполнение работ по следующим основным направлениям:

- выбор программных средств, отвечающих требованиям разработки ИС, и предложенного набора АРМов;
- развитие математического аппарата с целью повышения адекватности моделирования отказов ФБ;
- синтез математических моделей ФБ существующих и перспективных рельсовых цепей;
- разработка открытой библиотеки ФБ рельсовых цепей как основной подсистемы ИС;
- разработка имитаторов внешних воздействий и средств измерения параметров РЦ;
- разработка методического обеспечения предложенного набора АРМов и соответствующего программного обеспечения.

## Библиографический список

1. Кириленко, А. Г. Электрические рельсовые цепи : учеб. пособие / А. Г. Кириленко, Н. А. Пель-

менова. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2006. – 94 с.

2. Федоров, Н. Е. Релейные и микроэлектронные системы интервального регулирования движения поездов : учеб. пособие. Часть 1 / Н. Е. Федоров. – Самара : СамГАПС, 2006. – 163 с.

3. Расчет параметров и проверка работоспособности бесстыковых тональных рельсовых цепей / М. Н. Василенко, Б. П. Денисов, В. Б. Культин, С. Н. Расстегаев // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. № 2. – Санкт-Петербург, 2006 – С. 104–112.

4. Дмитриев, В. С. Системы автоблокировки с рельсовыми цепями тональной частоты / В. С. Дмитриев, В. А. Минин. – Москва : Транспорт, 1992. – 182 с.

5. Полевой, Ю. И. Относительные рельсовые цепи : учеб. пособие для вузов / Ю. И. Полевой. – Самара: СамГАПС, 2006. – 80 с.

6. Соколов, М. Б. Моделирование аппаратуры тональных рельсовых цепей третьего поколения / М. Б. Соколов, С. А. Веселков, В. Б. Культин // Научно-техническая международная конференция «Неделя науки 2005»: сб. статей. – Санкт-Петербург : ПГУПС, 2005. – С. 163–165.

7. Гаврилов, А. В. Гибридные интеллектуальные системы / А. В. Гаврилов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2003. – 168 с.

8. Боглаев, Ю. П. Вычислительная математика и программирование / Ю. П. Боглаев. – Москва : Высшая школа, 1990. – 267 с.

9. Соколов М. Б. Применение метода процессного моделирования для анализа тональных рельсовых цепей / М. Б. Соколов, М. Н. Василенко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – Ростов, 2007. – № 4. – С. 31–37.

## Методика расчета растекания переменных составляющих тягового тока в рельсовых линиях

М. Е. Бакин

Московский государственный университет путей сообщения

Кафедра «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте»

**Аннотация.** Анализ токораспределения в рельсовых линиях является сложной задачей. Предложена схема замещения рельсовой линии с сосредоточенными параметрами. Представлена сравнительная оценка токораспределения при использовании схем замещения рельсовой линии с распределенными и сосредоточенными параметрами для различных частот растекаемого тягового тока и сопротивлений изоляции рельсовой линии.

**Ключевые слова:** *тяговый ток; рельсовая линия (РЛ); рельсовая цепь (РЦ); схема замещения рельсовой линии с сосредоточенными параметрами; схема замещения рельсовой линии с распределенными параметрами; токораспределение; математическая модель; сопротивление изоляции рельсовой линии.*

### 1 Введение

На современном этапе развития железнодорожной автоматики и телемеханики при анализе растекания тягового тока вдоль РЛ используют схему замещения, которая представляет собой математическую модель линии с распределенными параметрами [1]. В результате расчета дифференциальных уравнений, составленных по такой модели, получают уравнения токораспределения вдоль всей линии. С помощью этих выражений можно получить конкретные значения тока и напряжения в любой точке в зависимости от расстояния до тяговой подстанции.

При расчете растекания тягового тока в разветвленных станционных рельсовых цепях приходится рассматривать многопроводные рельсовые линии, связанные взаимной индуктивностью. Для этой задачи нет аналитического решения с применением схемы замещения рельсовой линии с распределенными параметрами. Задача может быть решена с применением схемы замещения с

сосредоточенными параметрами [1], при этом требуется определить количество элементарных участков в схеме замещения с сосредоточенными параметрами для выполнения заданной точности расчета.

### 2 Математическая модель рельсовой линии для анализа токораспределения

Выбор схемы замещения участков, а также их количества является результатом проведения многочисленных экспериментов по моделированию в программной среде.

Так, с помощью программного обеспечения Maple были созданы математические модели, которые позволяют рассчитать токи и напряжения вдоль РЛ как при использовании схемы с распределенными параметрами, так и при использовании модели с сосредоточенными параметрами с П-образными элементарными участками (рис. 1). Выбор программного обеспечения Maple обоснован тем, что данная среда позволяет использовать компьютерную алгебру с пошаговым решением математических задач и демонстрацией промежуточных результатов вычислений [2].

Программа дает возможность получить аналитические выражения тока в любой точке схемы замещения на основе расчета по методу контурных токов. На рис. 1 приведены следующие обозначения:

$Z_{\text{кп}}, Z_{\text{р}}$  – комплексные сопротивления контактного провода и двух рельсов, соединенных параллельно в один;

$Z_{\text{кр}}$  – взаимная магнитная связь контактного провода и рельсов;

$Z_{\text{и}}$  – сопротивление изоляции балласта;

$Z_{\text{в}}$  – входное комплексное сопротивление смежных участков;

$Z_3$  – комплексное сопротивление подвижного состава;

$I_{11}, I_{22}, \dots, I_{(N-1)}, I_N$  – контурные токи;

$I_1, I_2, \dots, I_{(M-1)}, I_M$  – токи в элементарных участках и токи утечки на землю;

$I_{тп}$  – ток, выдаваемый тяговой подстанцией;

$l$  – длина элементарного участка РЛ, км;

$L$  – общая длина моделируемой линии, км.

Количество элементарных участков может изменяться как в большую, так и в меньшую сторону. Решение осуществляется по алгоритму в соответствии с рис. 2.

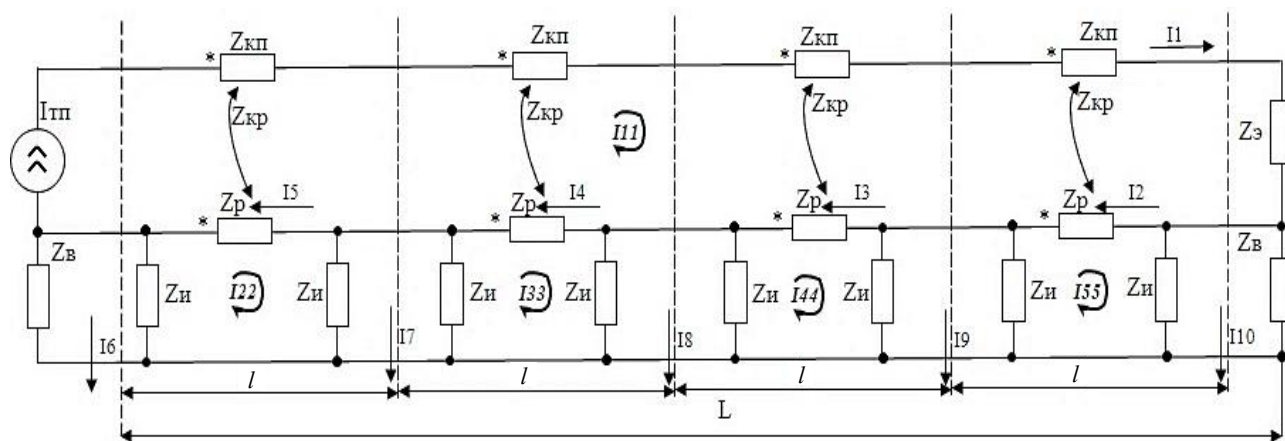


Рис. 1 Математическая модель РЛ с сосредоточенными параметрами

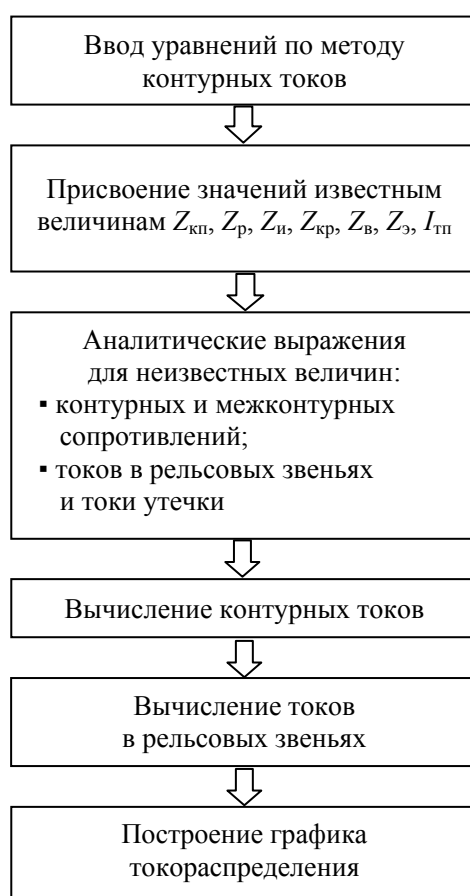


Рис. 2 Алгоритм расчета токораспределения с помощью математической модели



### 3 Анализ токораспределения для различных длин участков рельсовой линии и частот растекаемых токов

Для изучения характера распределения тока вдоль некоторого участка РЛ было произведено сравнение результатов, полученных при расчете математической модели с распределенными параметрами, с результатами предложенной схемы замещения с сосредоточенными параметрами (рис. 3) при различных значениях частоты растекаемого тока и сопротивления изоляции балласта.



Рис. 3 Относительная погрешность при длине рельсовой линии 27 км и сопротивлении изоляции 0,5 Ом·км

При рассмотрении этого вопроса в качестве схемы с сосредоточенными параметрами использовались схемы замещения, включающие в себя 90, 60, 30, 10 и 6 элементарных участков, которые были разработаны в программной среде Maple.

Анализ был проведен на примере РЛ длиной 27 км. Рис. 3–5 иллюстрируют полученные результаты расчета и показывают величину относительной погрешности токов в РЛ по отношению к идеализированной модели с распределенными параметрами в зависимости от длины элементарного участка  $L$  для различных частот токов растекания и сопротивлений изоляции РЛ. Погрешность была рассчитана по следующей формуле:

$$\alpha_n = \frac{|I_{\text{рп}} - I_{\text{сп}}|}{I_{\text{рп}}} \cdot 100 \% \quad (1)$$

где  $I_{\text{рп}}$  – значение тока, вычисленное по схеме с распределенными параметрами;

$I_{\text{сп}}$  – значение тока, вычисленное по схеме с сосредоточенными параметрами;

$n$  – показатель, характеризующий место вычисления погрешности ( $n = 1$  соответствует началу РЛ,  $n = 2$  – середине РЛ, а  $n = 3$  – концу РЛ).

Рис. 6–8 иллюстрируют характер распределения тока в рельсах на участке РЛ при различных сопротивлениях изоляции и частотах тока.

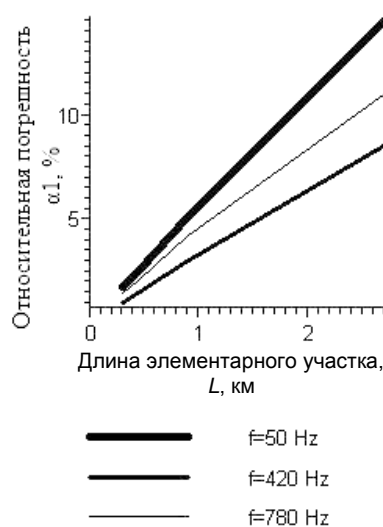


Рис. 4 Относительная погрешность при длине рельсовой линии 27 км и сопротивлении изоляции 5 Ом·км

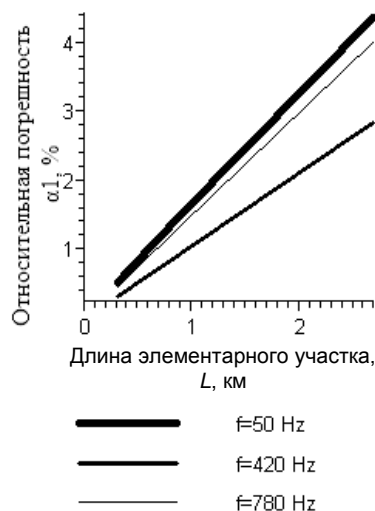


Рис. 5 Относительная погрешность при длине рельсовой линии 27 км и сопротивлении изоляции 50 Ом·км

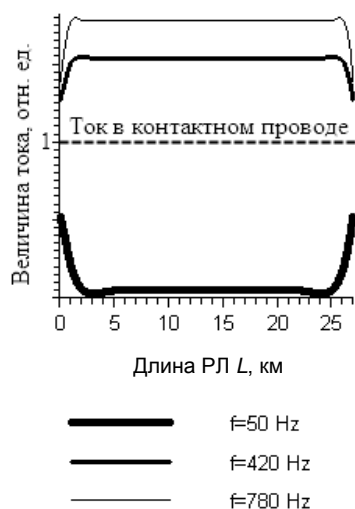


Рис. 6 Распределение тока различных частот в рельсах вдоль РЛ при сопротивлении изоляции 0,5 Ом·км

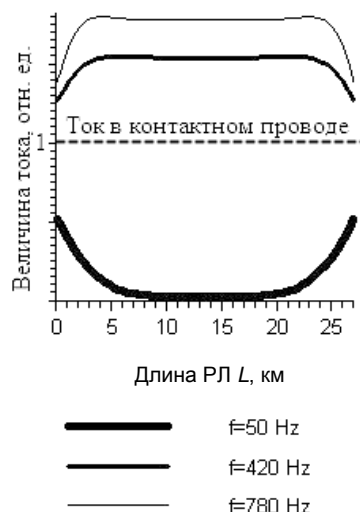


Рис. 7 Распределение тока различных частот в рельсах вдоль РЛ при сопротивлении изоляции 5 Ом·км

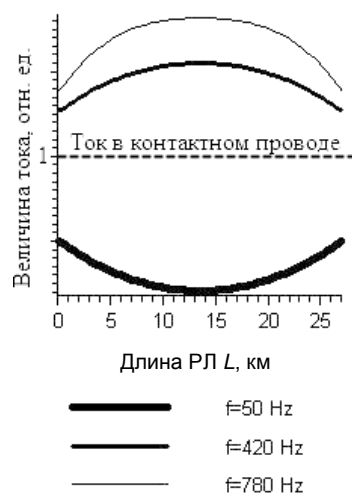


Рис. 8 Распределение тока различных частот в рельсах вдоль РЛ при сопротивлении изоляции 50 Ом·км

#### 4 Заключение

При сопротивлении изоляции РЛ 0,5 Ом·км для обеспечения уровня относительной погрешности 5 % в результате перехода от схемы с распределенными параметрами к схеме с сосредоточенными параметрами длина элементарного участка должна составить 400 м на частоте тока 50 Гц и 420 Гц. При этом на частоте тока 780 Гц и указанной выше длине элементарного участка эта погрешность уменьшится в 2 раза. При увеличении сопротивления изоляции от 0,5 до 50 Ом·км относительная погрешность элементарного участка длиной 400 м на частоте тока 50 Гц уменьшается до 0,5 %, а для частот 420 и 780 Гц – до 0,4 и 0,2 % соответственно. В ходе расчета было установлено, что максимальная длина РЛ при сопротивлении изоляции 0,5 Ом·км для замещения по схеме с сосредоточенными параметрами для промышленной частоты тока будет составлять 36 км при условии соблюдения погрешности 5 % относительно схемы с распределенными параметрами. При увеличении сопротивления изоляции до 50 Ом·км длину рассматриваемой РЛ можно увеличить.

Проведенный анализ показал, что для рассмотренных частот при увеличении сопротивления изоляции РЛ длину элементарного участка в схеме замещения с сосредоточенными параметрами можно увеличить, при этом погрешность расчетов не изменяется. Это объясняется тем, что при увеличении сопротивления изоляции РЛ увеличивается часть тока, проходящая по рельсам, и уменьшаются токи утечки.

На графиках видно, что наибольший уровень погрешностей имеет место на частоте тока 50 Гц независимо от того, при каком сопротивлении изоляции производился расчет. Это связано главным образом с тем, что на тональных частотах по сравнению с промышленной частотой изменяется характер токораспределения вдоль РЛ за счет увеличения индуктированного тока из контактного провода в рельсы.

Кривая токораспределения в рельсах имеет симметричный характер, при этом токи по краям РЛ равны между собой. Значение тока в середине РЛ для промышленной частоты минимально, а для тональных ча-

стот – максимально. Погрешность токов, рассчитанная в середине РЛ для всех частот тока и сопротивлений изоляции, очень мала.

Полученные выводы практически можно использовать при расчетах математической модели РЛ с сосредоточенными параметрами.

Данная методика является универсальной и позволяет оценить погрешность вычислений при различных параметрах модели.

#### Библиографический список

1. *Брылеев, А. М.* Теория, работа и устройство рельсовых цепей / А. М. Брылеев, Ю. А. Кравцов, А. В. Шишляков. – Москва : Транспорт, 1978. – 344 с.

2. *Дьяконов, В.П.* Maple 9.5/10 в математике, физике и образовании / В. П. Дьяконов. – Москва : СОЛОН-Пресс, 2006. – С. 3 – ISBN 5-98003-258-4.

## Построение модели электромагнитного нейтрального реле в симуляторе *Ngspice*

Д. В. Новиков

Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»

**Аннотация.** В статье рассматривается алгоритм получения аналитической зависимости индуктивности нейтрального электромагнитного реле как функции тока в статических состояниях реле. Описывается способ реализации модели нейтрального электромагнитного реле в симуляторе *Ngspice*.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование; модель реле; симулятор; *Ngspice*.

### 1 Введение

Современные компьютерные технологии позволяют эффективно использовать для целей изучения, разработки и проектирования реальных систем метод имитационного моделирования. Суть этого метода заключается в том, что изучаемая или проектируемая система заменяется ее имитатором (компьютерной имитационной моделью) с последующим проведением на нем экспериментов с целью получения информации о функционировании системы. Компьютерная имитационная модель соответствует реальной системе по элементной базе и свойствам с заранее принятыми упрощениями и допущениями [1]. Построить имитационную модель невозможно без хорошего знания и понимания физики работы элементов изучаемой системы, а также взаимосвязей и взаимозависимостей между ними.

Метод имитационного моделирования может быть эффективно использован для целей анализа систем железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ). В настоящее время ведутся работы по созданию системы моделирования принципиальных схем ЖАТ на базе симулятора электронных схем общего назначения с открытым исходным кодом *Ngspice*.

### 2 Критерий адекватности модели реле

Основным элементом как традиционных релейных, так и зарекомендовавших себя в настоящее время микропроцессорных систем ЖАТ является электромагнитное реле I класса надежности, на базе которого реализуется исполнительная часть систем ЖАТ. В этой связи построение адекватной имитационной модели системы ЖАТ невозможно без построения модели электромагнитного реле. Теоретический аспект проблемы моделирования элемента релейного действия был подробно рассмотрен в [2].

Главным критерием адекватности модели реле является соответствие временных параметров, характеризующих скорость включения и выключения реле. Величины значений промежутков времени притяжения  $t_{пр}$  и отпадания  $t_{отп}$  якоря реле определяются скоростью нарастания протекающего в обмотке реле тока, которая обусловлена значением индуктивности реле и паразитной межвитковой емкости обмотки реле конкретного типа.

Индуктивность реле – величина переменная, она изменяет свое значение в зависимости от величины протекающего по обмотке тока, величины воздушного зазора между якорем и сердечником и от режима насыщения магнитной цепи реле. При включенном состоянии реле индуктивность равна своему максимальному значению, при выключенном – минимальному [3].

Для определения индуктивности реле в любой момент времени можно воспользоваться следующим соотношением:

$$L = \frac{i}{r_{м.общ}}, \quad (1)$$

где  $i$  – ток, протекающий по обмотке реле;

$r_{м.общ}$  – общее магнитное сопротивление магнитной цепи магнитопровода реле.

### 3 Получение аналитической зависимости для индуктивности реле от протекающего по обмотке реле тока

Трудность построения модели обмотки реле с индуктивностью, изменяющей свое значение в соответствии с выражением (1), объясняется сложностью получения аналитической формулы для сопротивления магнитной цепи реле. Общее магнитное сопротивление магнитной цепи реле определяется суммарным значением магнитных сопротивлений ферромагнитных участков магнитопровода реле и магнитных сопротивлений рабочего и нерабочего воздушных зазоров [3, 4].

При нахождении реле в одном из своих статических состояний (включенном или выключенном) сопротивление воздушного зазора остается величиной постоянной. Ферромагнитные участки магнитопровода являются нелинейными средами с характерным для них гистерезисом, в связи с чем их магнитные сопротивления представляют собой переменные величины, значения которых определяются величиной и направлением магнитного поля, а также давлением, температурой и т. д. [5]. При этом величина магнитного поля определяется значением магнитодвижущей силы, создаваемой протекающим по обмотке с числом витков  $w$  током  $i$ .

Задача нахождения аналитической зависимости для индуктивности реле может быть сведена к обратной задаче расчета магнитных цепей, решение которой осложняется нелинейностью характеристик магнитных сопротивлений ферромагнитных участков магнитной цепи. Условно эта задача может быть отождествлена с задачей расчета электрической цепи с входящими в нее нелинейными активными сопротивлениями [6]. В качестве исходных данных для ее решения могут быть взяты кривые намагничивания ферромагнитных материалов, из которых изготовлена магнитная система реле, средняя длина  $l_k$  и площадь поперечного сечения  $S_i$  каждого ферромагнитного участка.

Рассмотрим алгоритм решения указанной задачи на примере нахождения аналитической зависимости для индуктивности обмотки реле в статических состояниях для нейтрального электромагнитного реле.

1. По заданным в виде упорядоченных пар точек зависимостям между магнитной индукцией и магнитной напряженностью ферромагнитных материалов (кривым намагничивания) магнитной системы реле  $f = \{(H_1, B_1), (H_2, B_2) \dots (H_n, B_n)\}$  методом пересчета необходимо для каждого ферромагнитного участка получить зависимость в виде упорядоченных пар точек вида  $f = \{(V_1, \Phi_1), (V_2, \Phi_2) \dots (V_n, \Phi_n)\}$ . При пересчете целесообразно принять допущение об использовании в расчетных формулах вместо скалярного произведения векторных величин скалярные произведения скалярных величин [6]. Это позволит воспользоваться следующими соотношениями для расчета магнитного потока и магнитного напряжения:

$$\Phi_i = B_i S_i. \quad (2)$$

$$V_k = H_k l_k. \quad (3)$$

2. Методом интерполяции для рассчитанных выше значений нужно найти аналитическую зависимость магнитного потока от магнитного напряжения  $\Phi = f(V)$  для каждого ферромагнитного участка.

3. Для рабочего воздушного зазора необходимо определить сопротивление, воспользовавшись следующим соотношением:

$$R_{в.з} = \frac{\delta}{S_{в.з} \mu_0}, \quad (4)$$

где  $\delta$  – длина трубки воздушного зазора между наконечником и якорем реле.

Значение сопротивления  $R_{в.з}$  дает возможность получить линейную функциональную зависимость  $\Phi = f(V)$  для рабочего воздушного зазора, которая будет иметь следующий вид:

$$\Phi_{в.з} = \frac{V_{в.з}}{R_{в.з}}. \quad (5)$$

4. С использованием заданных аналитических выражений для характеристик  $\Phi = f(V)$  каждого ферромагнитного участка магнитной цепи и воздушного зазора необходимо найти суммарную магнитную характеристику  $V_\Sigma = f(\Phi)$  путем сложения значений магнитных напряжений всех участков магнитной цепи при одинаковых значениях магнитного потока. Полученная характеристика да-

ет возможность по известной суммарной намагничивающей силе для магнитной цепи определить магнитный поток в магнитопроводе (рис. 1) и на основании закона Ома для магнитной цепи найти общее магнитное сопротивление:

$$r_{\text{м.общ}} = \frac{V_{\Sigma k}}{\Phi_i} = \frac{w i_k}{\Phi_i}, \quad (6)$$

где  $w$  – число витков обмотки для реле конкретного типа.

