

Автоматика на транспорте

Automation on Transport

№ 3

Том 5

Сентябрь, 2019

September, 2019



Учредитель

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС)
Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»

Главный редактор

Вал. В. Сапожников,
доктор техн. наук, профессор,
академик Академии транспорта РФ
и Международной академии наук высшей школы, заслуженный деятель науки РФ

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

ПИ № ФС77-61375 от 10.04.2015,
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий 18 декабря 2017 года

ISSN 2412-9186
Индекс Роспечати 80525

Адрес редакции

190031, РФ, Санкт-Петербург,
Московский пр., 9, кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»,
+7 (812) 457-8579
at.pgups@gmail.com

Редакция журнала

Перевод на английский язык
А. А. Блюдова
Литературное редактирование и корректура *Н. В. Фроловой*
Верстка *К. В. Перепечкина*

Электронное сопровождение
Д. В. Пивоварова

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2019

Founder

Federal Railway Transport Agency
Federal State Budget Educational Institution for Higher Education «Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University» (PSTU)
«Automation and Remote Control on Railways» department

Editor-in-chief

Valeriy V. Sapozhnikov,
D. Sc., Professor, Member of Academy of Transport of Russia and International Higher Education Academy Of Sciences,
Honored Science Worker of Russia

Mass media registration certificate number

PI № FS77-61375 dd. 10.04.2015
issued by the Federal service for the monitoring of communications, information technologies and mass communications

The Journal is included in the Bulletin of leading peer-reviewed scientific journals and publications

ISSN 2412-9186
Rospechat Index 80525

Address

190031, Russia, St. Petersburg,
Moskovskiy pr., 9, «Automation and Remote Control on Railways» department,
+7 (812) 457-8579
at.pgups@gmail.com

Journal staff

English translation
Anton A Blyudov.
Editing and proofreading
Irina A. Shabranskaya
Layout *Kirill V. Perepechkin*

Electronic maintenancy
Dmitry V. Pivovarov

© PSTU, 2019

Международный редакционный совет

Валерий Сапожников
доктор техн. наук, профессор, ПГУПС,
главный редактор журнала
«Автоматика на транспорте»,
Санкт-Петербург, Россия

Константин Бочков
доктор техн. наук, профессор, Белорусский
государственный университет транспорта,
Гомель, Белоруссия

Сергей Власенко
кандидат техн. наук, доцент,
Сименс, Брауншвейг, Германия

Александр Дундуа
доктор наук, профессор,
Грузинский технический университет,
Тбилиси, Грузия

Марек Мезитис
доктор наук, доцент,
Рижский технический университет,
Рига, Латвия

Йохен Тринкауф
доктор наук, профессор, Технический
университет Дрездена,
Дрезден, Германия

Раймунд Убар
доктор техн. наук, академик Эстонской
академии наук, Таллинский технический
университет, Таллин, Эстония

Владимир Хаханов
доктор технических наук, профессор,
Харьковский национальный университет
радиоэлектроники, Харьков, Украина

Фуниан Ху
доктор наук, профессор, Школа
электротехники педагогического
университета Цзянсу, Суючжоу, Китай

Христо Христов
доктор техн. наук, профессор, Технический
университет, София, Болгария

Редакционная коллегия

Никитин Александр Борисович
доктор техн. наук, профессор, заместитель
главного редактора журнала «Автоматика
на транспорте», ПГУПС, Санкт-Петербург

Соколов Вадим Борисович
кандидат техн. наук, доцент, научный редактор
журнала «Автоматика на транспорте»,
ПГУПС, Санкт-Петербург

Баранов Леонид Аврамович
доктор техн. наук, профессор, РУТ, Москва

Бестемьянов Петр Филимонович
доктор техн. наук, профессор, РУТ, Москва

Бушуев Сергей Валентинович
кандидат техн. наук, доцент, УрГУПС,
Екатеринбург

Василенко Михаил Николаевич
доктор техн. наук, профессор, ПГУПС,
Санкт-Петербург

Долгий Игорь Давидович
доктор техн. наук, профессор, РГУПС,
Ростов-на-Дону

Ефанов Дмитрий Викторович
доктор техн. наук, доцент,
ООО «ЛокоТех-Сигнал», Москва

Кокурин Иосиф Михайлович
доктор техн. наук, профессор, ИПТ РАН,
Санкт-Петербург

Марков Дмитрий Спиридонович
кандидат техн. наук, доцент, ПГУПС,
Санкт-Петербург

Наседкин Олег Андреевич
кандидат техн. наук, доцент, ПГУПС,
Санкт-Петербург

Никищенко Сергей Алексеевич
доктор техн. наук, профессор, СамГУПС,
Самара

Пыркин Антон Александрович
доктор техн. наук, профессор,
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

Розенберг Ефим Наумович
доктор техн. наук, профессор, НИИАС,
Москва

Сапожников Владимир Владимирович
доктор техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург

Шаманов Виктор Иннокентьевич
доктор техн. наук, профессор, РУТ, Москва

Ходаковский Валентин Аветикович
доктор техн. наук, профессор, ПГУПС,
Санкт-Петербург

International editorial board

Valery Sapozhnikov

D. Sc., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University,
Editor-in-chief of «Automation on Transport»,
St. Petersburg, Russia

Konstantin Bochkov

D. Sc., Professor, Belarusian State University
of Transport, Gomel, Belarus

Sergey Vlasenko

Ph. D., Associate Professor,
Siemens AG, Braunschweig, Germany

Alexander Dundua

D. Sc., Professor, Georgian Technical
University, Tbilisi, Georgia

Marek Mezitis

Ph. D., Associate Professor, Riga Technical
University, Riga, Latvia

Johann Trinckauf

Ph. D., Professor, Dresden Technical
University, Dresden, Germany

Raimund Ubar

D. Sc., Member of Estonian Academy
of Sciences, Tallinn Technical University,
Tallinn, Estonia

Vladimir Hahanov,

D. Sc., Professor, Kharkov National University of
Radio Electronics Kharkiv, Ukraine

Funian Hu

Ph. D., Professor, School of Electrical
Engineering of Jiangsu Normal University,
Xuzhou City, China

Khristo Khrystov

D. Sc., Professor, Technical University,
Sofia, Bulgaria

Editorial team

Alexander B. Nikitin

D. Sc., Professor, deputy editor-in-chief of
«Automation on Transport», Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University,
St. Petersburg

Vadim B. Sokolov

Ph. D., Associate professor, executive editor of
«Automation on Transport», Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University,
St. Petersburg

Leonid A. Baranov

D. Sc., Professor, Russian University of Transport,
Moscow

Peter F. Bestemiyarov

D. Sc., Professor, Russian University of Transport,
Moscow

Sergey V. Bushuev

Ph. D., Associate Professor, Ural State
University of Railway Transport, Ekaterinburg

Michael N. Vasilenko

D. Sc., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg
State Transport University, St. Petersburg

Igor D. Dolgiy

D. Sc., Professor, Rostov State Transport
University, Rostov-on-Don

Dmitry V. Efanov

D. Sc., Associate Professor, «LocoTech-Signal» LLC,
Moscow

Iosif M. Kokurin

D. Sc., Professor, Institute of Transport Problems of
the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg

Dmitry S. Markov

Ph. D., Associate professor, Emperor Alexander I St.
Petersburg State Transport University, St. Petersburg

Oleg A. Nasedkin

Ph. D., Associate Professor, Emperor Alexander I St.
Petersburg State Transport University, St. Petersburg

Sergey A. Nikischenkov

D. Sc., Professor, Samara State Transport
University, Samara

Anton A. Pyrkin,

D. Sc., Professor, IFMO University, St. Petersburg

Efim N. Rozenberg

D. Sc., Professor, Scientific Research Institute of Au-
tomation and Communication, Moscow

Vladimir Vl. Sapozhnikov

D. Sc., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg
State Transport University, St. Petersburg

Victor I. Shamanov

D. Sc., Professor, Russian University of Transport,
Moscow

Valentin A. Khodakovsky

D. Sc., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg
State Transport University, St. Petersburg

Содержание

Системы управления на транспорте

Ковкин А. Н.

Комплексная оценка технической эффективности силовой аппаратуры
микропроцессорных систем железнодорожной автоматики 279

Ковкин А. Н.

Бесконтактное управление светофорами в системе микропроцессорной
централизации МПЦ-МПК..... 307

Эксплуатация транспортных систем

Костроминов А. М., Казакевич Е. В., Костроминов Ал-р А., Костроминов Ал-й А.

Анализ частотных помех от нелинейных процессов в RLC-цепях
систем железнодорожной автоматики и телемеханики 326

Манаков А. Д., Рахмонбердиев А. А.