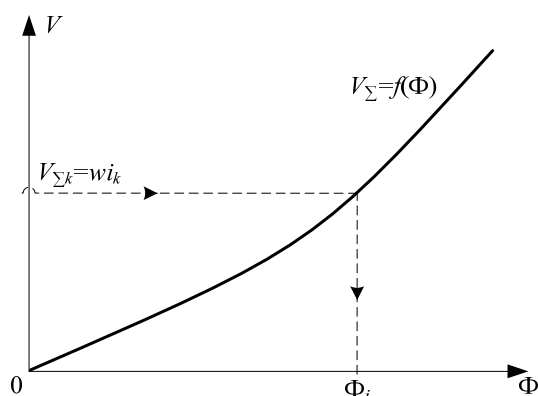


Рис. 1 Суммарная магнитная характеристика  $V_{\Sigma} = f(\Phi)$

5. Полученной зависимостью для магнитного сопротивления следует воспользоваться при определении индуктивности реле по формуле (1).

Процедуру вычислений по вышеописанному алгоритму необходимо повторить два раза для каждого статического состояния реле (включенного и выключенного), получив для каждого из состояний реле аналитические зависимости для индуктивности реле как функции от тока обмотки.

#### 4 Реализация электромагнитного нейтрального реле в симуляторе *Ngspice*

Для реализации модели электромагнитного реле в *Ngspice* необходимо принять следующие упрощения и допущения.

1. Состояние реле определяется граничными значениями силы тока, протекающего через обмотку (воспринимающую часть реле):  $I_{\text{сраб}}$  – ток срабатывания реле,  $I_{\text{отп}}$  – ток отпускания.

2. Схема замещения воспринимающей части реле в симуляторе представляет собой последовательное соединение активного сопротивления и индуктивности. Величина сопротивления определяется активным сопротивлением обмотки реле, величина индуктивности – полученными при расчетах реле аналитическими зависимостями, выбор которых осуществляется исходя из состояния реле (включено или выключено).

3. Поскольку время перелета якоря пренебрежимо мало по сравнению со временем нахождения реле в одном из своих статических состояний, целесообразно в модели реле учитывать величину воздушного зазора только в статическом состоянии реле.

Структуру модели реле в *Ngspice* при реализации удобно разбить на три части: аналоговую воспринимающую, дискретную и исполнительную (рис. 2). Аналоговая часть представляет собой схему замещения обмотки реле. Особенностью реализации обмотки реле в симуляторе *Ngspice* является возможность задать в качестве значения индуктивности обмотки ее функциональную зависимость от тока, а также от состояния самого реле (включено или выключено).

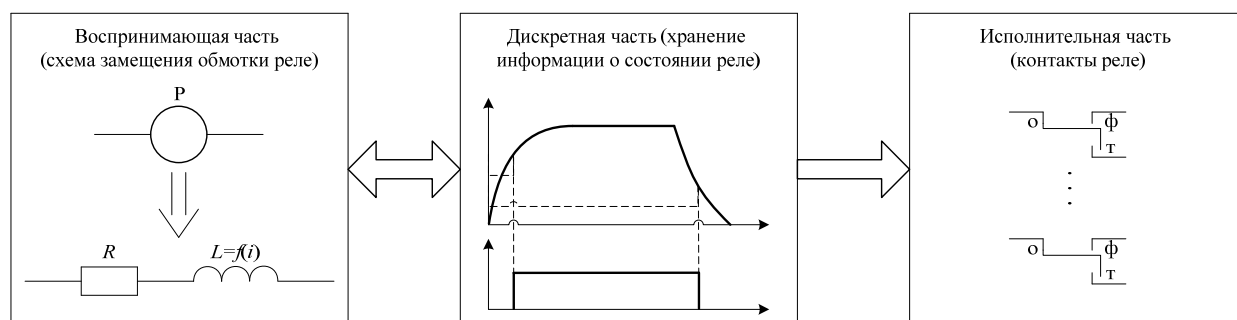


Рис. 2 Структура модели нейтрального реле в *Ngspice*

Дискретная часть хранит цифровую переменную состояния реле, значение которой определяется посредством анализа величины тока, протекающего по обмотке реле. Указанное цифровое значение используется для переключения состояний контактов исполнительной части, а также выбора аналитической зависимости для индуктивности реле в воспринимающей части.

## 5 Заключение

Построение модели с использованием вышеописанной зависимости дает возможность получить адекватную модель реле, соответствующую реальному реле по значениям временных параметров при срабатывании и отпускании. Временные параметры при такой реализации позволяют учитывать применяемые в схемах ЖАТ электрические способы изменения временных параметров реле, то есть такие, которые основаны на использовании схем замедления (ускорения) срабатывания и выключения реле.

## Библиографический список

1. *Киндлер, Е.* Языки моделирования / Е. Киндлер. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – 288 с.
2. *Максименко, О. А.* Методы и алгоритмы автоматизации моделирования и проверки проектов станционных систем железнодорожной автоматики и телемеханики: дис. ... канд. техн. наук / О. А. Максименко. – Санкт-Петербург : ПГУПС. – 2004. – 249 с.
3. *Переборов, А. С.* Теоретические основы железнодорожной автоматики и телемеханики : учебник для вузов / А. С. Переборов. – Москва : Транспорт, 1984. – 384 с.
4. *Витенберг, М. И.* Расчет электромагнитных реле / М. И. Витенберг. – Ленинград : Энергия. Ленингр. отд-ние, 1975. – 413 с.
5. *Вонсовский, С. В.* Магнетизм / С. В. Вонсовский. – Москва : Наука, 1971. – 1032 с.
6. *Бычков, Ю. А.* Основы теоретической электротехники : учеб. пособие. 2-е изд., стер. / Ю. А. Бычков и др. – Санкт-Петербург : Лань, 2008. – 592 с.

# Электронный документооборот технической документации

УДК 004.942+656.25

## Метод оценки времени на выполнение процессов электронного документооборота технической документации

П. Е. Булавский, Д. С. Марков

Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»

**Аннотация.** Приведено описание формализованной схемы (ФС) электронного документооборота технической документации (ЭДТД) на устройства СЦБ. На основе формализованной схемы предложен метод оценки временных параметров ЭДТД с использованием динамических вероятностных нагруженных графов (ДВНГ).

**Ключевые слова:** электронный документооборот технической документации; комплект технических документов; обобщенная формализованная схема; динамические вероятностные нагруженные графы; имитационное моделирование.

### 1 Введение

Оценка параметров электронного документооборота технической документации по системам железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ) требует синтеза имитационных моделей и определяется: территориальной распределенностью средств ЭДТД, временной продолжительностью реализации проектов СЖАТ, большим числом пользователей, решающих разнородные задачи [1].

Разработку программных средств для электронного документооборота технической документации и синтеза имитационной модели, позволяющей оценивать его эффективность, в [1] предложено осуществлять на основе концептуальной модели. С целью синтеза концептуальной модели ЭДТД исследованы реальные процессы формирования, проверки и использования технической документации в системах автоматики и телемеханики для выявления сценариев документооборота и протоколов свойств технических документов. Методология описания ЭДТД предполагает его разделение на три составляющие: участники, состояние докумен-

тов с допустимыми областями значений и процессы.

Для синтеза системы мониторинга, управления качеством работ и его контроля в службе автоматики и телемеханики на основе ЭДТД выделены технологические цепочки, соответствующие стадиям выполнения работ – от их начала до завершения процессов строительства систем и их ввода в эксплуатацию. При этом уровень формализации этапов технологического цикла должен быть достаточен для мониторинга и контроля качества их выполнения.

Уровни иерархии рассматриваемых процессов ЭДТД соответствуют уровням выполнения и детализации технологических цепочек. Алгоритмические уровни представления отражают степень детализации элементарных операций для рассматриваемых элементов технологических цепочек на данном иерархическом уровне. Элементарные операции могут в свою очередь представляться алгоритмами на следующем (низшем) алгоритмическом уровне.

### 2 Формализованная схема электронного документооборота технической документации

Разработка автоматизированной технологии ЭДТД предполагает применение формализованных методов представления документооборота технической документации. С этой целью разработана обобщенная формализованная схема (ОФС) описания объектов, участвующих в процессе ЭДТД для систем железнодорожной автоматики и телемеханики [2].



ОФС строится на основе структурной схемы модели электронного документооборота технической документации при проектировании, строительстве и производстве пусконаладочных работ по системам автоматики и телемеханики.

Детализация основных процессов по составляющим их подпроцессам и источникам получения информации приведена в табл. 1.

В соответствии с приведенной выше характеристикой ЭДТД как объекта моделирования к имитационной модели ЭДТД предъявляются следующие требования:

- ЭДТД представляется как сложная система массового обслуживания (ССМО);
- имитационная модель должна строиться на основе матричного представления алгоритмов ЭДТД;
- при построении модели должна учитываться иерархическая структура матриц ЭДТД;

▪ для обеспечения независимости моделирующего алгоритма имитационной модели от конкретных процессов ЭДТД, подверженных изменению, моделирующий алгоритм должен быть универсальным и представлять собой алгоритм обработки соответствующих матриц.

В [3] предложена имитационная модель ССМО, разработанная в среде GPSS WORLD и отвечающая изложенным требованиям.

В имитационной модели ЭДТД как ССМО заявками являются комплекты технических документов, поступающие к участникам ЭДТД для выполнения технологических процессов, при этом участники ЭДТД рассматриваются как обслуживающие устройства, а технологические процессы описываются в виде алгоритмов реализации технологических цепочек (см. табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Основные процессы ЭДТД

Процессы электронного документооборота ТД	Источник информации
1	2
1 Разработка технических заданий (ТЗ) и технических условий (ТУ) на проектируемые объекты	
1.1 Включение объекта в план проведения работ по строительству и модернизации	Генеральный заказчик
1.2 Разработка, согласование и утверждение задания на проектирование	Служба III, причастные службы
1.3 Разработка, согласование и утверждение технических условий	Служба III, причастные службы
2 Разработка, согласование и утверждение утверждаемой части проектно-сметной документации	
2.1 Проектирование утверждаемой части проектно-сметной документации	Проектная организация
2.2 Согласование и утверждение утверждаемой части проектно-сметной документации	Служба III, причастные службы
3 Проектирование, отправка и экспертиза проектно-сметной документации	
3.1 Проектирование технической документации по принципиальным и монтажным схемам, спецификациям оборудования, изделий и материалов, объектным сметам на строительство	Проектная организация
3.2 Передача заказчику (отправка) технической документации по принципиальным и монтажным схемам, спецификациям оборудования, изделий и материалов, объектным сметам на строительство	Проектная организация
3.3 Экспертиза технической документации по принципиальным и монтажным схемам, спецификациям оборудования, изделий и материалов, объектным сметам на строительство	Служба III
3.4 Передача на завод-изготовитель проектной документации по принципиальным и монтажным схемам	Проектная организация, Завод-изготовитель
4 Изготовление, строительство и проведение пусконаладочных работ по системам автоматики и телемеханики	

Окончание табл. 1

1	2
4.1 Изготовление приборов и оборудования	Завод-изготовитель
4.2 Строительство системы	Подрядчик
4.3 Распределение полученных с заводов-изготовителей приборов по объектам капитального строительства и ШЧ	Служба Ш
4.4 Установка приборов и оборудования в конструктивы в ШЧ	ШЧ РТУ
4.5 Проведение пусконаладочных работ	Служба Ш
4.6 Проведение рабочей комиссии, рассматривающей готовность системы к вводу в эксплуатацию	Служба Ш, причастные службы
4.7 Проведение приемочной комиссии по вводу системы в эксплуатацию	Генеральный заказчик, Служба Ш, причастные службы
4.8 Исправление технической документации по итогам проведения пусконаладочных работ	Проектная организация

### 3 Метод оценки временных параметров на основе динамического вероятностного нагруженного графа

Существенные сложности при формализации описываемых процессов ЭДТД вызывает необходимость учета вероятностного характера как условных переходов, так и времени выполнения технологических операций и переходов, входящих в технологические цепочки [3]. Для формализации вероятностного характера процессов ЭДТД целесообразно использовать динамические вероятностные нагруженные графы (ДВНГ). В [4] дано определение и описание их свойств.

Динамическим вероятностным нагруженным графом [4] называется ориентированный граф

$$G = (X_G, P_G), (|X_G| = n, |P_G| = m),$$

у которого в любой момент времени  $t \in T$  для любых вершин  $x_i, x_j$  из  $X_G$   $l$ -я дуга  $U_{ij}^{(l)} \in P_G$  существует с вероятностью  $P_{ij}^{(l)}(t)$ . Если в данный момент времени  $t$  дуга  $U_{ij}^{(l)}$  существует, то она характеризуется априори известной величиной  $C_t(U_{ij}^{(l)})$  – нагрузкой дуги в момент времени  $t$ .

Введем определение. Динамическим вероятностным технологическим процессом (ДВТП) будем называть динамический вероятностный нагруженный граф технологической цепочки, соответствующей описанию процесса обработки комплекта технических

документов, логически взаимосвязанной, с функционально полной последовательностью операций.

Матрицей смежности ДВТП  $A(G)_{[4 \times 4]} = \|a_{ij}\|$  называется квадратная матрица размерностью  $[n \times n]$ ,  $n = |X_G|$ , каждый элемент  $a_{ij}$ , которой равен количеству возможных дуг (петель при  $i = j$ ) из вершины  $x_i \in X_G$  в вершину  $x_j \in X_G$ .

Матрицей вероятностей ДВТП  $G = (X_G, P_G)$  называется матрица  $P_G(t) = \|\overline{P_{ij}(t)}\|$  размерностью  $[n \times n]$ ,  $n = |X_G|$ , каждый элемент  $\overline{P_{ij}(t)} = (P_{ij}^{(1)}(t), P_{ij}^{(2)}(t), \dots, P_{ij}^{(k_{ij})}(t))$  которой есть вектор вероятностей существования соответствующей дуги из вершины  $x_i \in X_G$  в вершину  $x_j \in X_G$  в момент времени  $t$ .

Будем говорить, что упорядоченная последовательность дуг  $(U_{i_1 i_2}^{(l_1)}, U_{i_2 i_3}^{(l_2)}, \dots, U_{i_k i_{k+1}}^{(l_k)})$  образует возможный путь  $\mu_{(i_1, i_2, \dots, i_{k+1})}^{(l_1, l_2, \dots, l_k)}$  из вершины  $X_{i_1} \in X_G$  в вершину  $X_{i_{k+1}} \in X_G$ , если существует упорядоченная по возрастанию последовательность согласованных временных срезов  $(t_{i_1}, t_{i_2}, \dots, t_{i_k})$  такая, что соответствующая ей упорядоченная последовательность вероятностей  $(P_{i_1 i_2}^{(l_1)}(t_{i_1}), P_{i_2 i_3}^{(l_2)}(t_{i_2}), \dots, P_{i_k i_{k+1}}^{(l_k)}(t_{i_k}))$  не содержит нулевых элементов.

В [4] дано определение надежности и риска пути для транспортных сетей. Сформулируем указанные определения для ЭДТД с учетом качества технической документации.

Надежностью пути  $\mu_{(i_1, i_2, \dots, i_k)}^{(l_1, l_2, \dots, l_k)}$ , соответствующей времени начала ЭДТД  $t_{i_1}$ , будем называть величину  $\Xi = P_{i_1 i_2}^{(l_1)}(t_{i_1}) \cdot P_{i_2 i_3}^{(l_2)}(t_{i_2}) \cdot \dots \cdot P_{i_k i_{k+1}}^{(l_k)}(t_{i_k})$ .

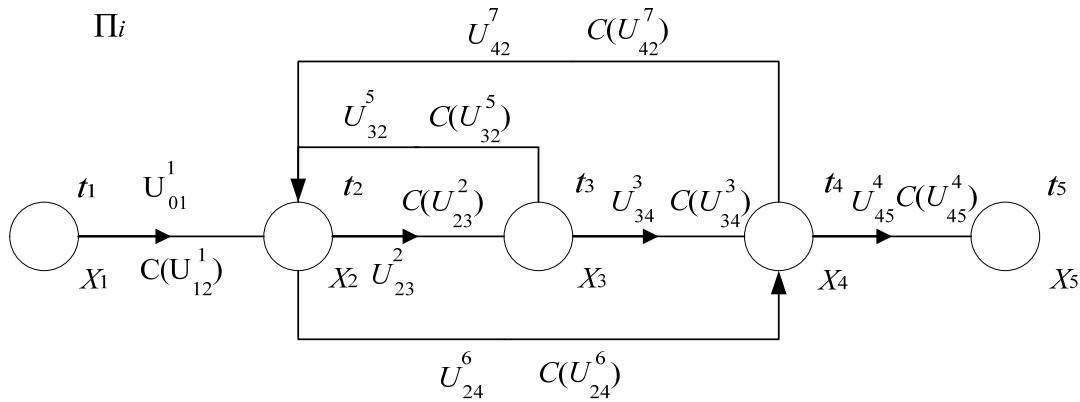
Риском пути  $\mu_{(i_1, i_2, \dots, i_k)}^{(l_1, l_2, \dots, l_k)}$ , соответствующим времени начала ЭДТД  $t_{i_1}$ , будем называть величину  $\Psi = (1 - P_{i_1 i_2}^{(l_1)}(t_{i_1}) \cdot P_{i_2 i_3}^{(l_2)}(t_{i_2}) \cdot \dots \cdot P_{i_k i_{k+1}}^{(l_k)}(t_{i_k}))$ . Надежность и риск каждого возможного пу-

ти являются функциями времени начала ЭДТД  $t_{i_1}$ .

В [5] изложены принципы оценки качества технических документов.

Сформулируем задачу моделирования как оценку времени выполнения процессов (см. табл. 1) в зависимости от качества технической документации и времени начала процессов ЭДТД.

Рассмотрим процесс  $\Pi_i$  ЭДТД, показанный на рисунке.



Пример процесса  $\Pi_i$  ЭДТД

Введем следующие обозначения:

$X_1$  – проектирование технической документации;

$X_2$  – проверка и исправление проектной организацией ошибок в технической документации;

$X_3$  – экспертиза технической документации;

$X_4$  – передача технической документации на завод-изготовитель;

$X_5$  – изготовление и строительство СЖАТ.

Таким образом, на рисунке:

$X_1 \dots X_5$  – операции процесса  $\Pi_i$ ;

$\tau_1 \dots \tau_5$  – время выполнения операции  $X_i$  процесса  $\Pi_i$ ;

$U_{ij}^k$  – дуга из вершины  $X_i$  в  $X_j$ ;

$C_{(U_{ij}^k)}$  – нагрузка дуги из вершины  $X_i$  в

$X_j$ ;

$P_{ij(K_{ТД})}$  – вероятность условного перехода в зависимости от качества технической документации, участвующей в операции  $X_i$  процесса  $\Pi_i$ .

Матрица смежности для указанного графа будет иметь вид:

$$A(G)_{[5 \times 5]} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Матрица вероятностей будет иметь вид: где

$$P_G(K_{\text{ТД}})_{[5 \times 5]} = \begin{pmatrix} 0 & P_{12}(K_{\text{ТД}}) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{23}(K_{\text{ТД}}) & P_{24}(K_{\text{ТД}}) & 0 \\ 0 & P_{32}(K_{\text{ТД}}) & 0 & P_{34}(K_{\text{ТД}}) & 0 \\ 0 & P_{42}(K_{\text{ТД}}) & 0 & 0 & P_{45}(K_{\text{ТД}}) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Для построения матричной имитационной модели введем три типа операций и вероятностные логические условия:

- операции, порождающие качество технической документации с заданной вероятностью  $X_1$ ;
- операции, длительность которых зависит от качества технической документации,  $X_2, X_3, X_4$ ;
- операции, повышающие качество технической документации,  $X_2, X_3$ ;
- логические условия, вероятность перехода в которых зависит от качества технической документации,  $P_{ij}(K_{\text{ТД}})$ .

Каждая операция процесса ЭДТД может быть представлена матрицей в модели на следующем уровне детализации [3].

Учитывая, что  $\tau_i = f(K_i)$  для  $i = 2 \dots 4$ ,  $n = f(K_i)$ ,  $m = f(K_i)$ , обозначим:

$\tau_i$  – время выполнения элементарной операции  $X_i$  процесса  $\Pi_i$ ;

$P_{(K_{\text{ТД}})}$  – вероятность условного перехода как функция от качества технической документации;

$\tau_{i(K_{\text{ТД}})}$  – время выполнения элементарной операции как функция от качества технической документации;

Определим время выполнения процесса  $\Pi_i$ :

$$\begin{aligned} T_{\Pi_i} = & \tau_1 + C(U_{12}^1) + \\ & + n_{P(K_{\text{ТД}})} \left( m_{P(K_{\text{ТД}})} \left( \tau_{2(K_{\text{ТД}})} + \right. \right. \\ & + C(U_{23}^2) + \tau_{3(K_{\text{ТД}})} + C(U_{32}^5) \Big) + \\ & + \tau_{4(K_{\text{ТД}})} + C(U_{34}^3) + C(U_{42}^7) \Big) + \\ & + C(U_{45}^4) + \tau_5, \end{aligned}$$

$$\tau_i = f(P_{(X_i)})P_{(K_{\text{ТД}})};$$

$$C_{(U_{ij}^n)} = f(t)P_{(K_{\text{ТД}})}.$$

Здесь  $P_{(X_i)}$  – вероятность порождения уровня качества технической документации при выполнении операции  $X_i$ .

Общая продолжительность процесса ЭДТД включает совокупность элементарных для данного уровня представления операций, выполняемых на разных стадиях ЭДТД, и нагрузок дуг в соответствии со структурной схемой взаимодействия процессов и вероятностью выполнения условных переходов в данный момент времени.

Предложенная формула позволяет более точно определять продолжительность процессов при реализации элементарных операций и переходов на данном иерархическом уровне представления при проведении натурных обследований на стадии подготовки исходных данных для матричной модели ССМО для верификации моделей процессов ЭДТД, предварительной оценки времени моделирования и калибровки реального времени модели [3].

При реализации процессов ЭДТД вероятность возврата технической документации после экспертизы меньше, если качество технической документации выше. Оценивая качество технической документации по результатам проектирования и экспертизы, можно моделировать реальные процессы ЭДТД, исследуя зависимость их продолжительности от качества технической документации.

#### 4 Заключение

Разработанное представление ЭДТД с помощью ДВНГ дает возможность оценить влияние вероятностных факторов на временные параметры ЭДТД. Предложенная формула позволяет получить оценку времени ЭДТД, которая может быть использована для калибровки имитационной модели и программирования сторожевых таймеров.

Предложенная матричная модель процессов электронного документооборота технической документации позволяет:

- оценивать время, затраченное на выполнение процессов электронного документооборота в зависимости от достигнутого качества технической документации;
- оценивать влияние отдельных операций электронного документооборота на качество технической документации;
- оценивать влияние изменений структуры системы электронного документооборота предприятия на время выполнения процессов;
- оценивать влияние введения дополнительных операций на качество технической документации.
- прогнозировать необходимые ресурсы для проектирования, изготовления и строительства СЖАТ в соответствии с перспективными планами развития отрасли;
- обеспечивать сопровождение ЭДТД при внедрении новых технологий на всех этапах жизненного цикла СЖАТ;
- обеспечивать сопровождение ЭДТД при внедрении новых технологий технического обслуживания СЖАТ.

## Библиографический список

1. Булавский, П. Е. Концептуальная модель электронного документооборота технической документации / П. Е. Булавский // Транспорт Российской Федерации. – 2011. – № 1. – С. 60–63.
2. Булавский, П. Е. Синтез формализованной схемы электронного документооборота систем железнодорожной автоматики и телемеханики / П. Е. Булавский, Д. С. Марков // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2013. – № 2. – С. 108–115.
3. Булавский, П. Е. Матричный метод формализации имитационных моделей сложных систем массового обслуживания / П. Е. Булавский, Д. С. Марков // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2010. – № 4. – С. 186–195.
4. Орлов, Г. С. Динамические вероятностные нагруженные графы. Определения, свойства, области применения / Г. С. Орлов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2010. – № 1 (Вып. 31). – С. 48–57.
5. Булавский, П. Е. Оценка качества технической документации на системы ЖАТ / П. Е. Булавский // Автоматика, связь, информатика. – 2011. – № 8. – С. 37–39.