Воздействие перенапряжений на устройства железнодорожной автоматики
и телемеханики АО «Узбекистон темир йуллари» 338

Электронное моделирование

Лыков А. А., Марков Д. С., Соколов В. Б.

Формализация моделей внешней среды в имитационных моделях
систем обеспечения жизненного цикла железнодорожной автоматики..... 356

Булавский П. Е., Ваисов О. К.

Моделирование процессов электронного документооборота
технической документации с помощью сетей Петри..... 375

Техническая диагностика и контролепригодные системы

Ефанов Д. В., Хорошев В. В.

Бинарно-тернарные вопросники..... 391

Contents

Transport control systems

Kovkin A. N.

Comprehensive assessment of the technical efficiency of computer based railway automation systems power equipment 279

Kovkin A. N.

Contactless signal control in computer based interlocking system MPC-MPK 307

Operation of transport systems

Kostrominov A. M., Kazakevich E. V., Kostrominov Al-r A., Kostrominov Al-y A.

Analysis of frequency interference from nonlinear processes in signaling systems RLC-circuits..... 326

Manakov A. D., Rakhmonberdiev A. A.

Influence of overvoltage on the railway automation and remote control devices of JSC “Uzbekistan temir yullari” 338

Electronic simulation

Lykov A. A., Markov D. S., Sokolov V. B.

Formalization of environmental models in simulation models of railway automation life cycle support systems 356

Bulavskij P. E., Vaisov O. K.

Modeling of electronic technical documentation management processes with the help of Petri nets 375

Technical diagnostics and controllable systems

Efanov D. V., Khoroshev V. V.

Binary-ternary questionnaires 391

Системы управления на транспорте

УДК 681.518.5:004.052.32

А. Н. Ковкин, канд. техн. наук

Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I, Санкт-Петербург

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИЛОВОЙ АППАРАТУРЫ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ

Статья посвящена вопросам оценки технической эффективности аппаратных средств микропроцессорных систем железнодорожной автоматики. Обоснована необходимость совместного рассмотрения всех компонентов силовой аппаратуры управления объектами, обозначены ее границы в общей структуре аппаратных средств. Приведена характеристика формализованных методов комплексной оценки как средства для сравнения технических решений. Предложена система частных критериев и показателей технической эффективности силовой аппаратуры, разработанная с учетом специфики отрасли и позволяющая производить сравнительную оценку различных концепций построения аппаратных средств.

устройства сопряжения, силовая аппаратура управления объектами, техническая эффективность, метод расстояний, частные критерии, показатели эффективности, параметрическая безопасность, собственная мощность, объектная мощность.

DOI: 10.20295/2412-9186-2019-5-3-279-306

Введение

Современные системы железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ), построенные на основе вычислительных средств, отличаются от релейных систем расширенными функциональными возможностями, меньшими габаритами оборудования, высокой технологичностью в процессе производства и внедрения. Ключевую позицию в составе аппаратных средств занимают устройства сопряжения с объектами, осуществляющие

энергетическое и временное согласование управляющего вычислительного комплекса с напольными устройствами станций и перегонов. Основным требованием к аппаратуре сопряжения с объектами в системах ЖАТ, непосредственно обеспечивающих безопасность движения поездов, является исключение возможности перехода системы в опасное состояние при возникновении отказов элементов и воздействии различных дестабилизирующих факторов. Реализация указанного требования предполагает использование специальных технических решений, основанных на создании многоканальных структур, контроле исправности элементной базы и построении схем с однонаправленным отказом [1].

Вопросам обеспечения безопасности при возникновении отказов в микропроцессорных системах автоматики посвящено большое количество трудов отечественных и зарубежных специалистов, и в настоящее время перечисленные принципы обеспечения безопасного функционирования успешно реализуются на практике. Вместе с тем безопасные системы железнодорожной автоматики отличаются от микропроцессорных систем, не связанных с безопасностью движения поездов, значительными габаритами и стоимостью аппаратных средств. Практика создания отечественных и зарубежных микропроцессорных систем централизации показывает, что значительную часть от общего объема аппаратуры составляют устройства сопряжения с объектами [2–4]. Для монтажа аппаратуры сопряжения даже на небольших станциях требуется несколько электротехнических шкафов, в то время как управляющий вычислительный комплекс, как правило, размещается в одном шкафу. Существенную долю от общей стоимости и габаритов оборудования составляют также устройства электропитания. Поэтому недостаточное внимание к техническому уровню силовой аппаратуры способно значительно снизить экономический эффект от внедрения микропроцессорной системы автоматики, а в некоторых случаях может поставить под сомнение целесообразность отказа от морально устаревшей релейной аппаратуры в пользу современных систем.

Продукция современных производителей микропроцессорных систем ЖАТ отличается большим разнообразием технических решений. При построении аппаратных средств используются различные принципы обеспечения безопасности, элементная база и конструктивные решения. Существенно различаются технические характеристики и функциональные возможности устройств, требования к напольному технологическому оборудованию и реализация электропитания. Обеспечение высокого уровня разработок в данной

области требует комплексной оценки технических решений. Для этого необходимо четко сформулировать систему критериев технической эффективности как степень соответствия технических средств своему назначению, а также определить набор показателей, позволяющих количественно оценивать эффективность предлагаемых технических решений. Для объективного сравнения различных подходов к построению аппаратных средств желательно использовать формализованные методы комплексной оценки. Это позволит более четко разграничить области применения различных концепций построения безопасной аппаратуры, выявить проблемные места и обозначить приоритетные направления развития технических средств, обеспечивающие высокий технический уровень новых систем ЖАТ. Формализованный подход к сравнению систем железнодорожной автоматики позволит эксплуатирующим организациям обоснованно выбирать наиболее подходящие варианты технических решений с учетом особенностей конкретных полигонов внедрения.

1. Структура аппаратных средств микропроцессорной системы управления

Процесс взаимодействия управляющего вычислительного комплекса (УВК) с исполнительными объектами (ИО) с позиции электротехники состоит в управляемой передаче электрической энергии от первичного источника к объекту и восприятии электрических сигналов, отображающих текущее состояние объекта. Структура аппаратных средств, реализующая данный процесс, приведена на рис. 1.



Рис. 1. Многоуровневая структура микропроцессорной системы ЖАТ

Непосредственное участие в передаче энергии к объектам принимают устройства электропитания (УЭП), обеспечивающие необходимое преобразование электрической энергии, поступающей от сетей электроснабжения, бесперебойность электропитания и гальваническую развязку цепей. Непосредственное управление процессом передачи энергии осуществляют устройства сопряжения с объектами (УСО). Взаимодействие УСО с УВК в современных системах автоматики обычно реализуется с использованием минимального количества физических цепей. Поэтому в составе УСО принято выделять интерфейсную часть, основная задача которой состоит в обеспечении функционирования стандартных последовательных интерфейсов (RS-485, CAN и т. п.), реализующих связь с УВК по малопроводным линиям. Непосредственная реализация функций управления и контроля осуществляется операционной частью УСО [5]. В силу того, что управляемые объекты в системах железнодорожной автоматики могут быть удалены от УСО, в качестве отдельного звена передачи энергии следует рассматривать линейные цепи, реализуемые обычно в виде кабельных линий.

Если алгоритм функционирования системы автоматики связан с безопасностью движения поездов, УВК представляет собой многоканальную структуру, а УСО содержат логические схемы, обеспечивающие реализацию функции «И» либо мажоритарную функцию [1]. Основным требованием к УСО в этом случае является исключение возможности ложной активизации исполнительного объекта при возникновении отказов. Этого можно достигать путем использования преобразовательных схем, формирующих выходное напряжение в результате динамической работы полупроводниковых коммутационных элементов, переключающихся под воздействием импульсных управляющих сигналов. Такие схемы принято называть функциональными преобразователями с несимметричным отказом (ФП) [1]. Напряжение, полученное в результате преобразования, может обеспечивать питание обмоток исполнительных реле, контакты которых коммутируют цепи ИО. В качестве исполнительных реле используются реле I класса надежности или электромагнитные реле, не имеющие признаков приборов I класса, но обеспечивающие возможность контроля фактического размыкания контактов за счет наличия жесткой связи между контактными группами (safety relay). В последнем случае безопасность достигается путем дублирования реле, коммутирующих цепи управления объектами [6].

Подобные УСО являются релейными, а ФП называют устройством включения исполнительного реле (УВИР) [1]. Если ФП имеет достаточную

мощность, выходное напряжение может подаваться непосредственно на управляемый объект, без использования реле в целях обеспечения безопасности. Такое УСО называется бесконтактным. Следует также отметить, что на основе преобразователей могут успешно реализовываться и функциональные узлы, обеспечивающие безопасную реализацию логических функций, лежащих в основе функционирования дублированных безопасных структур.