## Современные подходы к переводу технической документации с бумажных носителей в электронный вид

А. А. Матушев, Ф. Н. Лобанов

Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»

**Аннотация.** Рассмотрена проблема хранения и использования старой бумажной документации. Проанализированы возможные методы перевода технической документации в электронный вид. Дано описание разрабатываемого модуля АРМ-РМД на основе применения искусственной нейронной сети.

**Ключевые слова:** *техническая документация; искусственные нейронные сети; АРМ-РМД.*

### 1 Введение

На данный момент во всех дистанциях сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) всех железных дорог внедрены автоматизированные рабочие места для ведения технической документации (АРМ-ВТД). С их помощью организован электронный документооборот технической документации. Техническая документация в электронном виде имеет ряд преимуществ по сравнению с документацией, представленной на бумажных носителях:

- быстрый поиск нужного документа;
- экспертиза принципиальных схем;
- обеспечение целостности документации (электронный документ не подвержен сожжению, намоканию и прочим воздействиям);
- отсутствие потери качества.

В связи с преимуществами ведения технической документации с использованием ПК вся новая документация выполняется в электронном виде. Однако на железных дорогах, помимо новой, имеются и большие объемы старой технической документации на бумажных носителях. При модернизации систем или установке новых приходится использовать существующую бумажную документацию, в том числе и плохого качества, что осложняет работу как проектных организаций, так и эксплуатирующих подразделений, поэтому в НТЦ-САПР ПГУПС осуществляется перевод бумажной документации в электронный вид. Этот процесс происходит медленно, так как объемы техниче-

ской документации велики. На примере Балтийской дистанции СЦБ (ШЧ-14) видно, что количество документации, переведенной в электронный вид, мало (рис. 1).



Рис. 1 Объем монтажных схем в ШЧ-14

В настоящее время перевод документации осуществляется вручную и имеет ряд недостатков, таких как:

- 1) низкая скорость перевода (на перевод одного листа формата А4 технической документации в среднем уходит один час работы);
- 2) человеческий фактор (при переводе документации человек может допускать ошибки);
- 3) высокая стоимость.

В связи с перечисленными недостатками и колоссальными объемами подлежащей переводу документации возникает потребность в привлечении принципиально иных, более эффективных методов перевода технической документации в электронный вид. Один из таких методов заключается в применении теории распознавания образов.

На данный момент не существует системы распознавания, которая смогла бы хоть сколько-нибудь эффективно распознать железнодорожную техническую документацию. Программа Fine Reader фирмы ABBYY распознает в среднем 5 % документа. Для успешного решения задачи необходимо, чтобы система распознавания удовлетворяла таким требованиям как:

- инвариантность относительно классифицируемых образов.

Данное требование необходимо для реализации возможности распознавания всех типов технической документации.

- минимальность предобработки образов.

Часто техническая документация является ветхой. По этой причине необходимо, чтобы обработка документации осуществлялась при минимальном постороннем на нее влиянии;

- инвариантность относительно «небольших» сдвигов, поворотов, масштабирования образов.

Некоторые графические элементы на документах представляют собой несвязные графические компоненты. Большая часть методов распознавания на этапе предобработки данных требует центрирования образов, что в рассматриваемом случае представляется затруднительным.

## 2 Существующие методы распознавания образов

Чтобы любой способ распознавания работал, необходимо передать ему базу элементов, которые он должен распознавать. Данную базу мы будем называть *обучающей выборкой*.

Основными методами к распознаванию образов в настоящее время являются следующие.

1. *Метод сравнения с шаблоном* [1], когда распознаваемый объект сравнивается с эталонными вариантами под разными углами и с разным масштабом. Достоинством данного метода является возможность распознавать с высокой точностью известные печатные символы. Недостатком метода является увеличение обучающей выборки при наличии рукописных символов. Это приводит к существенной потере скорости в работе. Кроме того, необходимо учитывать повороты и смещения распознаваемого образа.

2. *Метод опорных векторов* [2]. Основная идея этого метода для решения задачи распознавания образов состоит в том, что, подвергая образ кодированию с помощью некоторого алгоритма, получают набор  $n$  чисел. Этот набор интерпретируют как точку некоторого пространства размерности  $n$ , при этом вся обучающая выборка рассматривает-

ся как набор точек, которые по признаку принадлежности к классам ассоциированы со своими классами. Далее с помощью методов квадратичного программирования находят такую  $n + 1$ -мерную гиперплоскость или поверхность, которая разделяет заданные классы. Данный метод стабильно работает только с небольшим количеством классов. При увеличении количества классов сильно падает скорость работы. Необходимо подбирать такой способ кодирования, чтобы была возможность построения разделяющей гиперплоскости.

3. *Метод, использующий искусственные нейронные сети*. Рассмотрим вопрос о применении нейронных сетей для решения задачи распознавания образов.

Пусть  $W$  – вектор пространства  $R^n$ ,  $f$  – фиксированная нелинейная функция. Под нейроном [3] понимается функционал  $F: R^n \rightarrow I \subseteq R$ , определяемый соотношением  $F(X) = f(\langle X, W \rangle)$ . Модель нейрона представлена на рис. 2.

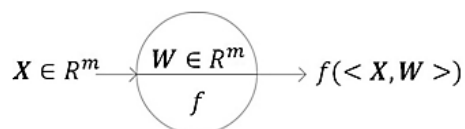


Рис. 2 Схематическое представление нейрона

Вектор  $W$  называют вектором весовых коэффициентов нейрона; функцию  $f$  – активационной, или передаточной; вектор  $X$  – входом нейрона; значение  $f(\langle X, W \rangle)$  является выходом нейрона. Связывая между собой нейроны таким образом, что выходы одних нейронов являются входами других, получаем новый объект – нейронную сеть [3].

С математической точки зрения нейронная сеть является отображением  $F: R^m \rightarrow R^n$ . Представленная на рис. 3 нейронная сеть является персептроном, в котором каждый нейрон текущего слоя связан со всеми нейронами следующего слоя. Решение задачи распознавания образов с помощью персептрона (см. рис. 3) формулируется следующим образом.

Пусть дана обучающая выборка  $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_k, Y_k)$  Здесь  $X_i \in R^m$

представляет собой закодированный некоторым способом образ;  $Y_i \in R^n$  определяет принадлежность образа  $X_i$  к одному из  $n$  классов. Компонента с номером  $i$  вектора  $Y_i$  равна единице, остальные – нулю. Требуется построить такую нейронную сеть  $F: R^m \rightarrow R^n$ , чтобы для всей обучающей выборки  $F(X_i) = Y_i$ .

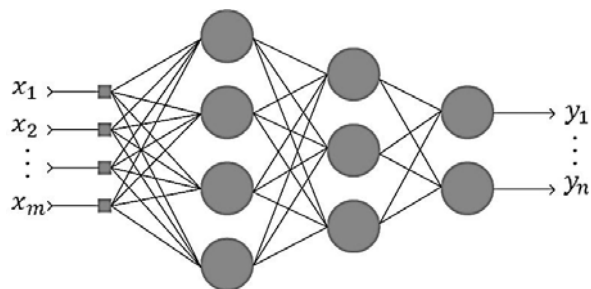


Рис. 3 Графическое изображение нейронной сети

Решение любой задачи нейросетевым способом состоит из трех основных этапов: выбора конфигурации сети, обучения сети (настройки сети), получения результатов [4]. Выбор конфигурации сети определяет нейроны и связи между ними. Обучение сети заключается в настройке векторов весовых коэффициентов нейронов сети на основе имеющихся исходных данных. Исходные данные называются обучающей выборкой. Как правило, для настройки сети выбирается некоторый функционал  $E(W)$ , и происходит его минимизация по весам сети. Однако персептрон имеет ряд недостатков, таких как:

- неинвариантность относительно сдвигов и поворотов;

- существенное время, затрачиваемое на обучение;

- зависимость результатов распознавания от способа кодирования.

Существуют специальные архитектуры нейронных сетей, направленные на решение задачи распознавания образов. Одной из наиболее эффективных архитектур является архитектура сверточной нейронной сети (рис. 4) [5].

Представленная на рис. 4 сеть состоит из слоев, которые включают несколько карт нейронов и делятся на слои свертки и слои подвыборки. Слои свертки необходимы для извлечения локальных признаков изображения, таких как углы, завороты, переходы и т. п. Задача слоев подвыборки состоит в усреднении информации слоев свертки предыдущего слоя. В рамках одной карты поддерживается технология «общих весов». Согласно этой технологии, наборы весов синапсов, входящих в нейроны одной карты, являются идентичными.

Достоинство сверточной нейронной сети состоит в том, что здесь не требуется предобработка образов; возможна инвариантность к небольшим сдвигам, поворотам и растяжениям образов; скорость классификации не зависит от размера обучающей выборки.

Для распознавания документов железнодорожной автоматики наиболее эффективными, благодаря своей универсальности, являются сверточные нейронные сети, так как они соответствуют поставленным требованиям.

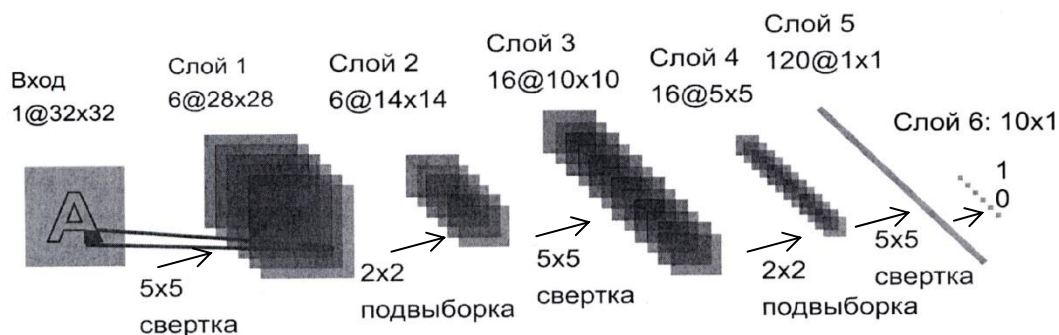


Рис. 4 Структурная схема сверточной нейронной сети Lenet-5, предложенной Яном Лекуном



### 3 Модуль АРМ-РМД

В настоящее время разрабатывается универсальный программный модуль по распознаванию монтажной технической документации АРМ-РМД на основе сверточной нейронной сети. Он позволит распознавать рукописные монтажные карточки с высокой точностью. Модуль состоит из программы выделения ячеек таблицы монтажной карточки, непосредственно нейронной сети и программы перевода полученных результатов в отраслевой формат. Однако распознавание не всегда дает точный результат, особенно на очень старых, грязных, рваных документах или на документах со множеством исправлений.

В таких документах порой даже человек не может точно определить, что написано. В данном случае целесообразно применять логический анализатор. В случае неоднозначного распознавания он будет проверять распознанные данные и корректировать их, если они не удовлетворяют определенным параметрам и правилам. Например, если в результате распознавания на выходе нейронной сети получено два варианта текста:

«НМЩ» и «НМШ» то, скорее всего, имелось в виду реле марки «НМШ». Следовательно, в итоговом документе надо использовать текст «НМШ». Применение анализатора повышает процент распознавания документов плохого качества.

Сейчас также ведутся работы по расширению возможностей АРМ-РМД, в частности для решения задачи распознавания принципиальных схем.

Процесс распознавания с помощью данного модуля, состоит из 4-х этапов (рис. 5):

1. Сканирования.
2. Распознавания.
3. Предварительной обработки (устранение шумов, центрирование таблицы, перевод изображения в градации серого):
  - сегментация таблицы на ячейки;
  - применение нейронной сети для распознавания информации в ячейках;
  - применение логического анализатора для анализа полученной информации и исправления ошибки;
  - вывод информации (перевод полученных данных в отраслевой формат).
4. Печати.



Рис. 5 Процесс распознавания схем с помощью модуля АРМ-РМД

### 4 Заключение

Применение АРМ-РМД существенно ускорит перевод бумажной документации в электронный вид. В качестве примера на Октябрьской железной дороге в ШЧ-14 за последний год было переведено в электронный вид 5145 листов формата А4. Разрабатываемый

модуль будет тратить в среднем 5 с для перевода одного листа и около одной минуты для того, чтобы человек исправил ошибки. Следовательно, при восьмичасовом рабочем дне, данный модуль справится с таким же объемом листов А4 всего за две недели. Таким образом, модуль существенно увели-

чит производительность труда отделов технической документации на железных дорогах и ускорит переход на электронную безбумажную технологию ведения технической документации.

### Библиографический список

1. Бурсиан, Е. Ю. Алгоритмы распознавания чертежных рукописных символов / Е. Ю. Бурсиан // Приборостроение. Известия вузов. – 2008. – № 7. – С. 8.

2. Platt, J. C. Fast training support vector machines using sequential minimal optimization /

J. Platt // *Advances in Kernel Methods* / Ed. by B. Scholkopf, C. C. Burges, A. J. Smola. – MIT Press, 1999. – Pp. 185–208.

3. Каллан, Р. Основные концепции нейронных сетей / Р. Каллан – Москва : Вильямс, 2001. – 288 с.

4. Круглов, В. В. Искусственные нейронные сети / В. В. Круглов, В. В. Борисов. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2001. – 382 с.

5. Yann, LeCun, Leon, Bottou, Yoshua, Bengio, Patrick, Haffner Gradient-Based Learning Applied to Document Recognition // *Proc. IEEE*. 1998. – Pp. 6–9.

УДК 004.9

## Принципы организации системы электронного документооборота с использованием электронной цифровой подписи при согласовании и утверждении проектной документации

И. С. Горшков, И. В. Ильюшко

Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»

**Аннотация.** Рассмотрены процедуры согласования проектной документации между ОАО РЖД и ОАО «Ленгипротранс». Предложены методы оптимизации процедуры согласования проектной документации с использованием систем электронного документооборота на базе электронной цифровой подписи. Рассмотрен вопрос о практическом применении предложенного метода.

**Ключевые слова:** электронный документооборот; электронная цифровая подпись; согласование проектной документации; ОАО «Ленгипротранс»; ОАО РЖД.

### 1 Введение

В любой организации процесс деятельности отражен в большом количестве документации (технической, юридической, финансовой, кадровой и др.). В настоящее время во многих компаниях используются системы документооборота.

В данной статье особое внимание будет уделено системам документооборота в компании ОАО РЖД и в проектных институтах. Рассмотрены процессы согласования технической документации на примере схематического плана станции, а также сформулированы предложения по ускорению процесса согласования технической документации и произведена оценка перспектив предлагаемой системы.

Очень часто вместо понятия «бесбумажная технология» документооборота в ОАО РЖД используется понятие «электронной технологии» документооборота, которая, по заверению многих руководителей, широко применяется во всех подразделениях ОАО РЖД. Однако по-прежнему руководители различных уровней имеют дело с огромным количеством бумажной документации. Из сказанного следует, что вместо эффективной бесбумажной технологии ведения технической документации в компании преобладает

смешанная электронно-бумажная технология. Мнение о том, что без бумажного экземпляра не обойтись, несостоятельно при современном уровне развития электронных устройств.

### 2 Процедуры согласования и утверждения проектной документации в ОАО РЖД и ОАО «Ленгипротранс»

Любой документ перед тем, как он будет приведен в исполнение, проходит определенные ступени его согласования с руководителями подразделений ОАО РЖД.

Так, к примеру, в проектном институте ОАО «Ленгипротранс» процедура согласования технической документации проходит следующие этапы (рис. 1).

После создания документа группой проектировщиков и проверки его руководителем группы, он (документ) должен быть согласован с главным специалистом (ГС), главным инженером проекта (ГИП), пройти нормоконтроль и попасть на подпись начальнику отдела. В случае со схематическим планом станции добавляется дополнительная цепочка из главного специалиста технического отдела (ТО) и начальника отдела узлов и станций (ОУС). Далее схема проходит цепочку согласования в ОАО РЖД и утверждается главным ревизором железной дороги (НГ).

Рассмотрим процедуру согласования технической документации во внутренней структуре РЖД. Подробная схема представлена на рис. 2.

После внесения изменений в схему инженером группы технической документации (ШЧИ) и проверки ее главным инженером дистанции СЦБ (ШЧГ) схема должна быть согласована с начальником станции (ДС), начальниками дистанций СЦБ (ШЧ), ди-

станции пути (ПЧ). В случае, если станция электрифицирована, необходимо получить подпись начальника дистанции электро-снабжения (ЭЧ). Затем документ отправляется на согласование руководителю центра по работе со станциями (ДЦС), заместителю главного ревизора железной дороги по региону (ЗамРБ) и заместителю главного инженера железной дороги по региону (ЗамНГ). Далее схематический план станции должен быть согласован с начальниками службы пути (П), службы СЦБ (Ш), руководителем дирекции управления движением (Д). Перед тем как документ будет подписан начальни-

ком Службы автоматики и телемеханики, он должен быть согласован с начальником дорожной лаборатории СЦБ (ШЛИ) и с начальником технического отдела службы Ш (ШЦ). Если станция электрифицирована, необходимо получить подпись начальника службы электроснабжения (Э). После этого на схеме должен поставить свою подпись заместитель начальника дорожной дирекции инфраструктуры по техническим вопросам (ДИЗТех) и главный ревизор железной дороги (РБ). Наконец, схематический план должен утвердить главный ревизор железной дороги (НГ).

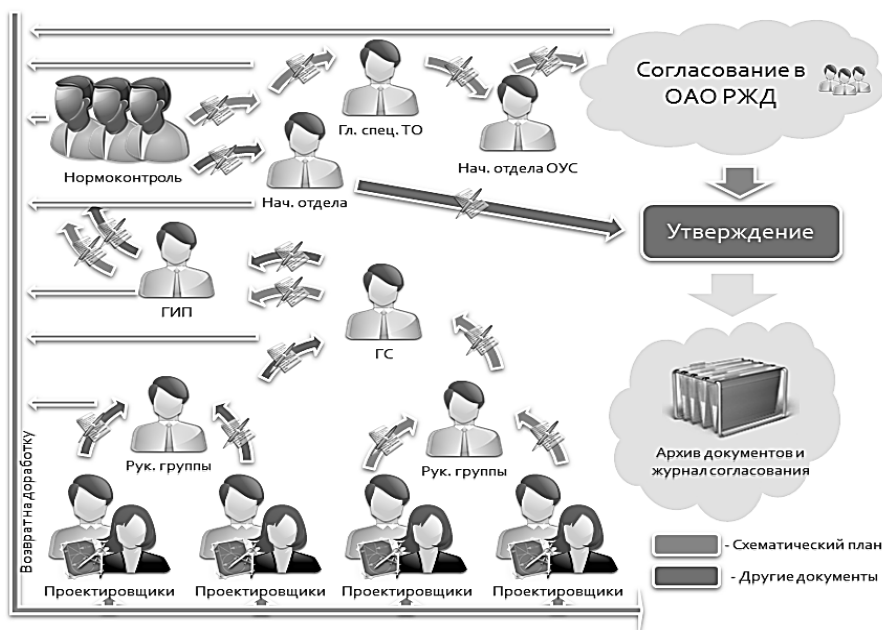


Рис. 1 Процедура согласования технической документации в ОАО «Ленгипротранс»

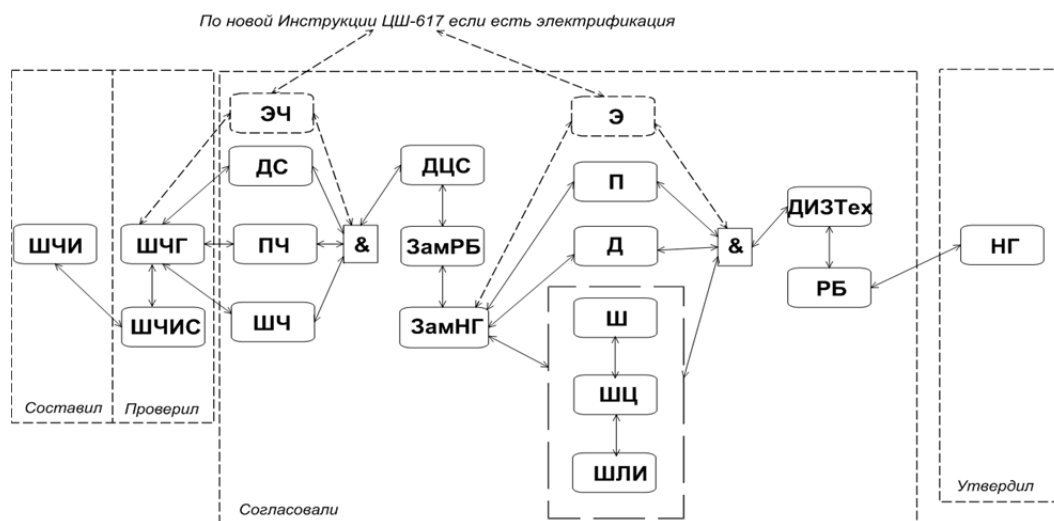


Рис. 2 Процедура согласования технической документации во внутренней структуре РЖД

Это довольно длительный процесс при использовании бумажной системы документооборота, который может продолжаться несколько месяцев с момента создания проектной документации. И причин тому много. Это и длительное ожидание при подписании командировочных документов, потеря документа, длительное время нахождения командировочного сотрудника в пути и др.

### **3 Методы оптимизации процедуры согласования и утверждения проектной документации с использованием электронной цифровой подписи**

Для упрощения процедуры согласования предлагается использовать электронный документооборот, при котором будет полностью обеспечена технология процесса. Главной особенностью систем электронного документооборота является использование электронной цифровой подписи (ЭЦП), с помощью которой можно организовать процесс утверждения проектной документации.

Действующий федеральный закон об ЭЦП [1], вступивший в силу с 01.07.2013 г., определяет электронную подпись как «информацию в электронной форме, которая присоединена к другой информации в электронной форме (подписываемой информации) или иным образом связана с такой информацией и которая используется для определения лица, подписывающего информацию» [1]. Федеральный закон различает несколько видов электронной подписи: простая и усиленная. Усиленная электронная подпись может быть неквалифицированной и квалифицированной.

Введем понятие корпоративной электронной подписи и корпоративной информационной системы. *Корпоративная электронная подпись* – это электронная подпись, которая применяется только в системе документооборота некоторой организации. В корпоративной информационной системе участники электронного взаимодействия – это определенный круг лиц. Из федерального закона об ЭЦП [1] следует, что в тех случаях, когда корпоративные информационные системы не взаимодействуют с государственными системами общего пользования, большинство решений, касающихся процес-

са функционирования таких систем оставляется на усмотрение их участников. Таким образом, использование ЭЦП внутри организации регулируется внутренними нормативными документами.

Федеральный закон об ЭЦП [1] наделяет документ, подписанный при помощи ЭЦП, юридической силой, а именно «информация в электронной форме, подписанная простой электронной подписью или неквалифицированной электронной подписью, признается электронным документом, равнозначным документу на бумажном носителе, подписанному собственноручно в случаях, установленных федеральными законами, нормативными правовыми актами или соглашением между участниками электронного взаимодействия» [1].

Принцип действия ЭЦП основывается на алгоритмах асимметричной криптографии. При этом используется два разных ключа одинаковой длины: секретный и открытый (ключевая пара). Если информацию подписать при помощи одного из ключей (секретного), то проверить имеющуюся подпись можно будет только с помощью другого (открытого) ключа [2].

На самом деле, шифруется не весь документ целиком, а только результат, полученный после применения к данному документу хэш-функции. Хэш-функция – это процедура обработки сообщения, в результате действия которой формируется строка символов фиксированной длины. Малейшие изменения в тексте сообщения приводят к изменению вычисленного значения функции. Таким образом, любые искажения содержимого документа приведут к изменению результата хэш-функции, который и есть электронная подпись.

При проверке ЭЦП получателем сообщения сначала вычисляется хэш-функция полученного документа, затем расшифровывается электронная подпись с помощью открытого ключа лица, подписавшего документ. Полученные результаты сравниваются. Если значения хэш-функций совпадают, то подпись считается верной, в противном случае полагают, что при подписании или передаче документа произошла ошибка. На рис. 3 представлена схема процедуры подписания и проверки подписанного документа.

Для внедрения системы электронного документооборота предлагается выполнить следующее.

1. Представить для утверждения и согласования в проектные институты и ОАО РЖД документацию по разработке и внедрению системы электронного документооборота (СЭД).