Схемные решения ФП должны исключать возможность активизации управляемого объекта в случае пробоя коммутационных элементов. Это может достигаться путем использования трансформаторной развязки. Если источник питания не способен активизировать ИО при непосредственном воздействии, возможно использование преобразовательных схем без трансформаторов.

Другим вариантом реализации безопасного управления является контроль исправности полупроводниковых коммутационных элементов с гарантированным отключением питания ИО в случае обнаружения отказа [1]. Для контроля коммутационных элементов необходимо привлекать дополнительные программные ресурсы, а также иметь соответствующую аппаратную реализацию. Устройства, отключающие питание, должны обладать достаточным быстродействием и не допускать опасных ситуаций при возникновении отказов. Временные параметры тестирующих сигналов следует выбирать таким образом, чтобы предотвращалась возможность активизации выключенных ИО в процессе контроля исправности ключей. Указанная проблематика осложняет практическую реализацию безопасных УСО, основанных на контроле исправности коммутационных элементов, и определяет повышенный интерес к построению аппаратуры сопряжения с использованием преобразовательных схем и современных малогабаритных реле, предназначенных для печатного монтажа.

Завершая краткое описание принципов обеспечения безопасности УСО, следует рассмотреть реализацию контроля состояния объектов. Также как для функции управления, актуальной является задача обеспечения безопасности. По отношению к контролю это означает, что должна исключаться возможность передачи в УВК ложной информации, которая по алгоритму функционирования системы автоматики может инициировать возникновение опасных ситуаций в движении поездов. Схемные решения, реализующие контроль состояния объектов, должны быть построены таким образом, чтобы отказы элементов не приводили к нарушению безопасности. основополагающим принципом реализации данного требования является

представление информации о состоянии объектов в виде электрических сигналов, имеющих динамический (импульсный) характер [1].

При оценке эффективности различных концепций построения аппаратных средств не следует изолированно рассматривать УЭП, УСО и линейные цепи, поскольку решения, принимаемые в рамках всех перечисленных компонентов, оказывают существенное влияние на реализацию смежных уровней передачи энергии. Например, если управление светофорами в системе централизации планируется осуществлять с помощью релейного УСО, устройства электропитания должны обеспечивать наличие переменного напряжения с гальванической развязкой от сети электроснабжения, что легко достигается с помощью изолирующих трансформаторов [8]. Кроме того, при управлении объектами путем коммутации цепей релейными контактами для построения кабельных сетей станций могут применяться традиционные решения, используемые в релейных системах автоматики, что является плюсом в случае поэтапной модернизации систем. При управления светофорами с помощью бесконтактных УСО на основе преобразовательных схем от УЭП потребуется формирование постоянного напряжения для последующего преобразования в схеме ФП. Необходимо также принимать во внимание проблему увеличения взаимных влияний в кабельных сетях вследствие использования напряжений несинусоидальной формы. С другой стороны, если бесперебойность питания аппаратуры предполагается реализовывать путем использования в составе УЭП шины постоянного тока, напряжение для ФП будет получить проще, чем переменное напряжение для схем управления, основанных на релейной коммутации цепей.

Таким образом, понятие силовой аппаратуры управления объектами должно подразумевать совокупность трех уровней передачи энергии: УЭП, УСО и линейных цепей. Причем в составе УСО к силовой аппаратуре целесообразно относить все функциональные узлы, реализующие функции логической обработки, управления и контроля, за исключением интерфейсных устройств, построенных с использованием программируемой элементной базы, поскольку последние имеет смысл рассматривать в качестве одного из компонентов вычислительных средств наряду с УВК и пользовательским интерфейсом.

Целесообразность комплексного рассмотрения силовых устройств обусловлена еще и тем, что на сегодняшний день остается в тени проблематика безопасности управления в условиях использования протяженных кабельных линий, а также многие вопросы, связанные с опасным влиянием на процесс

управления объектами отказов, возникающих в источниках вторичного электропитания. В частности, определенные неисправности источников могут приводить к повышению величины напряжения питания устройств или к увеличению пульсаций напряжения. Повышение величины напряжения способно негативно сказаться на безопасности функционирования аппаратуры управления светофорами, поскольку рост напряжений на выходе УСО будет приводить к усилению взаимных влияний в кабельных сетях. Пульсации могут оказать опасное воздействие на работу ФП в составе устройств сопряжения либо привести к повышению уровня высокочастотных гармоник в кабельной сети.