2. Совместно с проектными институтами подготовить развернутый план мероприятий

по внедрению системы электронного документооборота.

3. Подготовить предложения по размещению технических средств для внедрения СЭД.

4. Подготовить проект приказа об опытной эксплуатации системы электронного документооборота, назначить ответственных лиц в проектных институтах и в системе ОАО РЖД.

#### Подписывание



#### Проверка

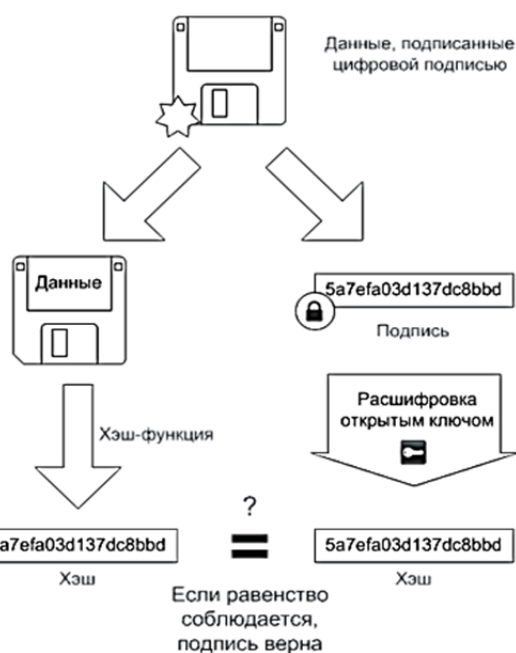


Рис. 3 Процедуры подписания и проверки подписи электронного документа

## 4 Практическая реализация предложенного метода

Сегодня силами НТЦ САПР ведутся работы по внедрению корпоративной ЭЦП на базе электротехнического отдела (ЭТО) Ленгипротранса (ЛГТ) для согласования, утверждения и контроля потоков технической документации по проектам ЖАТ, которые выполняются ЭТО на базе АРМ-ПТД. Разрабатываются и устанавливаются на компьютеры всех пользователей программные модули СЭД (ПМ СЭД), представленные на рис. 4.

Совокупность предложенных модулей позволяет по каждому проекту вести его

«историю» (систему мониторинга выполнения проекта) в привязке к хронологии применения ЭЦП (факт подписания, дата, ФИО, факсимиле). На рис. 5 представлена часть рабочего экрана системы мониторинга выполнения проекта.

В системе соблюдается существующая технология разработки, согласования, утверждения и внесения изменений, представленная выше (см. рис. 1, 2).

На основе внедряемой корпоративной ЭЦП планируется создание АРМ-ЭЦП (автоматизированного рабочего места) для упрощения процесса документооборота и уменьшения стоимости затрат на проектирование

объектов железнодорожной отрасли и инфраструктуры в целом. Существенная экономия времени может быть достигнута за счет того, что не требуется физическое согласование технической документации и при-

менение ЭЦП как средства виртуальной верификации, имеющей равноценную юридическую силу. Планируется, что пользователями АРМ-ЭЦП будут не только разработчики и руководители групп.

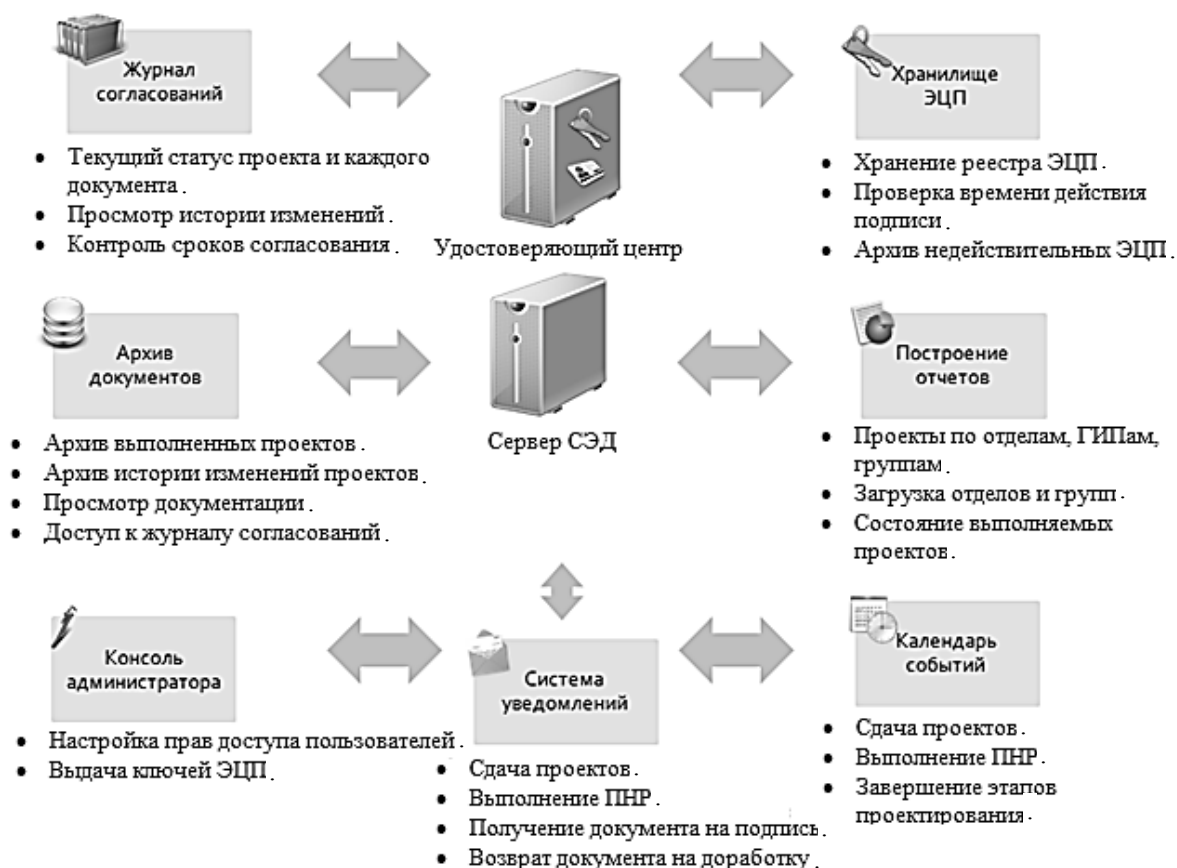


Рис. 4 Внедряемые программные модули системы электронного документооборота

План реализации			Разработка
	Начало	Конец	
1. Схематический план станции	01.01.13	10.01.13	Иванов И.П. ➔ 04.01.13
2. Таблица взаимозависимости стрелок, сигналов и маршрутов	03.03.13	18.03.13	Иванов И.П. ➔ 08.03.13
3. Двухниточный план станции			
4. Кабельная сеть			

Рис. 5 Система мониторинга выполнения проекта

## 5 Заключение

В заключение хотелось бы отметить, что во многих государственных организациях России ЭЦП используется более широко, чем в системе ОАО РЖД и ОАО «Ленгипротранс», например, в банковских и финансо-

во-кредитных учреждениях, в ФНСТ РФ (Федеральная налоговая служба по тарифам). ЭЦП используется также для сдачи налоговой отчетности, сдачи отчетности в ПФР (Пенсионный фонд России) и ФСС (Фонд социального страхования), участия в электронных торгах и с недавнего времени в но-

тариате. В связи с положительным опытом использования ЭЦП в российских учреждениях предлагается полноценное внедрение ЭЦП в процедуру разработки и согласования технической документации между ОАО «Ленгипротранс» и ОАО РЖД. Первые шаги на пути решения этой трудоемкой задачи уже сделаны НТЦ САПР ПГУПС. Основными критериями достижения успеха должны стать:

- сокращение затрат времени сотрудников проектной организации на выполнение рутинных операций;
- сокращение затрат на командировочные расходы при проведении пусконаладочных работ;
- сокращение времени на поиск необходимой информации;
- сокращение времени на повторное утверждение документов;
- сокращение времени на получение информации о стадии проектирования и содержания проекта;

- снижение доли бумажных документов.

Однако следует заметить, что достижение ожидаемых результатов в процессе внедрения электронного документооборота в системе ОАО РЖД и ОАО «Ленгипротранс» без полной поддержки руководства обеих сторон будет невозможным.

### Библиографический список

1. *Федеральный закон* от 06.04.2011 № 63-ФЗ «Об электронной подписи».
2. *Фергюсон, Н.* Практическая криптография / Н. Фергюсон, Б. Шнайер. – Москва : Вильямс, 2005. – 424 с. – ISBN 5-8459-0733-0.
3. *Протокол № 1* от 05.12.2013 г. заседания Научно-технического совета по теме «Электронно-цифровая подпись для согласования технической документации при проектировании (АРМ ЭЦП)» в ОАО «Ленгипротранс».



## Вопросы технической диагностики

УДК 681.518.5:004.052.32

### Классические и взвешенные коды Бергера в системах функционального контроля

В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов

Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»

**Аннотация.** Анализируются свойства классических и взвешенных кодов Бергера при возникновении искажений только в информационных векторах кодов при безошибочности контрольных. Показано, что классические коды Бергера не обнаруживают большое число ошибок малых кратностей. Взвешенные коды Бергера обнаруживают любые одно- и двукратные искажения в информационных векторах, имея, однако, длину контрольного вектора, превышающую половину длины информационного вектора.

**Ключевые слова:** функциональный контроль; необнаруживаемая ошибка; информационные разряды; вес информационного разряда; код Бергера; взвешенный код Бергера; свойства кода.

#### 1 Введение

Одним из наиболее эффективных методов повышения надежности современных микроэлектронных систем является организация их функционального (рабочего, *on-line*) диагностирования [1–5]. Такой подход в построении системы позволяет контролировать техническое состояние объекта в непрерывном режиме без отключения от работы и без подачи специальных тестовых воздействий [6]. Это особенно актуально в системах автоматического управления, например, в железнодорожной автоматике и телемеханике, когда неверная работа устройства может нарушить технологический процесс.

В общем случае система функционального контроля подразумевает наличие трех компонентов: блока основной логики  $f(x)$ , блока контрольной логики  $g(x)$  и блока тестера. Элементы системы контроля объединяются так, как это показано на рис. 1.

В контролируемом устройстве  $f(x)$  возможно возникновение любых неисправно-

стей (как константных, так и неисправностей типа «временная задержка» [7–9]), но чаще всего объект рассматривается при потенциальном возникновении только однократных искажений во внутренних элементах структуры.

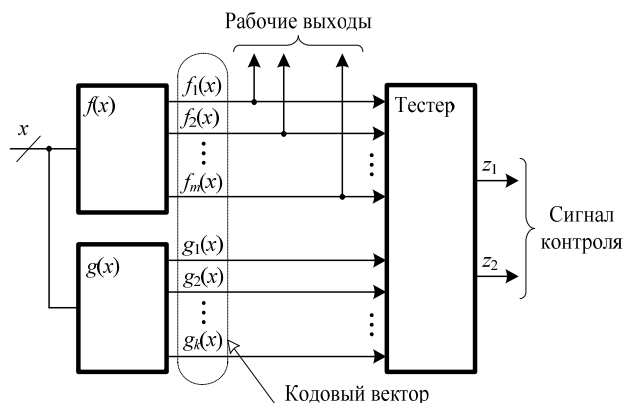


Рис. 1 Схема организации системы функционального контроля

Наибольшее распространение в современных микроэлектронных устройствах получила система дублирования. В ней блок дополнительной логики повторяет блок основной логики, а тестер представляет собой самопроверяемый компаратор сравнения одноименных сигналов от разных блоков, а также их сжатия к двум контролируемым значениям  $z_1$  и  $z_2$ .

Как отмечается в [7], при построении систем функционального диагностирования комбинационных логических устройств далеко не всегда эффективно использовать именно принцип дублирования. Можно построить систему функционального контроля, обнаруживающую все однократные дефекты блока  $f(x)$  с уменьшенной сложностью. Для

решения этой задачи применяются свойства разделимых (систематических) кодов [10].

Так, выходы блока  $f(x)$  отождествляются с информационным вектором длины  $m$ , а выходы блока  $g(x)$  – с контрольным вектором длины  $k$ . От правил построения кода зависят характеристики системы диагностирования по обнаружению искажений в контролируемом блоке. Так как любые неисправности блока  $f(x)$  могут влиять на его рабочие выходы, т. е. могут искажать их действительные значения, можно рассматривать свойства отдельно взятого кода по обнаружению ошибок в информационных разрядах. Тогда от правил построения контрольного вектора будут зависеть и свойства по обнаружению ошибок в информационных разрядах.

## 2 О кодах Бергера и их показателях в системах функционального контроля

При организации систем функционального контроля комбинационных логических устройств часто используются коды с суммированием. Данный класс кодов также принадлежит к разделимым кодам. Значения контрольных разрядов определяются по значениям информационных. Наиболее простой способ построения кода с суммированием заключается в подсчете суммы единичных информационных разрядов (веса  $r$  информационного вектора). Код, у которого в контрольном векторе записывается двоичное число, равное весу информационного вектора, называется *классическим кодом Бергера* [11]. Далее будем этот код обозначать как  $S(n, m)$ -код, где  $n = m + k$  – общая длина кодового вектора.

Классический код Бергера обладает важной особенностью – он обнаруживает любые однонаправленные искажения в информационных векторах (рис. 2, а). Кроме того, код Бергера обнаруживает любые искажения нечетных кратностей  $d$  (рис. 2, б). При возникновении данных типов ошибок в искаженном векторе нарушается вес и контрольный вектор перестает соответствовать его значению.

Необнаруживаемыми искажениями в информационных векторах  $S(n, m)$ -кодов являются разнонаправленные ошибки четных кратностей (рис. 2, в). Число таких искажений четной кратности  $d$  ( $d \in \{2, 4, \dots, m-1\}$ ,

если  $m$  – нечетное и  $d \in \{2, 4, \dots, m\}$ , если  $m$  – четное) может быть подсчитано по формуле [12]:

$$N_{m,d} = \sum_{r=\frac{d}{2}}^{\frac{m-d}{2}} C_m^r C_r^{\frac{d}{2}} C_{m-r}^{\frac{d}{2}}. \quad (1)$$

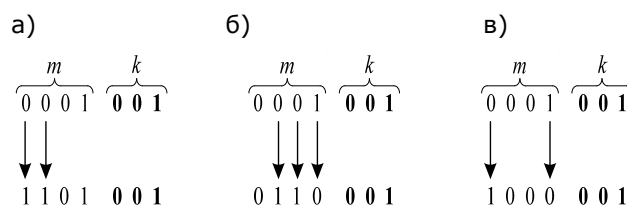


Рис. 2 Ошибки в информационных векторах кодов:

а – обнаруживаемые однонаправленные;  
б – обнаруживаемые разнонаправленные;  
в – необнаруживаемые

Зная выражение (1), нетрудно рассчитать и общее число искажений в коде Бергера как сумму всех величин  $N_{m,d}$ .

Абсолютный показатель оценки эффективности обнаружения искажений в информационных разрядах не очень удобен. Для оценки эффективности кода может быть подсчитан коэффициент  $\beta_d$ , характеризующий долю необнаруживаемых ошибок кратности  $d$  в информационных векторах от общего числа искажений этой же кратности:

$$\beta_d = \frac{N_{m,d}}{N_{m,d}^{\Sigma}} = \frac{\sum_{r=\frac{d}{2}}^{\frac{m-d}{2}} C_m^r C_r^{\frac{d}{2}} C_{m-r}^{\frac{d}{2}}}{2^m C_m^d}. \quad (2)$$

В знаменателе формулы (2) записано общее число необнаруживаемых искажений кратности  $d$ .

В [12] доказано, что для классических кодов Бергера значение величины  $\beta_d$  постоянно и не зависит от длины информационного вектора:

$$\beta_d = 2^{-d} C_d^{\frac{d}{2}}. \quad (3)$$

Другими словами, процент необнаруживаемых искажений кратности  $d$  от общего числа искажений той же кратности в кодах Бергера является постоянным.

Пользуясь (2), нетрудно определить, что  $\beta_2 = 0,5$ ;  $\beta_4 = 0,375$ ;  $\beta_6 = 0,3125$ ; ...  $\beta_{20} = 0,1762$ .

Классические коды Бергера имеют низкую эффективность обнаружения искажений в области малой кратности – ими не обнаруживается 50 % двукратных искажений и 37,5 % четырехкратных искажений.

Кроме приведенного показателя  $\beta_d$  для оценки эффективности кода по обнаружению искажений, используется коэффициент  $\gamma$  – доля необнаруживаемых ошибок от общего числа ошибок в коде и  $\xi$  – коэффициент эффективности кода при заданных длинах информационных и контрольных векторов. Коэффициент  $\xi$  определяется как отношение числа необнаруживаемых ошибок в данном коде к числу необнаруживаемых ошибок в так называемом оптимальном коде при таких же значениях  $m$  и  $k$  [13]:

$$\xi = \frac{N_{m,k}}{N_{m,k}^{\min}}. \quad (4)$$

В оптимальном коде, как показано в [13], все  $2^m$  информационных векторов распределяются по  $2^k$  контрольным векторам равномерно, что делает значение общего числа необнаруживаемых ошибок минимальным:

$$N_{m,k}^{\min} = 2^m (2^{m-k} - 1). \quad (5)$$

В коде Бергера каждому контрольному вектору соответствуют  $C_m^r$  информационных векторов, что определяет и низкое значение коэффициента  $\xi$ : для большинства  $S(n, m)$ -кодов  $\xi < 0,5$ .

В работе [11] предложен способ построения кодов с суммированием, позволяющий обнаруживать любые двукратные искажения в кодовых векторах. Он основан на приписывании каждому информационному разряду некоторого весового коэффициента  $w_i$ . Джей Бергер (Jay M. Berger) предложил использовать последовательность натуральных чисел, за исключением степеней числа 2 в качестве значений весовых коэффициентов:

[3, 5, 6, 7, 9, 10, ...]. Данный код назовем *взвешенным кодом Бергера* и обозначим как  $WS(n, m)$ -код. Взвешенные коды с другими значениями весовых коэффициентов применительно к решению задач построения систем функционального диагностирования рассматривались в [14–17].

Далее исследуются свойства  $WS(n, m)$ -кода по обнаружению искажений в информационных векторах, что актуально для систем функционального контроля.

### 3 Свойства взвешенных кодов Бергера в системах функционального контроля

Рассмотрим классический и взвешенный коды Бергера при длине информационного вектора  $m = 3$ . Число контрольных разрядов  $S(n, m)$ -кода определяется величиной  $k = \lceil \log_2(m+1) \rceil$ , а во взвешенных кодах – величиной  $k = \lceil \log_2(W_{\max} + 1) \rceil$ , где  $W_{\max}$  является суммой весов информационных разрядов для информационного вектора  $\langle 1, 1, \dots, 1 \rangle$  (запись  $\lceil b \rceil$  обозначает целое сверху от  $b$ ). Таким образом, в классическом коде Бергера имеется  $k = 2$  контрольных разрядов, а во взвешенном –  $k = 4$  контрольных разрядов. В табл. 1 представлены кодовые векторы рассматриваемых  $S(5, 3)$  и  $WS(7, 3)$  кодов.

Анализируя табл. 1, отметим, что каждому информационному вектору  $WS(7, 3)$ -кода соответствует только один контрольный вектор, а в  $S(5, 3)$ -коде нескольким информационным векторам может соответствовать один контрольный, поэтому в  $WS(7, 3)$ -коде нет необнаруживаемых искажений, а в  $S(5, 3)$ -коде они есть. Отметим, что у  $WS(7, 3)$ -кода число  $k > m$ , поэтому он не является удачным выбором при организации систем функционального контроля – коды с повторением (*double-codes*) в этом имеют приоритет.

ТАБЛИЦА 1. Кодовые векторы  $S(5, 3)$  и  $WS(7, 3)$  кодов

№	Информационный вектор			$S(5, 3)$ -код		$WS(7, 3)$ -код			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y_1$	$y_2$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	0	1	0	1	1	0
2	0	1	0	0	1	0	1	0	1
3	0	1	1	1	0	1	0	1	1
4	1	0	0	0	1	0	0	1	1
5	1	0	1	1	0	1	0	0	1
6	1	1	0	1	0	1	0	0	0
7	1	1	1	1	1	1	0	0	1

В работе [12] предложено представлять любой систематический код в виде таблицы, где в столбцах размещаются все контрольные векторы, и каждый столбец содержит соответствующие контрольным информационным векторам. Такой подход позволяет на основе анализа контрольных групп подсчитать суммарное число обнаруживаемых искажений каждой кратности, т. к. все обнаруживаемые ошибки – это ошибки, переводящие информационные векторы одной контрольной группы друг в друга. Авторами составлены алгоритмы анализа контрольных групп для кодов Бергера и взвешенных кодов Бергера, которые реализованы в виде программного модуля расчета характеристик кодов. В табл. 2 приводятся характеристики рассматриваемых кодов с суммированием с длинами информационных векторов  $m = 2 \div 15$ .

Сравнивая значения количества обнаруживаемых искажений по кратностям для  $S(n, m)$  и  $WS(n, m)$  кодов, отметим следующие особенности кодов Бергера:

1. Любой  $WS(n, m)$ -код имеет меньшее количество обнаруживаемых искажений четной кратности  $d$ , чем соответствующий  $S(n, m)$ -код.

2. Любой  $WS(n, m)$ -код обнаруживает все двукратные искажения в информационных векторах.

3. Любой  $S(n, m)$ -код, в отличие от  $WS(n, m)$ -кода, обнаруживает все искажения нечетных кратностей.

4. Любой  $WS(n, m)$ -код обнаруживает на порядок больше ошибок в информационных векторах, чем  $S(n, m)$ -код.

На рис. 3 приводится график зависимости величины  $\Delta = \frac{N_m^{S(n, m)}}{N_m^{WS(n, m)}}$  – отношения

числа обнаруживаемых ошибок в  $S(n, m)$ -кодах к числу обнаруживаемых искажений в  $WS(n, m)$ -кодах. Величина  $\Delta$  достигает своего минимума при  $m = 8$ .

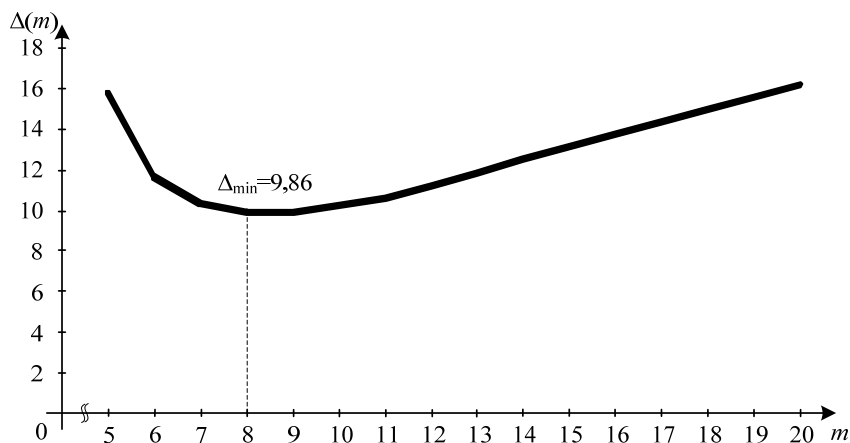
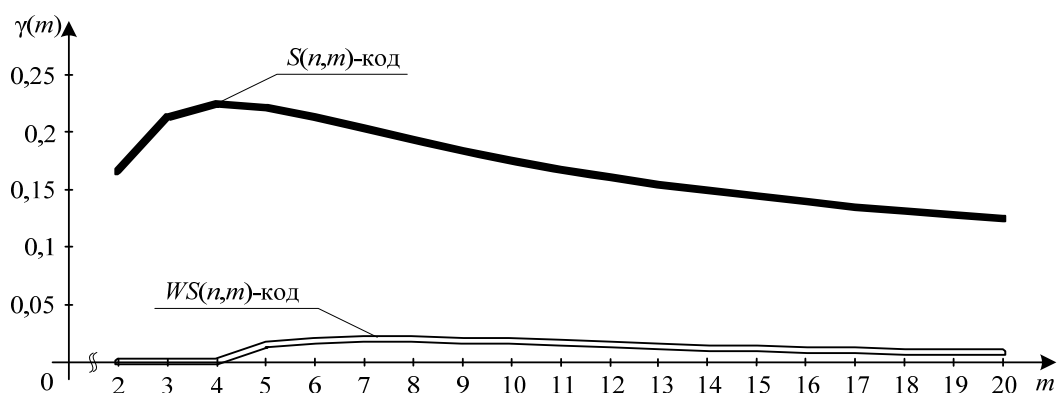
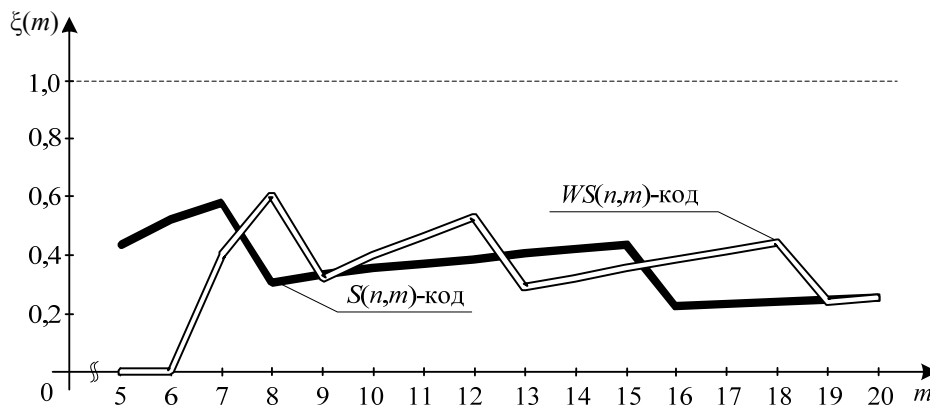
Для сравнения на рис. 4 и 5 приводятся графики изменения величин  $\gamma$  и  $\xi$  при изменении длины информационного вектора соответственно для  $S(n, m)$ -кодов и  $WS(n, m)$ -кодов.

На рис. 4 видно, что  $WS(n, m)$ -коды не обнаруживают меньшее количество ошибок в информационных векторах, чем  $S(n, m)$ -коды. По графикам рис. 5 можно заключить, что при одних значениях  $m$   $S(n, m)$ -коды более близки к оптимальным, а при других, наоборот, более близки  $WS(n, m)$ -коды. При этом чем ближе значение  $W_{\max}$  к числу  $2^k - 1$ , тем выше эффективность взвешенного кода для данного значения  $m$ .

Для  $WS(n, m)$ -кодов по графикам на рис. 5 можно также установить следующее свойство. Для кодов с постоянным значением числа контрольных разрядов  $k$  увеличиваются значения коэффициента  $\xi$  от кода с числом информационных разрядов  $m = 2^{k-1}$  к коду с числом информационных разрядов  $m = 2^k$ , где  $k = \lceil \log_2 (W_{\max} + 1) \rceil$ . Подобным свойством обладают и классические коды Бергера с той лишь разницей, что в них  $k = \lceil \log_2 (m + 1) \rceil$  [13, 18].

ТАБЛИЦА 2. Необнаруживаемые ошибки в кодах Бергера

$m$	$k$	Необнаруживаемые ошибки кратностей $d$															$N_m$	$\gamma$	$\xi$
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
2	4	0	0														0	0	–
	2	0	2														2	0,1667	0
3	5	0	0	0													0	0	–
	2	0	12	0													12	0,2143	0,6667
4	5	0	0	0	0												0	0	–
	3	0	48	0	6												54	0,225	0,2963
5	5	0	0	8	4	2											14	0,0141	0
	3	0	160	0	60	0											220	0,2218	0,4364
6	6	0	0	32	32	8	2										74	0,0184	0
	3	0	480	0	360	0	20										860	0,2133	0,5209
7	6	0	0	96	128	72	24	0									320	0,0197	0,4
	3	0	1344	0	1680	0	280	0									3304	0,2032	0,5811
8	6	0	0	320	480	304	136	40	0								1280	0,0196	0,6
	4	0	3584	0	6720	0	2240	0	70								12614	0,1932	0,3044
9	7	0	0	896	1600	1280	736	280	48	14							4854	0,0186	0,3164
	4	0	9216	0	24192	0	13440	0	1260	0							48108	0,1839	0,3299
10	7	0	0	2304	5120	4800	3232	1856	600	108	26						18046	0,0172	0,3972
	4	0	23040	0	80640	0	67200	0	12600	0	252						183732	0,1754	0,3511
11	7	0	0	6144	14848	16384	13696	9312	4272	1480	332	0					66468	0,0159	0,4622
	4	0	56320	0	253440	0	295680	0	92400	0	5544	0					703384	0,1678	0,3698
12	7	0	0	16384	39936	51456	52480	41792	24448	11136	3088	352	82				241154	0,0144	0,5265
	4	0	135168	0	760320	0	1182720	0	554324	0	66528	0	924				2699984	0,161	0,3868
13	8	0	0	40960	108544	154624	182016	174720	121280	64288	25648	6184	796	150			879210	0,0131	0,2888
	4	0	319488	0	2196480	0	4392960	0	2882880	0	576576	0	24024	0			10392408	0,1549	0,4028
14	8	0	0	98304	282624	458752	609280	654080	536832	346048	165312	53872	13400	2560	0		3221064	0,012	0,3205
	4	0	745472	0	6150144	0	15375360	0	13453440	0	4036032	0	336336	0	3432		40100216	0,1494	0,418
15	8	0	0	237568	729088	1294336	1927168	2353664	2200832	1619072	937472	402048	123584	29352	4708	0	11858892	0,011	0,3509
	4	0	1720320	0	16773120	0	51251200	0	57657600	0	24216192	0	3363360	0	102960	0	155084752	0,1444	0,4325

Рис. 3 График зависимости величины  $\Delta$  от  $m$ Рис. 4 Графики зависимостей величины  $\gamma$  от  $m$ Рис. 5 Графики зависимостей величины  $\xi$  от  $m$ 

#### 4 Заключение

В заключение отметим, что с усложнением микроэлектронной техники увеличивается и число потенциальных источников сбоев [19]. Этот факт нельзя не учитывать при создании высоконадежных систем управления, важное место в которых занимают методы тестового и функционального диагностирования [20].

В данной работе показаны особенности кодов с суммированием [11] по обнаружению искажений в системах функционального контроля комбинационных логических схем. Оба класса кодов – и код с суммированием единичных информационных разрядов, и взвешенный код с суммированием – обладают важной особенностью: обнаруживают любые однонаправленные искажения в ин-

формационных разрядах. Это определяет возможности кодов с суммированием в решении задач организации контроля комбинационных схем, в которых любая одиночная неисправность может привести только к монотонным искажениям выходов [21–25].

Коды с суммированием единичных разрядов, в отличие от взвешенных кодов с суммированием, обнаруживают любые искажения нечетных кратностей. Взвешенные коды Бергера имеют возможность обнаружения любых одно- и двукратных искажений в информационных векторах. Это свойство можно использовать при организации контроля комбинационных схем, в которых внутренняя структура исключает связь одного логического элемента с тремя и более выходами схемы. Недостатком взвешенного кода Бергера является большое число контрольных разрядов. Это при построении системы диагностирования усложняет блоки контрольной логики и тестера. Взвешенный код, однако, может оказаться эффективнее в системе диагностирования, чем код с повторением (схема дублирования).

### Библиографический список

1. *Touba N.A., McCluskey E.J.* Logic Synthesis of Multilevel Circuits with Concurrent Error Detection // *IEEE Trans. Computer-Aided Design of Integrated Circuits and System*, vol. 16, Jul. 1997, pp. 783–789.
2. *Nicolaidis M., Zorian Y.* On-Line Testing for VLSI – A Compendium of Approaches // *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*. – № 12. – 1998. – Pp. 7–20.
3. *Dutta A., Touba N.A.* Synthesis of Non-Intrusive Concurrent Error Detection Using an Even Error Detection Function // *International test conference (ITC)*. – 2005. – Pp. 1059–1066.
4. *New Methods of Concurrent Checking: Edition 1 / M. Göessel, V. Ocheretny, E. Sogomonyan, D. Marienfeld*. – Dordrecht: Springer Science + Business Media B. V., 2008. – 184 p. – ISBN 978-1-4020-8419-5.
5. *On the problem of selection of code with summation for combinational circuit test organization / D. Efanov, V. Sapozhnikov, Vl. Sapozhnikov, A. Blyudov* // *Proceedings of 11<sup>th</sup> IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2013)*, Rostov-on-Don, Russia, September 27–30, 2013, pp. 261–266.
6. *Пархоменко, П. П.* Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства) / П. П. Пархоменко, Е. С. Согомонян. – Москва : Энергоатомиздат, 1981. – 320 с.
7. *Согомонян, Е. С.* Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомонян, Е. В. Слабаков. – Москва : Радио и связь, 1989. – 208 с. – ISBN 5-256-00308-9.
8. *Path Delay Faults and ENF / A. Matrosova, V. Lipsky, A. Melnikov, V. Singh* // *Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2010)*, St. Petersburg, Russia, September 17–20, 2010, pp. 164–167.
9. *Обеспечение тестируемости задержек путей при синтезе схем покрытием BDD-графов / А. Ю. Матросова, Д. В. Кудин, Е. А. Николаева, Е. В. Румянцева* // *Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика*. – 2013. – № 2 (23). – С. 130–139.
10. *Hall J. I.* Notes on Coding Theory // *Dep. Of Mathematics Michigan State University East Lansing, MI 48824 USA*, 3 January 2003. – 193 p.
11. *Berger, J. M.* A note on error detection codes for asymmetric channels // *Information and Control*. – 1961. – Vol. 4. – Issue 1. – Pp. 68–73.
12. *Ефанов, Д. В.* О свойствах кода с суммированием в схемах функционального контроля Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // *Автоматика и телемеханика*. – 2010. – № 6. – С. 155–162.
13. *Построение модифицированного кода Бергера с минимальным числом необнаруживаемых ошибок информационных разрядов / А. А. Блюдов, Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников* // *Электронное моделирование*. – 2012. – Т. 34. – № 6. – С. 17–29.
14. *Das D., Touba N.A.* Weight-Based Codes and their Application to concurrent error detection of multilevel circuits // *Proc. 17<sup>th</sup> IEEE Test Symposium*, California, USA, 1999, pp. 370–376.
15. *Favalli M., Metra C.* Optimization of error detecting codes for the detection of crosstalk originated errors // *Design, Automation and Test in Europe (DATE)*, March 13–16, 2001, pp. 290–296.
16. *Low cost concurrent error detection based on modulo weight-based codes / D. Das, N. A. Touba, M. Seuring, M. Gossel* // *Proceedings of IEEE 6th International On-line Testing Workshop (IOLTW)*, Spain, Palma de Mallorca, July 3–5, 2000, pp. 171–176.
17. *Scan chain fault identification using weight-based codes for SoC circuits / S. Ghosh, K. W. Lai, W. B. Jone, S. C. Chang* // *Proceedings of the 13<sup>th</sup> Asian Test Symposium (ATS'2004)*, 2004, pp. 210–215.
18. *Метод построения кода Бергера с повышенной эффективностью обнаружения ошибок в информационных разрядах / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, Д. А. Никитин* //

Электронное моделирование. – 2013. – Т. 35. – № 4. – С. 21–34.

19. Дианов, В. Н. Концептуальные особенности построения бесшибной аппаратуры / В. Н. Дианов // Автоматика и телемеханика. – 2012. – № 7. – С. 119–138.

20. Хаханов, В. И. Проектирование и тестирование цифровых систем на кристаллах / В. И. Хаханов, Е. И. Литвинова, О. А. Гузь. – Харьков : ХНУРЭ, 2009. – 484 с.

21. *Design of Self-Checking Unidirectional Combinational Circuits with Low Area Overhead* / V. V. Saposhnikov, Vl. V. Saposhnikov, A. Morosov, M. Goessel // Proceedings of 2<sup>nd</sup> IEEE International On-line Testing Workshop (IOLTW), Biarritz, France, 1996, pp. 56–67.

22. Метод построения комбинационных сампроверяемых устройств с обнаружением всех одиночных неисправностей / В. В. Сапожников,

Вл. В. Сапожников, М. Гессель, А. А. Морозов // Электронное моделирование. – 1998. – Т. 20. – № 6. – С. 70–80.

23. *Morozov A. Entwurf von selbstprüfenden digitalen Schaltungen mit monoton unabhängigen Ausgängen: Dissertation Dr. Rer. nat.* // Universität Potsdam, 1996. – P. 85.

24. *Self-Checking Combinational Circuits with Unidirectionally Independent Outputs* / A. Morosow, V. V. Saposhnikov, Vl. V. Saposhnikov, M. Goessel // VLSI Design. – 1998. – V. 5. – Issue 4. – Pp. 333–345.

25. *A New Design Method for Self-Checking Unidirectional Combinational Circuits* / Saposhnikov V. V., Morosov A., Saposhnikov Vl. V., Göessel M. // Journal of Electronic Testing: Theory and Applications (JETTA). – 1998. – V. 12. – Issue 1–2 (February /April). – Pp. 41–53.

---



УДК 681.518.5:004.052.32

## О синтезе монотонных комбинационных схем с обнаружением всех одиночных неисправностей

В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов

Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»

**Аннотация.** Рассматривается задача построения системы функционального контроля комбинационной логической схемы с монотонно независимыми выходами с применением модульных кодов с суммированием. Учет особенностей модульных кодов с суммированием по обнаружению ошибок в информационных векторах позволяет строить системы функционального контроля с уменьшенными аппаратными затратами по сравнению с системами, построенными по классическим кодам Бергера. Приводятся условия, определяющие применение модульных кодов с суммированием при организации систем функционального контроля комбинационных схем с монотонно независимыми выходами.

**Ключевые слова:** функциональный контроль; комбинационная схема; монотонность схемы; код Бергера; модульный код с суммированием; информационный вектор; необнаруживаемая ошибка; свойства кодов по обнаружению ошибок.

### 1 Введение

Во многих отраслях науки и техники для повышения надежности аппаратных составляющих используется *on-line* диагностирование, заключающееся в проверке правильности работы устройства или его составляющих в режиме функционирования самого устройства диагностирования [1]. Одним из вариантов организации *on-line* диагностирования является построение систем функционального контроля [2, 3].

В системе функционального контроля (рис. 1) контролируемое логическое устройство  $f(x)$ , в функции которого входит вычисление системы рабочих булевых функций  $f_1, f_2, \dots, f_m$ , снабжается блоком контрольной логики  $g(x)$ , формирующим систему контрольных булевых функций  $g_1, g_2, \dots, g_k$ . Таким образом, в произвольный момент времени на выходах обоих блоков системы функционального контроля образуется кодовый вектор  $\langle f_1 f_2 \dots f_m g_1 g_2 \dots g_k \rangle$ , принадлежащий некоторому заранее выбранному систе-

матическому коду [4]. Факт соответствия информационной и контрольной составляющих кодового вектора устанавливается схемой самопроверяемого тестера (СПТ). Тестер имеет два выхода  $z_1$  и  $z_2$  и при наличии сбоев в любых блоках системы функционального контроля (включая сам тестер) сигнализирует о наличии дефекта непарафазным сигналом  $\langle 00 \rangle$  либо  $\langle 11 \rangle$  [5].

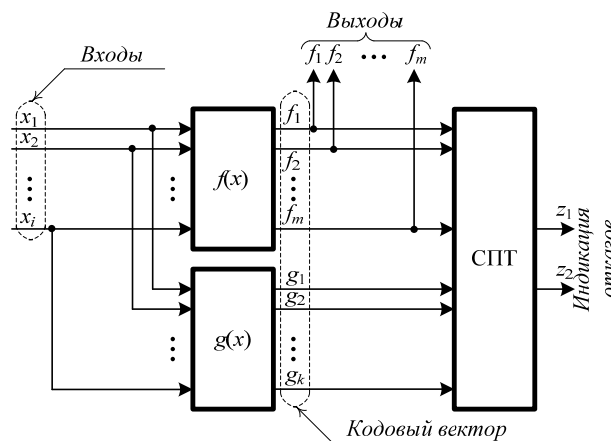


Рис. 1 Система функционального контроля

В качестве основы системы функционального контроля может быть выбран любой систематический код, однако на практике наибольшее распространение получили коды с суммированием [6, 7]. В таких кодах контрольное слово образуется путем суммирования значений определенных информационных разрядов, при этом суммируемые разряды могут быть взвешены [8].

Классический код с суммированием, или код Бергера [9], образуется путем подсчета числа единичных информационных разрядов (веса информационного слова) и записи полученного числа в двоичном виде в контрольное слово. Число контрольных разрядов в коде Бергера равно  $k = \lceil \log_2(m+1) \rceil$ , где  $m$  – число информационных разрядов, а

запись  $\lceil b \rceil$  обозначает целое сверху от  $b$ . Обозначим код Бергера как  $S(n, m)$ -код, где  $n = m + k$  – длина кодового слова. В табл. 1 приводятся кодовые векторы  $S(7, 4)$ -кода.

Коды Бергера обладают важной особенностью, позволяющей эффективно использовать их для организации систем функционального контроля – ими обнаруживаются любые однонаправленные, или монотонные, ошибки в информационных векторах кодовых слов. При возникновении монотонной ошибки искажаются либо только нулевые разряды, либо только единичные разряды (рис. 2), при этом нарушается значение веса информационного вектора, что фиксируется схемой тестера.

На выходах произвольной комбинационной схемы  $f(x)$  могут формироваться различные информационные векторы, что определяется структурой самой схемы. При этом одиночная ошибка произвольного логического элемента или линии связи (сбой, константная неисправность, временная задержка сигнала и пр.) может привести к произволь-

ному искажению информационного вектора, в том числе и к монотонному. Известно [10, 11], что любая комбинационная схема может быть преобразована в схему с независимыми или монотонно независимыми выходами, т. е. в монотонную схему. Функциональный контроль монотонной схемы эффективно организуется по кодам Бергера.

В табл. 2 даны результаты экспериментов, проведенных с системой контрольных примеров MCNC Benchmark Circuits [12] для 20 комбинационных схем. Для каждой схемы в столбцах 2, 3, 4 и 5 указаны число входов и выходов, площадь в условных единицах и дополнительная площадь блока контрольной логики в процентах от площади исходной схемы. Площадь блока контрольной логики рассчитывалась для организации контроля исходных схем по кодам Бергера [13, 14]. Для многих примеров она значительно меньше площади самой комбинационной схемы  $f(x)$  и в среднем составляет 58,15 % от сложности контролируемой схемы.

ТАБЛИЦА 1. Кодовые векторы  $S(7, 4)$  и  $S4(6, 4)$  кодов

№	Информационные разряды				Контрольные разряды				
					$S(7, 4)$ -код			$S4(6, 4)$ -код	
	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$g_1$	$g_2$	$g_3$	$g_1$	$g_2$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	1	0	1
2	0	0	1	0	0	0	1	0	1
3	0	0	1	1	0	1	0	1	0
4	0	1	0	0	0	0	1	0	1
5	0	1	0	1	0	1	0	1	0
6	0	1	1	0	0	1	0	1	0
7	0	1	1	1	0	1	1	1	1
8	1	0	0	0	0	0	1	0	1
9	1	0	0	1	0	1	0	1	0
10	1	0	1	0	0	1	0	1	0
11	1	0	1	1	0	1	1	1	1
12	1	1	0	0	0	1	0	1	0
13	1	1	0	1	0	1	1	1	1
14	1	1	1	0	0	1	1	1	1
15	1	1	1	1	1	0	0	0	0

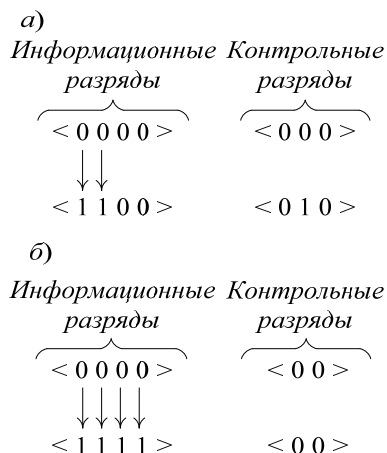


Рис. 2 Однонаправленные ошибки:  
а – в  $S(7, 4)$ -коде; б – в  $S(6, 4)$ -коде

Систему функционального контроля можно еще больше упростить, если в качестве основы выбрать модульный код с суммированием, или  $SM(n, m)$ -код, где

$M \in 2^1, 2^2, \dots, 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil - 1}$  – модуль представления веса информационного вектора [15]. Модульные коды с суммированием имеют меньшее количество контрольных функций за счет модульного принципа подсчета веса. Например, в табл. 1 дан код  $S(6, 4)$ , который имеет меньшее количество контрольных разрядов, чем код Бергера  $S(7, 4)$ . Уменьшение числа контрольных разрядов в системе функционального контроля приводит к сокращению сложности блоков  $g(x)$  и СПТ. Недостаток  $SM(n, m)$ -кодов – увеличенное количество необнаруживаемых ошибок в сравнении с кодами Бергера, а также возможность возникновения монотонных необнаруживаемых ошибок [16, 17]. В данной статье мы приведем условия построения системы функционального контроля любой монотонной схемы по  $SM(n, m)$ -кодам.

ТАБЛИЦА 2. Сложность блока контрольной логики  $g(x)$

Название схемы	Число входов	Число выходов	Площадь	Площадь блока $g(x)$ , %
1	2	3	4	5
cm138a	6	8	480	12
cmb	16	4	888	40
cu	14	11	1168	75
decod	5	16	744	0
ldd	9	19	2352	21
vda	17	39	19536	12
x2	10	7	1056	62
misex1	8	7	1448	36
misex2	25	18	2448	53
rd84	8	4	3128	44
bw	5	28	3064	14
term1	34	10	7944	37
z4m1	7	4	1192	84
alu2	10	6	7264	77
dalu	75	16	35128	38
5xp1	7	10	2432	94
clip	9	5	4088	73
c8	28	18	2320	138
ttt2	24	21	4648	116
la1	26	19	2832	137
Среднее значение				58,15

## 2 Синтез монотонных схем

Организовать систему функционального контроля произвольной комбинационной схемы можно путем преобразования самой схемы в схему с независимыми либо монотонно независимыми выходами, а затем использовать для контроля код с возможностью обнаружения всех однонаправленных искажений [10, 11, 13, 18].

*Комбинационная схема называется монотонной* в том случае, если любая неисправность любого элемента ее внутренней структуры вызывает искажение только одного выхода или группы выходов с однонаправленными искажениями (только  $1 \rightarrow 0$  или только  $0 \rightarrow 1$ ).

В [18] показано, что произвольная комбинационная схема может быть преобразована в монотонную схему. Определено понятие немонотонного элемента в комбинационной схеме. Неисправность такого элемента вызывает противоположные искажения сигналов на различных выходах схемы (как  $1 \rightarrow 0$ , так и  $0 \rightarrow 1$ ). Кроме метода [18], можно использовать и другие способы получения монотонных схем, например, описанные в [10, 19]. Однако метод из [18] дает возможность получения схем с минимальной избыточностью.

Преобразование любой комбинационной схемы в монотонную схему производится следующим образом [18].

1. Определяется множество  $W$  немонотонных элементов.

2. Анализируются пути в схеме, ведущие от немонотонных элементов к выходам схемы. Если есть элемент на пути от немонотонного элемента к выходу, он также включается во множество  $W$ .

3. Каждый элемент  $y_i \in W$  дублируется: элемент  $y_i$  удаляется и заменяется двумя копиями  $y_i^0$  и  $y_i^1$ .

4. В полученной структуре входы и выходы элементов соединяются по следующим правилам:

- если в исходной схеме выход элемента  $y_i$  соединен со входом элемента  $y_j$  и соединение содержит четное число инверсий (при

этом учитываются инверсии выхода элемента  $y_i$  и входа элемента  $y_j$ ), то в преобразованной схеме соединяются элементы  $y_i$  и  $y_j$  с одинаковыми верхними индексами, в противном случае – с разными верхними индексами;

- если элемент  $y_i$  не был дублирован, то его выход соединяется с обеими копиями элемента  $y_j$ ;

- если выходной элемент  $y_i$  на своем выходе имеет инверсию, то соответствующий выход схемы соединяется с элементом  $y_i^1$ , в противном случае – с  $y_i^0$ ;

- все элементы, не связанные с выходами схемы, удаляются.