2. Система показателей технической эффективности силовой аппаратуры управления объектами

2.1. Методы комплексной оценки и частные критерии технической эффективности аппаратных средств

Для комплексной оценки объектов сравнения с точки зрения экономических категорий используются разнообразные методы формализованной оценки. Наиболее наглядными методами, позволяющими работать с отличающимися по физической природе показателями, можно считать *метод суммы баллов*, *метод суммы мест*, а также *метод расстояний* в различных его вариациях [7]. По мнению автора, нет принципиальных противопоказаний к использованию перечисленных методов и для комплексной оценки технической эффективности аппаратуры.

Метод суммы мест предполагает предварительное ранжирование объектов сравнения по занимаемым местам в рамках каждого конкретного показателя. При использовании метода суммы баллов значения показателей заменяются балльными оценками. Результат для каждого объекта сравнения получается путем алгебраического суммирования мест или баллов по всем показателям. Достоинство обоих методов состоит в возможности использования для оценки объектов разнородных и разнонаправленных показателей. Существенным недостатком метода суммы мест является отсутствие влияния на результат количественной разницы между величинами показателей, что особенно критично в случае сравнения малого числа объектов. Не полностью учитывается количественная разница между показателями и в методе суммы баллов. Кроме того, в обоих методах невозможно устанавливать различие в значимости тех или иных показателей.

От указанных недостатков свободен метод расстояний, основная идея которого заключается в геометрическом суммировании различных показателей, предварительно приведенных к безразмерному виду с единым масштабом значений. Каждый объект сравнения представляется в виде точки, координаты которой задаются величинами показателей, используемых для комплексной оценки. Результат сравнения отображается расстоянием между точками в n -мерном пространстве. Метод расстояний в полной мере учитывает количественную разницу между показателями, что способствует достоверности сравнения при малом числе объектов. При использовании данного метода можно ожидать получения адекватного результата даже при сравнении двух технических решений.

Существуют различные разновидности метода расстояний. В одной из вариаций результат комплексной оценки i -го объекта KO_i определяется следующим выражением [7]:

$$KO_i = \sqrt{x_{i1}^2 + x_{i2}^2 + \dots + x_{in}^2}, \quad (1)$$

где x – нормированный (приведенный к безразмерному виду) показатель; n – количество показателей, используемых для сравнения. Для нормирования показателей используется следующая формула [7]:

$$x_{ij} = \frac{a_{ij}}{a_{\max j}}, \quad (2)$$

где j – порядковый номер показателя; a_{ij} – значение j -го показателя для i -го объекта сравнения; $a_{\max j}$ – максимальное значение j -го показателя среди рассматриваемых объектов сравнения. В случае если показатель изначально представлен относительным значением (коэффициентом) и его величина не превышает единицу, нормализация с использованием выражения (2) не требуется и такой показатель можно непосредственно подставлять в формулу (1). При необходимости можно установить различие в значимости конкретных показателей путем умножения нормированных величин на *весовой коэффициент*, определяемый для каждого показателя экспертными методами.

Особенностью метода расстояний является обязательное требование к одинаковой направленности показателей. Иными словами, все показатели должны определять качество объекта или по принципу «чем больше, тем лучше», или по принципу «чем меньше, тем лучше». В первом случае лучшему объекту будет соответствовать максимальное значение KO_i . Во втором

случае лучший объект будет иметь минимальную величину результата комплексной оценки. Такая особенность считается препятствием к использованию метода расстояний в условиях использования показателей разной направленности. Однако данное препятствие несложно преодолеть, заменив показатели нежелательной направленности обратными величинами [8]:

$$a'_{ij} = \frac{1}{a_{ij}}. \quad (3)$$

Техническая эффективность в общепринятом понимании показывает степень соответствия рассматриваемого объекта своему назначению и отражается набором частных критериев, которые могут различным способом характеризовать оцениваемый объект с учетом особенностей конкретной отрасли. На рис. 2 показана система частных критериев эффективности, предлагаемая для комплексной оценки аппаратуры железнодорожной автоматики.

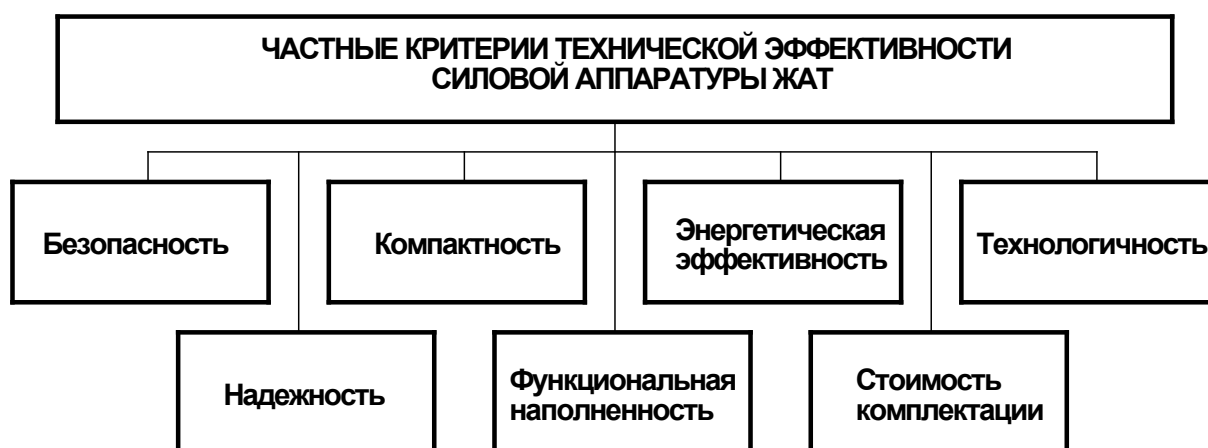


Рис. 2. Частные критерии технической эффективности силовой аппаратуры управления объектами в системах железнодорожной автоматики

Количественная интерпретация частных критериев эффективности выражается набором показателей. Особенностью систем железнодорожной автоматики является разнородность полигонов внедрения по количеству исполнительных объектов. Обеспечение достоверной оценки аппаратуры в таких обстоятельствах определяет необходимость преимущественного использования удельных показателей, приведенных к количеству исполнительных объектов $n_{ио}$. В качестве исполнительного объекта предлагается рассматривать наполное или постовое устройство, например стрелочный привод, светофорную

лампу, светодиодный излучатель, реле и т. п. Используя методы комплексной оценки, можно получать отдельные результаты сравнения в рамках одного или нескольких частных критериев, а также вычислять общий результат технической эффективности сравниваемых решений.

2.2. Безопасность и надежность силовой аппаратуры управления

В железнодорожной отрасли приоритетное значение имеет безопасность как способность системы не оказывать опасного воздействия на технологический процесс при возникновении внутренних отказов. Оценка безопасности устройств железнодорожной автоматики производится на основе вероятностных показателей [9–12]. Наиболее часто используемым вероятностным показателем безопасности является *интенсивность опасных отказов* $\lambda_{\text{оп}}$. Данный показатель используется при нормировании безопасности вновь разрабатываемых систем и рассчитывается в ходе доказательства безопасности технических решений. Оценивая систему железнодорожной автоматики, исходят из концепции «замещения риска», состоящей в том, что безопасность вновь разрабатываемых устройств должна быть не хуже безопасности существующих. Таким образом, критерием возможности применения системы по прямому назначению является выполнение условия

$$\lambda_{\text{оп}} < \lambda_{\text{оп.макс}},$$

где $\lambda_{\text{оп.макс}}$ – максимально допустимая интенсивность опасных отказов, определяемая на основании экспертных оценок и продолжительного опыта эксплуатации существующих устройств.

Оценка безопасности системы только по вероятностным показателям не является исчерпывающей, поскольку величины электрических воздействий на отдельные компоненты не всегда имеют дискретный характер и в силу ряда причин могут принимать промежуточные значения, обуславливающие возникновение опасных ситуаций. Характерным примером являются схемы управления светофорами в системах электрической централизации. При центральном питании светофоров на выключенных лампах всегда присутствует некоторое напряжение, вызванное емкостными связями между цепями в кабельной сети. В случае значительной протяженности линии величина этого напряжения может оказаться достаточной для появления видимого свечения нити выключенной лампы. Описанная ситуация не связана

с возникновением отказов или иных случайных событий и обусловлена наличием паразитных параметров линейных цепей. Соответственно, в данном контексте, охарактеризовать уровень безопасности устройств с помощью вероятностных показателей невозможно и следует использовать параметрические показатели.