В работе [18] показано, что на практике сложность преобразованной схемы в среднем не увеличивается более чем на 16 % от сложности исходной схемы. Это значительно меньше, чем при организации контроля по методу дублирования (табл. 3). В табл. 3 представлены результаты экспериментов с 20 контрольными примерами MCNC Benchmark Circuits. Табл. 3 аналогична табл. 2, за исключением последнего столбца, где представлена дополнительная площадь в процентах от площади исходной комбинационной схемы.

Рассмотрим произвольную комбинационную схему (рис. 3). Ее логические элементы обозначены порядковыми номерами и реализуют произвольные функции алгебры логики (без привязки к конкретным логическим операциям). Монотонность схемы означает, что если в ней есть логический элемент, связанный с несколькими выходами, то все пути от него к каждому выходу содержат одинаковое по четности количество инверсий [18]. Исходя из этого, изображенная на рис. 3 комбинационная схема не является монотонной: в ней логический элемент № 2 связан со всеми четырьмя выходами, при этом пути к выходам  $z_1$  и  $z_2$  содержат нечетное количество инверсий, а пути к выходам  $z_3$  и  $z_4$  – четное.

ТАБЛИЦА 3. Сложность преобразованной схемы  $f(x)$ 

Название схемы	Число входов	Число выходов	Площадь	Дополнительная площадь преобразованной схемы $f(x)$ , %
cm138a	6	8	480	0
cmb	16	4	888	8
cu	14	11	1168	20
decod	5	16	744	0
ldd	9	19	2352	6
vda	17	39	19536	3
x2	10	7	1056	5
misex1	8	7	1448	5
misex2	25	18	2448	14
rd84	8	4	3128	20
bw	5	28	3064	63
term1	34	10	7944	6
z4m1	7	4	1192	22
alu2	10	6	7264	69
dalu	75	16	35128	47
5xp1	7	10	2432	2
clip	9	5	4088	5
c8	28	18	2320	0
ttt2	24	21	4648	9
la1	26	19	2832	9
Среднее значение				15,65

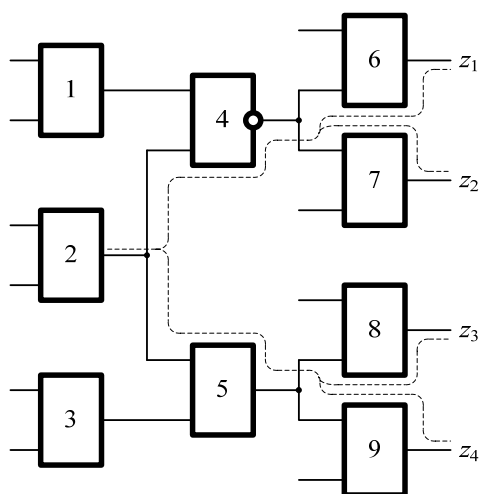


Рис. 3 Произвольная комбинационная схема

Преобразование схемы по приведенному алгоритму приводит к увеличению сложности самого контролируемого устройства. При организации системы функционального контроля гарантированно может быть применен известный код Бергера либо с учетом характеристик по обнаружению монотонных искажений – модульный код с суммированием. Так, уменьшение модуля и выбор его из множества  $M \in \{2, 4, \dots, 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil - 1}\}$  дают

возможность сократить число контрольных разрядов по сравнению с кодом Бергера, что снижает и сложность реализации всех компонентов контрольного оборудования системы диагностирования (блока контрольной логики  $g(x)$  и тестера).

### 3 Новый подход к синтезу монотонных схем

Используя модульные коды с суммированием можно строить более простые системы функционального контроля. Необходимо, однако, при этом учитывать монотонные искажения, которые появляются при подсчете по модулю  $M$  веса информационного вектора. Например, из табл. 1 видно, что кодовые векторы  $\langle 0000 \rangle$  и  $\langle 1111 \rangle$   $S_4(6, 4)$ -кода, различные по истинному весу, имеют одинаковый вес по модулю  $M = 4$ . Искажение кратности  $d = 4$  каждого из этих векторов приведет к возникновению необнаруживаемой ошибки. Эта ошибка будет монотонной.

**Утверждение 1.** Модульные коды с суммированием имеют однонаправленные необнаруживаемые ошибки только кратностей  $M, 2M, \dots, iM$  ( $iM \leq m$ ); однонаправлен-

ных необнаруживаемых ошибок других кратностей у модульных кодов нет.

Данное свойство объясняется тем, что при подсчете веса информационного вектора кода по модулю  $M$  все информационные слова с весами  $r, r+M, \dots, r+iM$  будут иметь одинаковые контрольные слова. Ошибка будет необнаруживаемой тогда и только тогда, когда информационный вектор с данным контрольным словом перейдет в информационный вектор с таким же контрольным словом. Переходы же между векторами с различным весом с одинаковыми контрольными словами будут входить, в том числе и в класс однонаправленных (монотонных). Пример монотонного перехода дан на рис. 2, б для  $S4(6, 4)$ -кода.

Определим условия применения модульных кодов с суммированием для контроля произвольных комбинационных схем до этапа преобразования их в монотонные схемы. Для этого введем следующую характеристику схемы:  $t_{\max}^{\alpha}$  ( $\alpha = 0$  или  $1$ ) – максимальное четное число выходов, связанных с одним логическим элементом при помощи путей с четным ( $\alpha = 0$ ) [нечетным ( $\alpha = 1$ )] числом инверсий. Из утверждения 1 и свойств монотонных схем можно заключить следующее.

**Утверждение 2.** В любой монотонной схеме с  $m$  выходами все одиночные неисправности логических элементов обнаруживаются на основе применения модульного кода  $SM(n, m)$ , где  $M = 2^{\lceil \log_2 b \rceil}$  и  $n = m + \lceil \log_2 b \rceil$ , если

$$t_{\max}^{\alpha} < b. \quad (1)$$

Для рассматриваемой выше комбинационной схемы (рис. 3)  $t_{\max}^0 = 2$  и  $t_{\max}^1 = 2$ . Отсюда следует, что  $b = 3$  и контроль данной схемы целесообразно осуществлять по модульному коду  $S4(6, 4)$ , а не по коду Бергера  $S4(7, 4)$ .

Рассмотрим еще несколько примеров. Пусть, например, комбинационная схема имеет  $m = 20$  выходов. Если в ней  $t_{\max}^{\alpha} = 0$ , то для организации ее функционального контроля наилучшее решение дает применение  $S2(21, 20)$ -кода; если  $t_{\max}^{\alpha} = 3$ , то  $S4(22, 20)$ -кода; если  $t_{\max}^{\alpha} = 7$ , то  $S8(23, 20)$ -кода, если

$t_{\max}^{\alpha} = 15$ , то  $S16(24, 20)$ -кода, и если  $t_{\max}^{\alpha} \geq 16$ , необходимо брать код Бергера.

**Утверждение 3.** Если  $t_{\max}^{\alpha} = M$ , то контроль монотонной схемы может быть организован по коду  $SM'(n, m)$ , где  $M'$  – ближайший модуль счета, больший, чем значение модуля  $M$  ( $M' = 2^{\lceil \log_2 M + 1 \rceil}$ ).

В табл. 4 приводятся диапазоны значений  $t_{\max}^{\alpha}$  и наилучший вариант кодирования в этом случае.

ТАБЛИЦА 4. Наилучшие коды для монотонных схем

$t_{\max}^{\alpha}$	Код
0,1	$S2(n, m)$
2,3	$S4(n, m)$
4...7	$S8(n, m)$
8...15	$S16(n, m)$
16...31	$S32(n, m)$
$2^{\lceil \log_2(t_{\max}^{\alpha} + 1) \rceil - 1} \dots 2^{\lceil \log_2(t_{\max}^{\alpha} + 1) \rceil} - 1$	$S2^{\lceil \log_2(t_{\max}^{\alpha} + 1) \rceil}(n, m)$

#### 4 Свойства модульных кодов с суммированием

В [16, 17] установлены некоторые свойства по обнаружению ошибок  $SM(n, m)$ -кодами, однако они определяют только общее количество кратных необнаруживаемых искажений. Рассмотрим свойства модульных кодов с суммированием по обнаружению монотонных искажений в информационных разрядах.

С использованием специально разработанного программного обеспечения были рассчитаны числа необнаруживаемых однонаправленных искажений в информационных векторах  $SM(n, m)$ -кодов с параметрами  $M = 2, 4, 8, 16$  и  $m = 2 \dots 20$ , а затем и величины  $\nu$ , характеризующие долю числа однонаправленных необнаруживаемых ошибок от общего количества необнаруживаемых ошибок для каждого кода (табл. 5).

Табл. 5 дополняется графиками зависимостей  $\nu$  от  $m$  для различных  $SM(n, m)$ -кодов (рис. 4). По данным графикам можно определить тенденции изменения значений  $\nu$  при изменении длин информационных векторов различных модульных кодов с суммированием. Отметим, что у всех модульных кодов

при  $m < M$  нет однонаправленных необнаруживаемых ошибок.

Для  $S2(n, m)$ -кодов (кодов паритета) характерно монотонное уменьшение значения  $v$  от величины 0,5 до 0 с увеличением  $m$ . При этом, к примеру, доля однонаправленных ошибок в классе необнаруживаемых ошибок информационных векторов у кода  $S2(11, 10)$  составляет 10,9 %, а у кода  $S2(21, 20)$  – всего 0,6 %.

ТАБЛИЦА 5. Значения величин  $v$  в зависимости от  $m$

$m$	$v$			
	$S2(n, m)$	$S4(n, m)$	$S8(n, m)$	$S16(n, m)$
2	0,5	0	0	0
3	0,5	0	0	0
4	0,446429	0,035714	0	0
5	0,375	0,083333	0	0
6	0,303427	0,120968	0	0
7	0,239583	0,138889	0	0
8	0,186085	0,137918	0,000159	0
9	0,142923	0,124081	0,000748	0
10	0,108935	0,104116	0,001955	0
11	0,082598	0,083165	0,003737	0
12	0,062407	0,064233	0,005821	0
13	0,047038	0,048565	0,007827	0
14	0,035396	0,036291	0,009409	0
15	0,026606	0,026994	0,010351	0
16	0,019985	0,020077	0,010593	$3,3277 \cdot 10^{-9}$
17	0,015004	0,014967	0,010209	$2,91411 \cdot 10^{-8}$
18	0,01126	0,011191	0,009351	$1,34878 \cdot 10^{-7}$
19	0,008449	0,008389	0,008201	$4,38651 \cdot 10^{-7}$
20	0,006339	0,0063	0,006926	$1,12474 \cdot 10^{-6}$

У модульных кодов с суммированием с  $M \geq 4$  характер изменения  $v$  другой: с увеличением длины информационного вектора от значения  $m = M$  величина  $v$  сначала увеличивается, достигая некоторого максимума, а затем уменьшается до нуля. Например, для  $S4(n, m)$ -кодов максимум достигается при  $m = 7$ , а для  $S8(n, m)$ -кодов – при  $m = 16$  (см. рис. 4). С увеличением значения  $M$  максимум доли однонаправленных ошибок в классе необнаруживаемых смещается в сторону увеличения длины информационного вектора и уменьшается по величине. Так, для  $S8(n, m)$ -кодов максимум  $v$  в 13,11 раза меньше соответствующей величины для  $S4(n, m)$ -кодов.

В табл. 6 приводятся рассчитанные характеристики  $S2(n, m)$ -кодов. Коды  $S2(n, m)$  не обнаруживаются однонаправленные искажения всех четных кратностей  $d = 2, 4, \dots, iM$  (здесь  $i = 1, 2, \dots$  и  $i \leq m$ ). В столбцах  $N_v$  и  $N$  приведены соответственно числа необнаруживаемых однонаправленных искажений в информационных разрядах и общее количество необнаруживаемых ошибок в информационных разрядах. В графе  $v$  записана доля однонаправленных ошибок от общего их количества в классе необнаруживаемых при данной длине информационного вектора  $m$ .

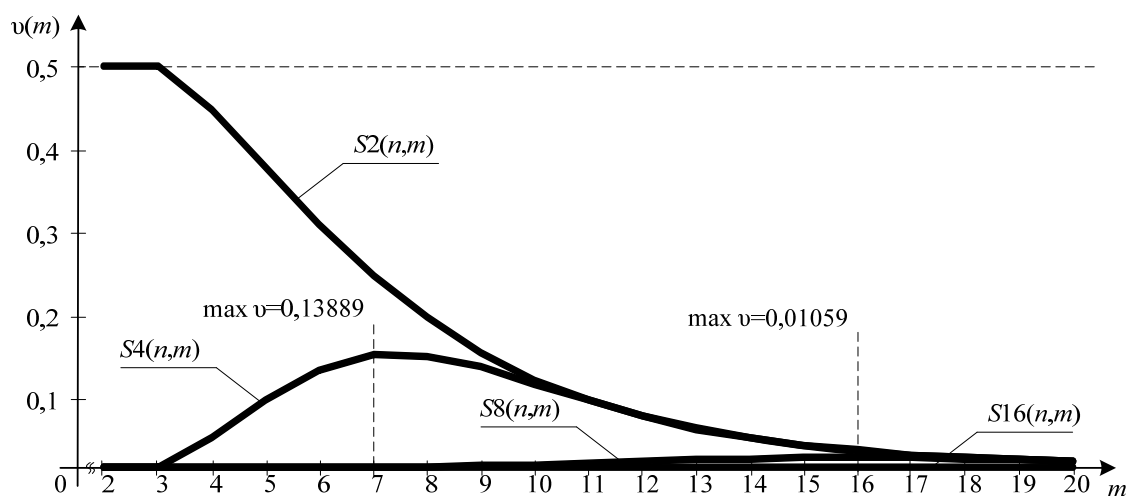


Рис. 4 Зависимость  $v$  от значения  $m$  для различных модульных кодов

ТАБЛИЦА 6. Распределение однонаправленных необнаруживаемых ошибок в кодах  $S2(n, m)$ 

$m$	Число необнаруживаемых однонаправленных ошибок кратности $d$										$N_0$	$N$	$\nu$
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20			
2	2										2	4	0,5
3	12										12	24	0,5
4	48	2									50	112	0,4464
5	160	20									180	480	0,375
6	480	120	2								602	1984	0,3034
7	1344	560	28								1932	8064	0,2396
8	3584	2240	224	2							6050	32512	0,1861
9	9216	8064	1344	36							18660	130560	0,1429
10	23040	26880	6720	360	2						57002	523264	0,1089
11	56320	84480	29568	2640	44						173052	2095104	0,0826
12	135168	253440	118272	15840	528	2					523250	8384512	0,0624
13	319488	732160	439296	82368	4576	52					1577940	33546240	0,047
14	745472	2050048	1537536	384384	32032	728	2				4750202	134201344	0,0354
15	1720320	5591040	5125120	1647360	192192	7280	60				14283372	536838144	0,0266
16	3932160	14909440	16400384	6589440	1025024	58240	960	2			42915650	2147418112	0,02
17	8912896	38993920	50692096	24893440	4978688	396032	10880	68			128878020	8589803520	0,015
18	20054016	100270080	152076288	89616384	22404096	2376192	97920	1224	2		386896202	34359476224	0,0113
19	44826624	254017536	444530688	309583872	94595072	12899328	744192	15504	76		1161212892	137438429184	0,0084
20	99614720	635043840	1270087680	1031946240	378380288	64496640	4961280	155040	1520	2	3484687250	549754765312	0,0063



Подобные таблицы были составлены для модульных кодов с суммированием с  $M = 2, 4, 8, 16$ . Анализ характеристических таблиц позволил установить некоторые свойства модульных кодов, которые могут быть полезными при синтезе контролепригодных систем.

**Свойство 1.** Коды, у которых длина информационного вектора кратна модулю счета, имеют две необнаруживаемые однонаправленные ошибки максимальной кратности  $m$ .

Это свойство объясняется тем, что при  $m = M$  только два вектора с различным весом оказываются в одной контрольной группе – это векторы, состоящие только из нулей, и векторы, состоящие только из единиц. Для кода  $S4(6, 4)$  это векторы  $\langle 0000 \rangle$  и  $\langle 1111 \rangle$ . Взаимные переходы друг в друга для данных векторов – это и есть однонаправленные искажения кратности  $m$ . Таких переходов два.

**Свойство 2.** Модульные коды с суммированием имеют одинаковое количество необнаруживаемых однонаправленных ошибок данной кратности при одинаковом числе информационных разрядов для любого  $M$ .

Из этого свойства следует, что если из табл. 6 удалить столбцы  $d = 2, 6, 10, 14, 18$  то получим характеристическую таблицу для  $S4(n, m)$ -кодов, поэтому достаточно иметь подобную таблицу лишь для кодов с модулем  $M = 2$ . Из нее можно получить все характеристические таблицы и для других модульных кодов.

Интересным является следующее свойство.

**Свойство 3.** Доля однонаправленных необнаруживаемых ошибок в информационных разрядах кратности  $d$  от общего числа необнаруживаемых ошибок данной кратности не зависит от числа информационных разрядов и является постоянной величиной при любом значении  $M$ .

Значения долей монотонных необнаруживаемых ошибок в информационных разрядах кратности  $d$  от общего числа необнаруживаемых ошибок данной кратности (обозначим их  $v_d$ ) приведены в табл. 7.

Можно заметить, что значения величин  $v_d$  для модульных кодов с суммированием с  $M = 2$  и  $M = 4$  с увеличением кратности необнаруживаемой ошибки образуют последовательность убывающих по одному и тому же закону чисел (табл. 8).

ТАБЛИЦА 7. Значения величин  $v_d$ 

Код	Доли монотонных необнаруживаемых ошибок от общего числа необнаруживаемых ошибок									
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$S2(n, m)$	0,5	0,125	0,03125	0,007813	0,001953	0,000488	0,000122	$3,05 \cdot 10^{-5}$	$7,63 \cdot 10^{-6}$	$1,91 \cdot 10^{-6}$
$S4(n, m)$	0	0,25	0	0,015625	0	0,000977	0	$6,1 \cdot 10^{-5}$	0	$3,81 \cdot 10^{-6}$
$S8(n, m)$	0	0	0	0,027778	0	0	0	0,000121	0	0
$S16(n, m)$	0	0	0	0	0	0	0	0,000155	0	0

ТАБЛИЦА 8. Последовательности величин  $v_d$  для  $S2(n, m)$  и  $S4(n, m)$  кодов

$M = 2$				$M = 4$			
$j$	$d$	$v_d$		$j$	$d$	$v_d$	
0	2	$2^{-1}$	0,5	0	4	$2^{-2}$	0,25
1	4	$2^{-3}$	0,125	1	8	$2^{-6}$	0,015625
2	6	$2^{-5}$	0,03125	2	12	$2^{-10}$	0,000977
3	8	$2^{-7}$	0,007813	3	16	$2^{-14}$	$6,1 \cdot 10^{-5}$
4	10	$2^{-9}$	0,001953	4	20	$2^{-18}$	$3,81 \cdot 10^{-6}$
5	12	$2^{-11}$	0,000488				
6	14	$2^{-13}$	0,000122				
7	16	$2^{-15}$	$3,05 \cdot 10^{-5}$				
8	18	$2^{-17}$	$7,63 \cdot 10^{-6}$				
9	20	$2^{-19}$	$1,91 \cdot 10^{-6}$				
$v_d = 2^{-1-jM}$				$v_d = 2^{-2-jM}$			

Рассмотрим выражения, характеризующие величины  $v_d$  для  $S2(n, m)$  и  $S4(n, m)$  кодов. Для  $S2(n, m)$ -кодов  $v_d = 2^{-1-jM} = \frac{1}{2 \cdot 2^{jM}}$ ,

а для  $S4(n, m)$ -кодов  $v_d = 2^{-2-jM} = \frac{1}{4 \cdot 2^{jM}}$ .

Заметим также, что величина  $j = 0, 1, \dots$ , являющаяся порядковым номером существующих кратностей необнаруживаемых однонаправленных ошибок в модульных кодах, зависит от кратности ошибки и модуля счета:  $j = \frac{d}{M} - 1$ , здесь  $d$  – величина, кратная модулю. Отсюда следует, что по формуле (2) можно подсчитать значения величины  $v_d$  для  $S2(n, m)$  и  $S4(n, m)$  кодов:

$$\begin{aligned} v_d &= \frac{1}{2^{jM} \cdot M} = 2^{-jM} M^{-1} = \\ &= 2^{-M\left(\frac{d}{M}-1\right)} M^{-1} = \frac{2^{M-d}}{M}. \end{aligned} \quad (2)$$

Подсчитаем по этой формуле долю однонаправленных ошибок кратности  $d = 16$  в классе необнаруживаемых у  $S4(18, 16)$ -кода:

$$v_d = \frac{2^{M-d}}{M} = \frac{2^{4-16}}{4} = 2^{-14} = 6,1 \cdot 10^{-5}.$$

Свойство 3, по всей видимости, связано со свойством постоянства доли необнаруживаемых ошибок информационных разрядов кратности  $d$  от общего числа ошибок этой же кратности в информационных разрядах для модульных кодов с суммированием [16, 17]. Данную величину обозначим  $\beta_d$ , ее значения для различных кодов с суммированием приводятся в табл. 9.

Аналогичной особенностью обладают и классические коды с суммированием, что доказано в работе [20]. Там же определено и выражение, характеризующее долю необнаруживаемых ошибок кратности  $d$  от общего числа ошибок данной кратности:

$$\beta_d = 2^{-d} C_d^{\frac{d}{2}}. \quad (3)$$

Из формулы (3) следует, что величина  $\beta_d$  не зависит от длины информационного вектора и одинакова для любого кода Бергера. Также можно отметить тот факт, что значение величины  $\beta_d$  для  $SM(n, m)$ -кодов совпадает со значением этой же величины для классических  $S(n, m)$ -кодов при  $d < M$  [16, 17].

Сравнивая табл. 7 и табл. 9, можно получить долю однонаправленных необнаруживаемых ошибок от общего числа ошибок в информационных векторах модульных кодов.

ТАБЛИЦА 9. Значения характеристики  $\beta_d$

Код	Доля необнаруживаемых ошибок кратности $d$ от общего числа ошибок той же кратности							
	2	4	6	8	10	12	14	16
$S(n, m)$	0,5	0,375	0,3125	0,27344	0,24609	0,22559	0,20947	0,19638
$S16(n, m)$	0,5	0,375	0,3125	0,27344	0,24609	0,22559	0,20947	0,19641
$S8(n, m)$	0,5	0,375	0,3125	0,28125	0,26563	0,25781	0,25391	0,25195
$S4(n, m)$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
$S2(n, m)$	1	1	1	1	1	1	1	1

## 5 Характеристики тестеров модульных кодов с суммированием

Покажем эффект от сокращения сложности системы функционального контроля на упрощении структуры тестера в сравнении с тестером кода Бергера (см. рис. 1).

Тестер любого кода с суммированием строится по структуре, содержащей блок генератора контрольных разрядов и блок компаратора (рис. 5) [5]. Генератор по значени-

ям выходов блока основной логики вычисляет контрольные разряды  $g'_1, g'_2, \dots, g'_k$ , а компаратор сравнивает сформированные разряды  $g'_i$  с одноименными разрядами, сформированными блоком контрольной логики  $g(x)$ . При этом контрольные разряды от блока контрольной логики предварительно инвертируются. Таким образом, компаратор осуществляет сравнение одноименных паразитных сигналов. В случае соответствия

сигналов –  $g_i(x) = \overline{g_i(x)}$  на выходах компаратора формируется парафазный сигнал  $\langle 01 \rangle$  либо  $\langle 10 \rangle$ . Любой дефект внутренней структуры тестера нарушает парафазность выходов.

Генераторы тестеров кодов с суммированием строятся с использованием стандартных функциональных модулей: полного сумматора ( $FA$ ), полусумматора ( $HA$ ) и сумматора по модулю два ( $XOR$ ) [5, 7, 21, 22]. На рис. 6 приведены примеры генераторов  $S(7,4)$ ,  $S4(6,4)$  и  $S2(5,4)$  кодов.

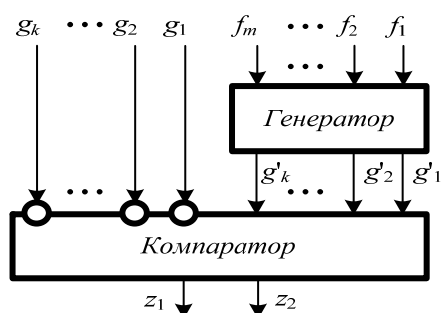


Рис. 5 Структура тестера кода с суммированием

Компараторы строятся на базе стандартных модулей сжатия парафазных сигналов – блоков  $TRC$  (*two-rail checker*) [3, 5]. Число таких модулей в схеме тестера зависит от

числа контрольных разрядов выбранного варианта кодирования и равно величине  $k - 1$ . Например, для  $S(7,4)$ -кода потребуется 2 модуля  $TRC$ .

Сложность технической реализации схем оценивается числом входов логических элементов без учета инверсий на входах, и для рассмотренных нами функциональных блоков равна [5]:  $L_{FA} = 21$ ,  $L_{HA} = 8$ ,  $L_{XOR} = 6$ ,  $L_{TRC} = 12$ . Учитывая это, генераторы, приведенные на рис. 7, имеют значения сложности  $L_{S(7,4)} = 45$ ,  $L_{S4(6,4)} = 36$ ,  $L_{S2(5,4)} = 18$ , а компараторы соответственно –  $L_{S(7,4)} = 24$ ,  $L_{S4(6,4)} = 12$ ,  $L_{S2(5,4)} = 0$ . Видно, что уменьшение значения  $M$  снижает сложность технической реализации как блоков генераторов, так и блоков компараторов. В итоге, как следствие, уменьшается и сложность тестера в целом. В табл. 10–12 приводятся значения сложности тестеров различных кодов с суммированием. В каждой таблице в нижней строке представлена величина  $\delta$  – отношение значения сложности тестера  $S(n, m)$ -кода и сложности тестера  $SM(n, m)$ -кода при данном значении числа выходов комбинационной схемы. По значению  $\delta$  можно определить, во сколько раз эффективнее применение модульного кода по сравнению с кодом Бергера.

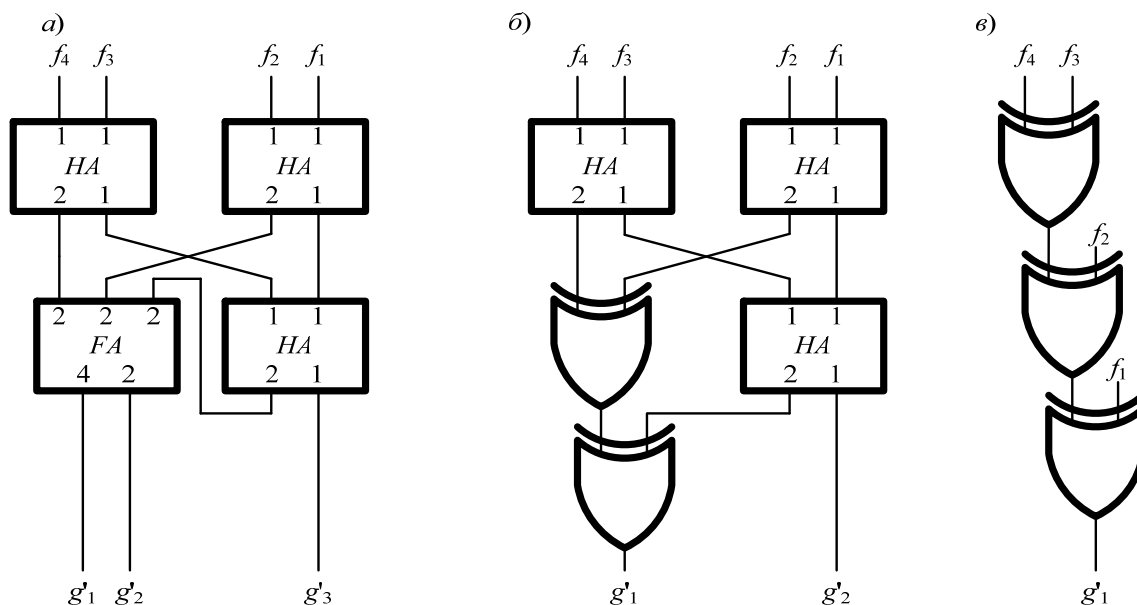


Рис. 6. Структурные схемы генераторов для кодов с суммированием с  $m = 4$  информационными разрядами:  
а – для  $S(7, 4)$ -кода; б –  $S4(6, 4)$ -кода; в –  $S2(5, 4)$ -кода

ТАБЛИЦА 10. Сравнение характеристик сложности для тестеров  $S(n, m)$  и  $S8(n, m)$  кодов

$m$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$LS(n, m)$	20	33	69	82	95	120	176	189	202	215	228	258	271	284	352	365	378	391	404
$LS8(n, m)$	20	33	69	82	95	120	155	168	181	194	207	237	250	263	303	316	329	342	355
$\delta$	1	1	1	1	1	1	1,14	1,13	1,12	1,11	1,1	1,09	1,08	1,08	1,16	1,16	1,15	1,14	1,14

ТАБЛИЦА 11. Сравнение характеристик сложности для тестеров  $S(n, m)$  и  $S4(n, m)$  кодов

$m$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$LS(n, m)$	20	33	69	82	95	120	176	189	202	215	228	258	271	284	352	365	378	391	404
$LS4(n, m)$	20	33	48	61	74	87	104	117	130	143	156	167	180	193	222	235	248	261	274
$\delta$	1	1	1,44	1,34	1,28	1,38	1,69	1,62	1,55	1,5	1,46	1,54	1,51	1,47	1,59	1,55	1,52	1,5	1,47

ТАБЛИЦА 12. Сравнение характеристик сложности для тестеров  $S(n, m)$  и  $S2(n, m)$  кодов

$m$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$LS(n, m)$	20	33	69	82	95	120	176	189	202	215	228	258	271	284	352	365	378	391	404
$LS2(n, m)$	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84	90	96	102	108	114
$\delta$	3,33	2,75	3,83	3,42	3,17	3,33	4,19	3,94	3,74	3,58	3,45	3,58	3,47	3,38	3,91	3,8	3,71	3,62	3,54

## 6 Заключение

Зная свойства модульных кодов с суммированием по обнаружению монотонных ошибок в информационных векторах и учитывая свойства контролируемой комбинационной схемы, можно строить системы функционального контроля с уменьшенной сложностью контрольного оборудования по сравнению с системами, построенными методом [18] и методом дублирования.

## Библиографический список

1. Nicolaidis M., Zorian Y. On-line Testing for VLSI – A Compendium of Approaches // Journal of Electronic Testing: Theory and Applications. – № 12. – 1998. – Pp. 7–20.
2. Touba N. A., McCluskey E. J. Logic Synthesis of Multilevel Circuits with Concurrent Error Detection // IEEE Trans. Computer-Aided Design of Integrated Circuits and System, Vol. 16, Jul. 1997, pp. 783–789.
3. Lala P. K. Self-Checking and Fault-Tolerant Digital Design. – San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2001. – 216 p.
4. Ryan W. E., Shu Lin Channel Codes: Classical and Modern. – Cambridge University Press, 2009. – 708 p.
5. Сапожников, В. В. Самопроверяемые дискретные устройства / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – Санкт-Петербург : Энергоатомиздат, 1992. – 224 с. – ISBN 5-283-04605-2.
6. Kastensmidt F. L., Carro L., Reis R. Fault-Tolerance Techniques for SRAM-based FPGAs. – Dordrecht: Springer, 2006. – 183 p.
7. Fujiwara E. Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications. – John Wiley & Sons, 2006. – 720 p.
8. Das D., Touba N. A. Weight-Based Codes and their Application to concurrent error detection of multilevel circuits // Proc. 17<sup>th</sup> IEEE Test Symposium, California, USA, 1999, pp. 370–376.
9. Berger J. M. A note on error detection codes for asymmetric channels // Information and Control. – 1961. – Vol. 4. – Issue 1. – Pp. 68–73.
10. Согомонян, Е. С. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомонян., Е. В. Слабаков. – Москва : Радио и связь, 1989. – 208 с. – ISBN 5-256-00308-9.
11. Self-Checking Combinational Circuits with Unidirectionally Independent Outputs / A. Morosow, V. V. Saposhnikov, Vl. V. Saposhnikov, M. Goessel // VLSI Design. – 1998. – V. 5. – Issue 4. – Pp. 333–345.
12. SIS: A System for Sequential Circuit Synthesis / E. M. Sentovich, K. J. Singh, L. Lavagno, C. Moon, R. Murgai, A. Saldanha, H. Savoj, P. R. Stephan, R. K. Brayton, and A. L. Sangiovanni-Vincentelli // EECS Department University of California, Berkeley Technical Report No. UCB/ERL M92/41, 1992. – 52 p.
13. Design of Self-Checking Unidirectional Combinational Circuits with Low Area Overhead / V. V. Saposhnikov, Vl. V. Saposhnikov, A. Morosov, M. Goessel // Proceedings of 2nd IEEE Interna-

tional On-line Testing Workshop (IOLTW), Biarritz, France, 1996. – Pp. 56–67.

14. *A New Design Method for Self-Checking Unidirectional Combinational Circuits* / Saposhnikov V. V., Morosov A., Saposhnikov V. V., Gössel M. // *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*. – 1998. – V. 12. – Issue 1–2 (February/April). – Pp. 41–53.

15. *Bose B., Lin D. J. Systematic Unidirectional Error-detection Codes* // *IEEE Trans. Comput.* – V. C-34, Nov. 1985. – Pp. 1026–1032.

16. *Properties of code with summation for logical circuit test organization* / A. Blyudov, D. Efanov, V. Sapozhnikov, V. Sapozhnikov // *Proc. of 10<sup>th</sup> IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2012)*, Kharkov, Ukraine, September 14–17, 2012. – Pp. 114–117.

17. *Коды с суммированием для организации контроля комбинационных схем* / А. А. Блюдов, Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // *Автоматика и телемеханика*. – 2013. – № 6. – С. 153–164.

18. *Метод построения комбинационных самопроверяемых устройств с обнаружением всех*

одиночных неисправностей / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, М. Гессель, А. А. Морозов // *Электронное моделирование*. – 1998. – Т. 20. – № 6. – С. 70–80.

19. *Матросова, А. Ю.* Обнаружение несущественных путей логических схем на основе совместного анализа И-ИЛИ деревьев и SSBDD-графов / А. Ю. Матросова, С. А. Останин, В. Сингх // *Автоматика и телемеханика*. – 2013. – № 7. – С. 126–142.

20. *Ефанов, Д. В.* О свойствах кода с суммированием в схемах функционального контроля / Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // *Автоматика и телемеханика*. – 2010. – № 6. – С. 155–162.

21. *Marouf M. A., Friedman A. D.* Design of Self-Checking Checkers for Berger Codes // *Proc. of 8th Annual International Conference on Fault-Tolerant Computing*, Toulouse, 1978. – V. C-27. – Pp. 179–183.

22. *Piestrak S. J.* Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes / Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995. – 111 p. – ISSN 0324-9786.

## Из истории развития железнодорожной автоматики

УДК 656.257

### Централизация стрелок и сигналов

Н. В. Лупал (из наследия автора)

Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта

Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»

**Аннотация.** Приводятся фрагменты рукописи Николая Васильевича Лупала 50-х годов XX века «Развитие устройств сигнализации, централизации и блокировки на железных дорогах России». Опубликовано восьмая глава монографии «Централизация стрелок и сигналов».

**Ключевые слова:** централизация стрелок и сигналов; семафор; стрелка; замыкающий аппарат; трубчатые тяги; стрелочные и сигнальные рычаги.

В 1870 г. на Петербурго-Московской железной дороге, принадлежавшей в это время «Главному обществу» и называвшейся «Николаевской», вводятся первые централизационные установки. Такие установки производились по инициативе И. Ф. Кенига. И. Ф. Кениг окончил в 1843 г. Институт инженеров путей сообщения. Работал на Петербурго-Московской железной дороге до 1863 г., затем до 1868 г. на Московско-Нижегородской, после чего вновь на Петербурго-Московской, где приложил много труда к техническому оснащению дороги.

В связи с введением централизации стрелок и сигналов на станциях дороги появляются «дальние» двухсторонние двукрылые и четырехкрылые семафоры. На станциях семафоры давали два показания: «стой» – крыло горизонтально, ночью – красный огонь и «тихо» – крыло опущено вдоль мачты, ночью – зеленый огонь. «Дальние» семафоры устанавливались на расстоянии 250 саженей (530 м) от пассажирской платформы и имели двойное управление – как с пассажирской платформы, так и из «сигнальных домиков» (постов). Управление осуществлялось одиночным проводом, проходящем по роли-

кам на опорах, установленных через 30' (10 метров)<sup>1</sup>.

На поворотах проволока заменялась цепями, подтянутые переходы осуществлялись в деревянных трубах. Станционные семафоры управлялись из замыкающих аппаратов, установленных в сигнальных домиках. На так называемых полустанциях устанавливался один двукрылый двухсторонний семафор, управляемый из помещения телеграфа. Стрелки переводились из замыкающих аппаратов жесткими трубчатыми тягами, причем никаких замыкателей на стрелках не имелось. Стрелочные и сигнальные рычаги связывались между собою в замыкающих аппаратах. Число управляемых объектов колебалось в зависимости от типа станции. Так, на станции Санкт-Петербург имелось 10 централизованных стрелок. На станциях II класса из замыкающего аппарата производилось управление четырьмя стрелками и тремя семафорами: дальним входным «А» и двухсторонними двукрылыми «В».

Введение централизации стрелок и сигналов на Николаевской дороге не только повысило безопасность движения, но и дало экономию в штате.

Однако устройства централизации первое десятилетие развивались медленно. К 1880 г., кроме оборудованных станций Николаевской дороги, централизованные установки имелись на сортировочной станции Москва Московско-Рязанской дороги и соединительной ветви с Николаевской дорогой, на станциях Рязск, Санкт-Петербург Балтийский, Брест.

<sup>1</sup> 1' = 1 фут = 304,8 мм.

Везде была применена механическая централизация с жесткой передачей. В 70-х годах XIX в. русские изобретатели вносят ряд предложений, направленных на повышение безопасности движения поездов, ведется борьба за внедрение отечественных систем и приборов. Значительный рост железнодорожной сети в 1865–1875 гг. не сопровождался введением достаточно высокой техники устройств СЦБ.

Как видно из вышеизложенного, сигнализация не является унифицированной. Что же касается устройств централизации и блокировки, то они имелись в весьма ограниченном количестве. Частные акционерные общества стремились строить новые железные дороги, подешевле и поскорее, необходимость иметь специальные устройства для обеспечения безопасности движения еще не была осознана. В результате на железных дорогах происходили аварии и крушения, иногда весьма значительные. Аварии происходили как вследствие неудовлетворительного состояния всего сигнального дела в целом, так и из-за несоответствия скоростей движения состоянию пути.

В докладе на I совещательном съезде инженеров службы пути М. В. Рутковский проанализировал причины аварий на русских железных дорогах за 1877–1878 гг.; из-за недостатков сигнализации произошло 12,5 % случаев аварий; из-за отсутствия централизации стрелок и сигналов – 16 %; из-за отсутствия блокировки и недостатков способов регулирования движения – 2,5 %. Таким образом, несовершенство устройств сигнализации, централизации и блокировки стало в эти годы причиной до 31 % аварий поездов.

Рутковский указывал на необходимость широкого применения централизации и блокировки на русских железных дорогах. Он говорил: «Я думаю, что с введения в более обширных размерах электромагнитных двигателей большой силы возможно будет сосредоточить все маневры в одном центре, может быть, удастся устройство прибора, посредством которого проходящие к станции по известным путям поезда автоматически (замыканием гальванических токов) будут открывать соответственные сигналы, если состояние других сигналов и путей позволя-

ет это сделать в данную минуту. Роль этих людей, которым в настоящее время поручаются маневры, ограничится лишь разумным надзором над действием этих машин, так как действие и самых совершенных машин невозможно без подобного контроля».

Однако по вопросу введения централизации стрелок и сигналов упомянутый съезд вынес весьма осторожное решение. Съезд отметил, что при введении централизации: «а) теоретически безопасность движения весьма сильно гарантируется; б) с технической стороны удобоисполнима, но ввиду новизны и недостаточности опыта трудно решить вопрос о желательности широкого применения...».

Несколько иным было отношение технической общественности к ведению устройств для обеспечения безопасности следования поездов. Так, на съезде членов Русского технического общества, состоявшемся в 1882 г. в Москве, было принято следующее постановление: «Ввиду новости дела блокирования пути и устройства замыкающих аппаратов на русских железных дорогах, а также ввиду доказанной пользы от этих устройств, включить этот вопрос в число вопросов, разработкой которых отделения общества должны преимущественно заниматься».

Первые централизационные установки были импортные и весьма несовершенные, в основном, они являлись устройствами лишь центрального управления, не обеспечивающими полностью безопасности движения поездов.

Царское правительство не доверяло отечественной технике и вместо покровительства русским изобретателям предпочитало пользоваться иностранными устройствами. Среди многих русских железнодорожных деятелей преобладало недоверчивое отношение к устройствам централизации стрелок и сигналов, как видно из цитированного выше решения Первого совещательного съезда инженеров службы пути по докладу Рутковского. Несмотря на указанные обстоятельства, русские техники весьма много внесли в развитие централизации стрелок и сигналов.

В ввозимых из-за границы устройствах механической централизации с жесткой передачей или совсем не применялись замыка-

тели для стрелок, или их употребляли лишь для стрелок противошерстных.

При наличии стрелочных замыкателей последние управлялись отдельными рычагами, и таким образом для стрелки требовалось в аппарате устанавливать два рычага – один для перевода стрелки и второй для ее замыкания. Это влекло необходимость нескольких манипуляций рычагами при переводе стрелки. Замыкатели устанавливались неврезные, ломавшиеся при врезе стрелки.

Централизационные аппараты были весьма громоздки. Замыкание враждебных рычагов в аппаратах происходило не с момента начала перевода рычага, а лишь после его полного перевода. Маршрутные рычаги или рукоятки отсутствовали, поэтому при постановке сигнального рычага в положение, отвечающее закрытому семафору, освобождались стрелочные рычаги, что позволило производить преждевременную разделку маршрута и перевод стрелок под движущимся составом. Централизация подобного типа (*Saxby & Farmer*) с поощрения министерства путей сообщения довольно широко внедрялась на наших дорогах в 80-е и 90-е годы.

В начале 80-х годов XIX в. появляется ряд предложений русских техников и изобретателей Л. Д. Вурцеля и Я. Н. Гордеенко, разработавших конструкции приборов механической централизации стрелок и сигналов, которые были значительно лучше зарубежных.

Лев Давыдович Вурцель родился в 1847 г., по национальности русский. В мае 1874 г. окончил Институт инженеров путей сообщения. В этом же году был назначен помощником инспектора Рязано-Вяземской железной дороги, а с 1879 г. – участковым инспектором железных дорог Привислинского края. В 1893 г. переходит на работу в заводскую инспекцию министерства.

В системе Л. Д. Вурцеля применялись неврезные замыкатели оригинальной конструкции. К сплошной полосе, соединявшей оба рамных рельса, прикреплялись две горизонтальные оси с насаженными на них роликами. Вторая полоса связывала между собой острия стрелки. На этой полосе имела ось, на которой мог поворачиваться рычаг, соединенный с переводной тягой. В начале

движения последней цилиндрическая часть рычага перемещалась по правому ролику, размыкая стрелку. Затем рычаг ложился поверхностью на оба ролика. Ось, несколько поднимаясь вверх, переводила острия. К концу перемещения острия поверхность рычага сходила с левого ролика, а цилиндрическая часть начинала заходить за ролик, замыкая стрелку.

Такая конструкция имела целью парализовать влияние колебаний температуры на длину жесткой передачи, а также исключить возможность неточной работы шарниров на плотность прилегания к рамным рельсам.

Весьма много в развитии устройства механической централизации стрелок и сигналов сделал проф. Я. Н. Гордеенко.

Профессор Яков Николаевич Гордеенко родился 26 октября 1851 г., окончил Институт путей сообщения в 1874 г. По окончании института оставлен при нем репетитором. В 1882 г. был избран преподавателем по курсу железных дорог, а в 1885 г. – экстраординарным профессором. Им был написан ряд трудов, как например, «Курс железных дорог» и др. Некоторые его работы посвящены теоретическим вопросам централизации стрелок и сигналов. Сделал много изобретений в области блокировки и централизации, рассмотренных в настоящей главе. Вел большую общественную работу. После революции работал в научно-техническом комитете НКПС. Умер 29 марта 1922 г.

В 80-х годах XIX в. Гордеенко разработал первую отечественную систему механической централизации с жесткой трубчатой передачей. Большая заслуга проф. Гордеенко в том, что он добился постановки производства аппаратуры для разработанной им системы. Производство было осуществлено им сначала на заводе Генишева в Петербурге, а затем на заводе «Электромеханика» Глебова. Первые установки системы Гордеенко были произведены в 1885 г. на станции Саблино Санкт-Петербургской-Московской (Николаевской) железной дороги и на станции Кошедары Петербурго-Варшавской дороги. Система централизации проф. Гордеенко получила премию на Всероссийской нижегородской выставке в 1896 г. и на Всемирной парижской выставке в 1900 г. На всероссий-



ской выставке в 1896 г. в Нижнем Новгороде в железнодорожном павильоне демонстрировались приборы для обеспечения безопасности движения поездов на железных дорогах, например, приборы К. А. Кайля, Л. Д. Вурцеля, Я. Н. Гордеенко и др. Системе механической централизации проф. Гордеенко приходилось выдерживать конкуренцию с системами зарубежных фирм, получившими ранее распространение на русских железных дорогах и поддерживаемыми официальными органами министерства путей сообщения.

Проф. Я. Н. Гордеенко первый в России теоретически рассмотрел условия работы централизационных установок. Основными требованиями к централизации стрелок и сигналов Я. Н. Гордеенко считал:

а) возможность устраивать любые замыкания рычагов;

б) чувствительность рычагов при неполном переводе стрелок и сигналов. В своем труде «Заметки о замыкающих аппаратах» Я. Н. Гордеенко рассматривает вопросы обеспечения стрелочными замыкателями полного перевода и закрепления острых, возможность допущения двойной проволочной передачи, последствия взреза стрелки. Он указывал, что необходимо устанавливать замыкатели, при которых рычаг более чувствителен к недоходу стрелки. На основании подробного расчета жесткой передачи (жесткой) и при теоретически мертвом ходе замыкателя в 2 дюйма (50 мм) чувствительность стрелочных рычагов можно считать обеспеченной, если длина передачи не превосходит 150 сажен (320 м). Однако при отсутствии поворотов в вертикальной плоскости длина передачи, по мнению Я. Н. Гордеенко, может быть увеличена до 225 сажен (180 м).

Для управления семафорами Я. Н. Гордеенко считал обязательным применение проволочной передачи. Анализируя и рассчитывая двойную проволочную передачу для стрелок, он пришел к выводу, что она «позволяет устраивать передачи длиной до 800 м, что для жестких тяг немыслимо». Вместе с тем Я. Н. Гордеенко полагал, что со стороны прочности жесткая передача предпочтительнее. Централизационные аппараты системы жестких тяг Гордеенко применялись двух типов, так называемые будочные

для малых станций с двумя стрелочными и двумя сигнальными рычагами и башенные, устанавливаемые на постах. Башенные аппараты имели вертикальный ящик замыканий. При разработке своей системы проф. Гордеенко исходил из условий работы приборов в суровом климате, в связи с чем им были приняты большие ходы передачи. Особое внимание было обращено на прочность конструкций. Это ему удалось, доказательством чего служит многолетняя работа установок его системы, некоторые из них дожили до наших дней.

Замыкатель Гордеенко состоял из железной линейки с замыкающим роликом и фазового рычага, укрепленного на оси. Рычаг посредством тяги соединялся с остриями стрелки. Острия запирались вследствие упора правого плеча рычага на протяжении 2" (50 мм)<sup>1</sup>. Затем ролик давил на край выреза и поворачивал рычаг, что вызывало перемещение тяги. При полном переводе остриев рычаг оказывался повернутым так, что прямой срез левого его плеча становился параллелен линейке на 2" (50 мм) при общем ходе тяги 8,25" (212 мм). При недоходе пера стрелки на ¼" (6 мм) тяга не доходила на 2" (50 мм), а рычаг аппарата – на четверть своего хода. В замыкателе применена «разрезная штанга». Две полосы штанги наложены друг на друга и соединены болтиками. К верхней штанге прикреплен коробок, а в нижней штанге закреплен штифт. При врезе стрелки срезался болтик и штанга провисала; попытке перевода стрелки препятствовал упор штифта. Ящик замыканий позволял осуществлять замыкание одним сигнальным рычагом стрелки в различных положениях (например, при приеме на несколько путей). Для этой цели вводился специальный рычаг, соответствующий позже появившейся маршрутной рукоятке. Устройство это называлось автором «переменным замыканием». В других системах для подобных случаев требовалось устанавливать несколько сигнальных рычагов.

Принцип замыкания сигнальным рычагом стрелочных в системе Гордеенко следующий. При переменном замыкании линейка

<sup>1</sup> 1" = 1 дюйм = 25,4 мм.

«V» заменялась валиком «W», который мог при вращении занимать четыре положения. Валик «W» мог как перемещаться влево и вправо при передвижении сигнального рычага, так и вращаться при нормальном положении сигнального рычага. Вращение валика «W» производилось рычагом «M», связанным посредством зубчатого сектора «N» с шестеренкой «P». Рычаг устанавливался в одно из своих положений. На валике «W» располагались замычки, образующие в зависимости от положения вала «W» четыре комбинации замыкания нескольких стрелочных рычагов.

В те времена для увязки действий дежурного по станции и исполнительных централизованных постов применялись либо простейшие известительные приборы, либо телефонная связь, либо так называемая механическая блокировка. В 1899 г. VI совещательный съезд представителей службы телеграфа по докладу В. Х. Протасевича и Ф. Ф. Семирадского вынес решение о необходимости дополнения централизованных устройств электрической станционной блокировкой.

В системе Гордеенко практиковалось механическое блокирование сигнальных рычагов; на начальной станции помещался рычаг, соединенный двойной гибкой передачей с замком, запирающим сигнальную полосу «V» или валик «W» аналогично запиранию стрелочных рычагов сигнальным. Я. Н. Гордеенко были разработаны также стрелочные, приводные замки для замыкания ручных стрелок. Замки включались в семафорные провода и замыкали стрелку при открытии семафора.

Устройствами для замыкания стрелочных остряков занимались и многие другие русские изобретатели. Так, например, на Уральских горнозаводских железных дорогах применялись замыкатели системы Завадского. Инж. Бачмановым был предложен затвор для ручных стрелок. На Риготуккумской железной дороге применялись замыкатели Бера. На двухпутных разъездах этой дороги управление входным красным диском и входной стрелкой производилось одним общим рычагом. Диск можно было

открыть лишь одновременной установкой стрелки, причем входные стрелки вели на различные пути. Необходимо упомянуть об изобретении, сделанном в 1886 г. инженером Ивангород-Дамбровской железной дороги Э. Э. Круликевичем. 28 ноября (10 декабря) 1886 г. он прочитал доклад в техническом отделении собрания инженеров путей сообщения об изобретении сигнального аппарата. По словам докладчика, он задался целью разработать «такой аппарат, при помощи которого одним движением приводились бы все стрелки группы и оптические сигналы в правильное положение». Для осуществления своего предложения изобретатель применил металлический барабан, «на котором в виде рубцов показаны условно поезда и группы стрелок, а при помощи зубчатых секторов приводятся в надлежащее положение стрелки и сигналы».

Таким образом, Э. Э. Круликевич впервые предложил маршрутную централизацию стрелок и сигналов и разработал первый аппарат для нее. Доклад Э. Э. Круликевича вызвал оживленное обсуждение и одобрение. К сожалению, изобретатель вскоре умер, не успев довести свое изобретение до реализации. Осуществление его предложения в условиях механической централизации представляло большие трудности, электрической же централизации в то время еще не существовало.

Большим поборником введения централизации на русских железных дорогах был профессор С. Д. Карейша, положивший много труда в исследование вопроса об эффективности введения централизации. Профессор С. Д. Карейша родился в 1854 г. По окончании в 1877 г. Института путей сообщения работал на ряде железных дорог, а с 1911 г. – в Министерстве путей сообщения. Учебно-педагогическая деятельность его протекала с 1895 г. Основной специальностью С. Д. Карейши были железнодорожные станции, в проектировании многих из них он принимал непосредственное участие. Ряд его работ был посвящен устройствам сигнализации, централизации стрелок и сигналов, блокировке. Написал свыше 50 научных статей и заметок. После революции работал в Ко-

митете государственных сооружений и научно-техническом комитете НКПС. Скончался в 1934 г.

Вопросам централизации были посвящены его обстоятельные доклады на IX и X совещательных съездах инженеров службы пути. С. Д. Карейша в 1895 г. защитил в Институте путей сообщения диссертацию на тему «О центральных устройствах по управлению стрелками и сигналами на русских железных дорогах». Эта была первая в России диссертация на тему, связанную с устройствами обеспечения безопасности движения поездов. По исследованиям проф. С. Д. Карейши, введение централизации стрелок и сигналов сказалось на уменьшении эксплуатационных расходов и уменьшении числа аварий на станциях. На обследованных им Владикавказской, Московско-Курской, Рязано-Козловской и Юго-Западной железных дорогах эксплуатационные расходы сократились с 4 до 10 % на затраченный капитал. Число аварий на станциях по Юго-Западной железной дороге уменьшилось на 13 %.

С. Д. Карейша указывал на ряд недостатков централизации системы *Saxby & Farmer*, отмечая, что и по стоимости она примерно в 1,5 раза дороже системы Гордеенко.

С. Д. Карейша пришел к следующим выводам, приведенным в его докладе на IX съезде инженеров службы пути (1891 г.) и одобренным этим съездом:

а) централизация управления стрелками и сигналами служит в значительной степени для обеспечения безопасности движения;

б) централизация, ускоряя управление стрелками и сигналами, тем самым способствует уменьшению непроизводительных задержек подвижного состава;

в) централизация вообще упорядочивает движение и маневры на станциях;

г) централизация способствует упорядочению расположения стрелок и сигналов.

Как видно, за 10 лет, прошедших с I съезда, взгляды на централизацию резко изменились. Состояние русских железных дорог на 1890 г. показано в таблице.

ТАБЛИЦА. Устройства централизации на русских железных дорогах к 1890 г.

№	Вид систем		Число дорог, применяющих централизации	Число постов	Число централизованных стрелок	Наиболее удаленные стрелки, в саж.	Стоимость стрелки, руб.
1	Несовершенные системы		8	128	1036	176	700–1300
2	Совершенные системы	а) русские	9	49	255	225	900
		б) заграничные	4	29	254	233	1300

Примечание. Из 1036 стрелок несовершенных систем лишь 311 были снабжены замыкателями.

Впоследствии на ряде станций, оборудованных централизациями без стрелочных замыкателей, были установлены замыкатели системы Гордеенко. В 1892 г. на станции Чернорудка Юго-Западных железных дорог впервые в России была установлена гидравлическая система централизации.

Несмотря на ряд преимуществ русских систем централизации стрелок и сигналов перед иностранными, последние внедрялись в большей степени, чем отечественные. Как уже отмечено выше, царские чиновники из Министерства путей сообщения не доверяли русским изобретениям и поддерживали ино-

странные фирмы. Борьба за внедрение отечественной техники осложнялась из-за трудностей при создании надлежащей производственной базы. На всякого рода технических совещаниях, в комиссиях и в различных докладах русские техники доказывали необходимость применения отечественных более совершенных систем и устройств.

В 1894 г. произошло крушение курьерского поезда вследствие перевода централизованной стрелки под составом на станции, оборудованной гидравлической централизацией системы Бианки-Серветасс. Эта централизация обладала недостатком, который

был свойственен и многим другим заграничным системам, – в ней отсутствовали маршрутные элементы и стрелки освобождались немедленно по закрытии семафора. На этот недостаток в иностранных системах гидравлической централизации и централизации с жесткой передачей указывал Л. Д. Вурцель. Созданная при Министерстве путей сообщения в 1894 г. под председательством В. Э. Кетрица комиссия, включавшая видных в области СЦБ деятелей того времени (Я. Н. Гордеенко, Л. Д. Вурцеля, С. Д. Карейшу и др.), обсуждала вопрос о централизации стрелок и сигналов на станциях русских железных дорог. Было принято решение о преимущественном применении систем централизации русских изобретателей. В комиссии ранее уже рассматривался вопрос о применении механической централизации с гибкой передачей, и оба вида передачи были одобрены. Большинство станций не имело централизации, и стрелки на них запирались накладными и висячими замками.

На некоторых станциях со значительной поездной работой применялись повторители

наложения стрелок в виде табло. Такое табло еще в 70-х годах XIX в. имелось на ст. Гатчина Товарная Балтийской железной дороги. На этой станции было применено для контроля стрелок табло, установленное в помещении телеграфа. Пути изображались белыми линиями на черном фоне лицевой доски табло и имели переводящиеся стрелочки. Внизу табло помещались 4 клавиши для подачи звонков в путевые стрелочные будки.

Подобные устройства применялись и на других станциях. Так, например, в 90-х годах начальником станции Нижнеднепровск П. Я. Сабиениковым были разработаны и установлены на этой станции приборы, контролирующие положение стрелок и сигналов на путевой схеме станции. Помещение начальника станции было связано со стрелочными постами телефоном. Фактическое положение стрелок и сигналов и установленный маршрут контролировались на путевой схеме станции и номератором вроде звонкового.

## Abstracts

### Reliability, durability, safety

**A. D. Manakov, A. B. Nikitin, O. A. Nasedkin, V. A. Shatokhin**

Train movement provision infrastructure overvoltage protection concept tasks

**Abstract.** Authors state the concept tasks of railway infrastructure atmospheric and switching overvoltage protection considering the stage of wide application of computer and microelectronic systems on railway transport.

**Keywords:** *concept; infrastructure; dangerous electromagnetic influences; overvoltages; impulse overvoltage protection devices.*

**S. V. Bochkarev, A. A. Lykov, D. S. Markov**

Technical diagnosis and monitoring systems performance indicators integrated assessment methodology.

**Abstract.** Railway automation and remote control technical diagnosis and monitoring systems performance integrated assessment methodology based on multilevel parameter system considering diagnosis objects features is offered.

**Keywords:** *technical diagnosis and monitoring systems; performance indicators; reliability indicators; performance indicators integrated assessment methodology and algorithm.*

**V. M. Chukhonin, B. L. Gorbunov,**

**E. V. Basalaev**

The AC motors active power regulation during switch motion

**Abstract.** Solution of task of active power consumed during the AC motor switch motion regulation is offered.

**Keywords:** *railroad switch; switch motor; AC motor; motor active power; switch motion force.*

**A. B. Nikitin, A. N. Kovkin**

The electric drive power circuit functional testing

**Abstract.** In this paper the actuality of continuous testing of railway automation electric drive power circuits is substantiated, principles of continuous diagnosis and test circuit requirements are adduced, power circuit testing scheme designed for application within computer based interlocking MPC-MPK is considered.

**Keywords:** *electric drive; power circuit; check circuit; testing scheme.*

**P. A. Plekhanov**

The railway traffic safety insurance on international routes: domestic and foreign experience

**Abstract.** Domestic and foreign experience of railway traffic safety insurance on international routes is considered. Principles of railway traffic safety insurance on international routes of the Commonwealth countries are formed.

**Keywords:** *traffic safety; international railway traffic.*

### Standardization and certification

**D. A. Vasiliev, S. V. Ghizler, O. A. Nasedkin, M. P. Shaifer**

The expert program for computer based interlocking application software test

**Abstract.** Authors developed the reference station model describing correlations that the computer based interlocking functioning logic based on. The

expert program applied for computer based interlocking application software test is realized on its base.

**Keywords:** *computer based interlocking; application software; safety test; station reference model; expert program.*

### Electronic simulation

**D. S. Markov, V. B. Sokolov**

The method of transport mass service systems portioned modeling

**Abstract.** Authors propose the method of portioned modeling of complex mass service systems (CMSS). The method allows performing research in different

branches of railway automation systems within CMSS with minimum costs of computing resources and operation time.

**Keywords:** *discrete processes; mass service systems; simulation; portioned modeling method.*

**V. A. Khodakovsky, D. S. Markov, V. B. Sokolov**  
Methods and tools of track circuits simulation

**Abstract.** Applied track circuits analysis and developed ones synthesis process requires usage of special methods. The complete solution of these problems is difficult without corresponding methods and tools. Existing track circuit analysis methods does not allow to solve these tasks as well as they do not consider the model of the real signal and its conversions by track circuit elements. This article is devoted to the development of new approaches and tools for analysis and synthesis of circuit solutions considering real operational conditions.

**Keywords:** *track circuit process model; tool; model functional block; hybrid expert system.*

**M. E. Bakin**

The method of the variable components in rail traction current lines spreading calculation

**Abstract.** Analysis of the current distribution in the rail lines is challenging. A substitution scheme of the rail line with lumped parameters is offered. The comparative evaluation of the current distribution

using equivalent circuits of the rail line with distributed and lumped parameters for different frequencies of spreading the traction current and insulation resistance of the rail line is presented.

**Keywords:** *traction current rail line; track circuit; equivalent circuit of the rail line with lumped parameters; equivalent circuit of the rail line with distributed parameters; the current distribution; the mathematical model; the insulation resistance of the rail line.*

**D. V. Novikov**

Formation the model of neutral electromagnetic relay using simulator Ngspice

**Abstract:** This paper describes the algorithm of analytical dependence of neutral electromagnetic relay inductance on current in static conditions of relay obtaining and the way of neutral electromagnetic relay model realization using simulator Ngspice.

**Keywords:** *simulation; relay model; simulator; Ngspice.*

## Technical documentation electronic management

**P. E. Bulavskiy, D. S. Markov**

The method of technical documentation electronic management processes runtime estimation

**Abstract.** The description of a signaling devices technical documentation electronic management (TDEM) formalized scheme is given. The method of TDEM runtime estimation using dynamic probabilistic loaded graphs is offered on the base of formalized scheme.

**Keywords:** *technical documentation electronic management; technical document set; generalized formalized scheme; dynamic probabilistic loaded graphs; simulation.*

**A. A. Matushev, F. N. Lobanov**

The modern approaches to the transfer of technical documentation from paper bearer to the electronic form

**Abstract.** The problem of keeping and using of old paper documentation is considered in this paper. The analysis of possible transfer of technical documentation to the electronic form methods is carried out.

The description of developed module of ARM-RMD based on artificial neuron net is given.

**Keywords:** *technical documentation; artificial neuron net; ARM-RMD.*

**I. S. Gorshkov, I. V. Iljushko**

Principles of electronic documentation management system organisation using electronic digital signatures for coordination and approval of project documentation

**Abstract.** The procedures of project documentation approval between JSC "Russian Railways" and JSC "Lengiprotrans" are considered. Methods of project documentation approval optimization using electronic documentation management system based on electronic digital signature are offered. The problem of the offered method practical application is considered.

**Keywords:** *electronic documentation management system; electronic digital signature; project documentation approval; JSC «Lengiprotrans»; JSC «Russian Railways».*

## Technical diagnostics problems

**V. V. Sapozhnikov, Vl. V. Sapozhnikov, D. V. Efanov**

Classic and weighted Berger codes in concurrent error detection systems

**Abstract.** Properties of classic and weighted Berger codes for the case of data bits errors emergence and faultlessness of check bits are analyzed. It is shown that classic Berger codes does not detect huge num-

ber of small multiplicity errors. Weighted Berger codes detect all the single and twofold data bits distortions; however, they have check vector length exceeding half of data vector length.

**Keywords:** *concurrent error detection; undetectable error; data bits; data bit weight; Berger code; weighted Berger code; properties of code.*

**V. V. Sapozhnikov, Vl. V. Sapozhnikov,  
D. V. Efanov**

On the synthesis of monotonous combinational circuits detecting all single errors

**Abstract.** In this paper authors consider the problem of concurrent error detection system of combina-

tional circuit with monotonically independent outputs design using modulo codes with summation. Considering of error detection features of modulo codes with summation allows to design concurrent error detection systems with reduced complexity comparing with systems based on classic Berger code. Authors determine conditions of application of modulo codes with summation for concurrent error detection system of combinational circuit with monotonically independent outputs design.

**Keywords:** *concurrent error detection; combinational circuit; circuit monotone; Berger code; modulo code with summation; data vector; undetectable error; error detection properties of codes.*

### From the history of railway automation development

**N. V. Lupal**

Point and signal interlocking

**Abstract.** Fragments of the manuscript of the 1950s by N. V. Lupal “Development of signalization, interlocking and line-block devices on Russian railways”

are adduced. The eighth chapter of monograph “Point and signal interlocking” is published.

**Keywords:** *point and signal interlocking; semaphore; point; interlocking machine; tube tractions; point and signal levers.*

---

## Авторы

**Бакин Михаил Евгеньевич** – аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте» Московского государственного университета путей сообщения (МГУПС (МИИТ));  
**E-mail:** [msl87@mail.ru](mailto:msl87@mail.ru)

**Басалаев Евгений Витальевич** – главный инженер ЗАО «МГП «ИМСАТ»;  
**E-mail:** [bas.kmc@yandex.ru](mailto:bas.kmc@yandex.ru)

**Бочкарев Сергей Владимирович** – аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах», ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения» (ПГУПС);  
**E-mail:** [bsv-brassist@mail.ru](mailto:bsv-brassist@mail.ru)

**Булавский Петр Евгеньевич** – д-р техн. наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах», замдекана Электротехнического ф-та ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения» (ПГУПС);  
**E-mail:** [pbulavsky@gmail.com](mailto:pbulavsky@gmail.com)

**Васильев Денис Анатольевич** – старший научный сотрудник кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения» (ПГУПС);  
**E-mail:** [denvas@crtc.spb.ru](mailto:denvas@crtc.spb.ru)

**Гизлер Сергей Владимирович** – инженер кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения» (ПГУПС);  
**E-mail:** [sgizler@mail.ru](mailto:sgizler@mail.ru)

**Горбунов Борис Леонидович** – генеральный директор ЗАО «МГП «ИМСАТ», научный сотрудник кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения» (ПГУПС);  
**E-mail:** [bgorbunov@realsys.ru](mailto:bgorbunov@realsys.ru)

**Горшков Игорь Сергеевич** – аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения» (ПГУПС);  
**E-mail:** [igor.gorshkov@gmail.com](mailto:igor.gorshkov@gmail.com)

**Ефанов Дмитрий Викторович** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеха-

ника на железных дорогах» ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения» (ПГУПС);  
**E-mail:** [TrES-4b@yandex.ru](mailto:TrES-4b@yandex.ru)

**Ильюшко Ирина Владимировна** – аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения» (ПГУПС);  
**E-mail:** [irinchekhova@yandex.ru](mailto:irinchekhova@yandex.ru)

**Ковкин Алексей Николаевич** – канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения» (ПГУПС);  
**E-mail:** [akovkin@yandex.ru](mailto:akovkin@yandex.ru)

**Лобанов Филипп Николаевич** – аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения» (ПГУПС);  
**E-mail:** [6373774@mail.ru](mailto:6373774@mail.ru)

**Лупал Николай Васильевич** – канд. техн. наук, заведующий кафедрой «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта с 1930 по 1960 гг.

**Лыков Андрей Александрович** – канд. техн. наук, заместитель заведующего кафедрой «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения» (ПГУПС);  
**E-mail:** [bastdrew@mail.ru](mailto:bastdrew@mail.ru)

**Манаков Александр Демьянович** – д-р техн. наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах», старший научный сотрудник Центра компьютерных железнодорожных технологий ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения» (ПГУПС);  
**E-mail:** [manakoff\\_2@mail.ru](mailto:manakoff_2@mail.ru)

**Марков Дмитрий Спиридонович** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения» (ПГУПС);  
**E-mail:** [MDS1945@yandex.ru](mailto:MDS1945@yandex.ru)



**Матушев Андрей Александрович** – аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения» (ПГУПС);

**E-mail:** [Dron\\_90@bk.ru](mailto:Dron_90@bk.ru)

**Наседкин Олег Андреевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах», заведующий Испытательным центром ЖАТ ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения» (ПГУПС);

**E-mail:** [nasedkin@crtc.spb.ru](mailto:nasedkin@crtc.spb.ru)

**Никитин Александр Борисович** – д-р техн. наук, профессор, руководитель Центра компьютерных железнодорожных технологий кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения» (ПГУПС);

**E-mail:** [nikitin@crtc.spb.ru](mailto:nikitin@crtc.spb.ru)

**Новиков Дмитрий Валерьевич** – аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах», заведующий Испытательным центром ЖАТ ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения» (ПГУПС);

**E-mail:** [dm17032009@yandex.ru](mailto:dm17032009@yandex.ru)

**Плеханов Павел Андреевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Радиотехника» ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения» (ПГУПС);

**E-mail:** [pavelplekhanov@gmail.com](mailto:pavelplekhanov@gmail.com)

**Сапожников Валерий Владимирович** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения» (ПГУПС);

**E-mail:** [kat@pgups.edu](mailto:kat@pgups.edu)

**Сапожников Владимир Владимирович** – д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Автоматика и

телемеханика на железных дорогах» ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения» (ПГУПС);

**E-mail:** [kat@pgups.edu](mailto:kat@pgups.edu)

**Соколов Вадим Борисович** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения» (ПГУПС);

**E-mail:** [SVB9@yandex.ru](mailto:SVB9@yandex.ru)

**Соколов Михаил Борисович** – канд. техн. наук, ассистент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения» (ПГУПС);

**E-mail:** [SMB5@yandex.ru](mailto:SMB5@yandex.ru)

**Ходаковский Валентин Аветикович** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Математика и моделирование» ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения» (ПГУПС);

**E-mail:** [hval104@mail.ru](mailto:hval104@mail.ru)

**Чухонин Владимир Михайлович** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения» (ПГУПС);

**Шайфер Михаил Пейсахович** – старший научный сотрудник кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения» (ПГУПС);

**E-mail:** [shaifer@crtc.spb.ru](mailto:shaifer@crtc.spb.ru)

**Шатохин Виталий Анатольевич** – канд. техн. наук, заведующий лабораторией «Электромагнитная совместимость и электропитающие устройства ЖАТ» ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения» (ПГУПС);

**E-mail:** [vital@crtc.spb.ru](mailto:vital@crtc.spb.ru)

## Авторский указатель

Бакин М. Е.	55	Марков Д. С.	14, 43, 48, 64
Басалаев Е. В.	23	Матушев А. А.	70
Бочкарев С. В.	14	Наседкин О. А.	5, 39
Булавский П. Е.	64	Никитин А. Б.	5, 26
Васильев Д. А.	39	Новиков Д. В.	60
Гизлер С. В.	39	Плеханов П. А.	31
Горбунов Б. Л.	23	Сапожников В. В.	81, 89
Горшков И. С.	75	Сапожников Вл. В.	81, 89
Ефанов Д. В.	81, 89	Соколов В. Б.	43
Ильюшко И. В.	75	Соколов М. Б.	48
Ковкин А. Н.	26	Ходаковский В. А.	48
Лобанов Ф. Н.	70	Чухонин В. М.	23
Лупал Н. В.	102	Шайфер М. П.	39
Лыков А. А.	14	Шатохин В. А.	5
Манаков А. Д.	5		

*Научное издание*

**Развитие элементной базы и совершенствование  
методов построения устройств  
железнодорожной автоматики и телемеханики**

Сборник научных трудов

Под редакцией *Вл. В. Сапожникова*

Редактор и корректор *Г. Н. Кириллова*

Переводчик *А. А. Блюдов*

Компьютерная верстка *М. С. Савастеевой*

Подписано в печать с оригинал-макета 23.06.14

Формат 64×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага для множ. апп. Печать ризография.

Усл. печ. л. 14,5. Тираж 200 экз.

Заказ 618.

ФГБОУ ВПО ПГУПС. 190031, СПб., Московский пр., 9.

Типография ФГБОУ ВПО ПГУПС. 190031, СПб., Московский пр., 9.