В некоторых случаях параметрические и вероятностные факторы необходимо учитывать совместно. Одним из примеров являются опасные ситуации, связанные с отказами источников вторичного электропитания. В этом случае для адекватной оценки безопасности аппаратуры вначале следует определить критичный с точки зрения безопасности уровень выходного напряжения или амплитуды пульсаций, после чего рассчитать вероятностные характеристики отказов источника электропитания, способных привести к опасному изменению параметров выходного напряжения.

Для обеспечения полноты оценки аппаратуры с точки зрения возможности возникновения опасных ситуаций было предложено понятие параметрической безопасности, характеризующей способность устройств поддерживать уровни входных и выходных параметров в пределах, необходимых для обеспечения безопасного функционирования системы. Ключевыми показателями параметрической безопасности являются *пороговый уровень воздействия* $A_{\text{пор}}$, определяющий величину воздействия, приводящего к переходу объекта управления или иного компонента системы в опасное состояние, а также *остаточный уровень воздействия* $A_{\text{ост}}$, характеризующий величину воздействия, существующего в силу наличия каких-либо дестабилизирующих факторов. Уровни воздействия чаще всего выражаются электрическими величинами (напряжением, током или мощностью). В этом случае условием параметрической безопасности аппаратуры управления является выполнение неравенства

$$A_{\text{ост}} < A_{\text{пор}}.$$

Иногда вместо электрических величин могут рассматриваться частотные или временные параметры сигналов. В этом случае характер неравенства может быть иным и зависит от особенностей конкретного технического решения.

Учитывая, что пороговые и остаточные уровни воздействия имеют индивидуальный характер для различных устройств, качество разработки

в контексте параметрической безопасности целесообразно оценивать с помощью относительного показателя – *коэффициента запаса по остаточному воздействию* $K_{з.ост}$, определяемого для электрических величин следующим образом:

$$K_{з.ост} = \frac{A_{пор}}{A_{ост}}.$$

Очевидно, что значение данного коэффициента для безопасной аппаратуры превышает единицу. Поэтому при использовании для комплексной оценки метода расстояний удобнее оперировать обратным значением данного показателя, определяя его с помощью выражения (3).

Надежность системы ЖАТ является комплексным свойством сохранять во времени способность к выполнению требуемых функций. Основные составляющие надежности – безотказность, ремонтпригодность и долговечность [9, 11, 12]. Общепринятая система показателей, количественно отражающая надежность устройств, основана на вероятностных характеристиках. Безотказность аппаратуры чаще всего характеризуется *интенсивностью отказов*. Одним из основных показателей ремонтпригодности является *среднее время восстановления*. Долговечность обычно определяется *сроком службы*.

2.3. Компактность и функциональная наполненность оборудования

Существуют различные системы показателей, характеризующие электронную аппаратуру как объект конструкторско-технологической разработки [13, 14]. Однако они не всегда позволяют обеспечить необходимую адекватность сравнения аппаратуры. Ряд часто используемых показателей, например сложность конструкции или количество элементов, не имеют существенной значимости для потребителя. Масса изделий также не является определяющим фактором для электронной аппаратуры стационарного размещения. Одним из важнейших преимуществ микропроцессорных систем железнодорожной автоматики является возможность существенного сокращения габаритов аппаратных средств. Поэтому для сравнительной оценки конструктивных характеристик современных систем ЖАТ наибольший интерес представляет *удельный объем силовой аппаратуры* $V_{сил}$, определяемый следующим образом:

$$V_{\text{сил}} = \frac{V_{\text{уЭП}} + V_{\text{уСО}}}{n_{\text{ИО}}},$$

где $V_{\text{уЭП}}$ – общий объем аппаратуры электропитания, функционально связанной с конкретным видом исполнительных объектов; $V_{\text{уСО}}$ – общий объем устройств сопряжения соответствующего назначения; $n_{\text{ИО}}$ – количество исполнительных объектов, по отношению к которым определяется объем аппаратуры. Поскольку значение имеет величина пространства, требуемого для размещения устройств, объем следует определять по габаритным размерам аппаратуры.

Экономический эффект от сокращения габаритов постового оборудования связан с уменьшением площади помещений, необходимых для размещения устройств. Поэтому значимым показателем является также *удельная площадь размещения силовой аппаратуры* $S_{\text{сил}}$, определяемая формулой:

$$S_{\text{сил}} = \frac{S_{\text{уЭП}} + S_{\text{уСО}}}{n_{\text{ИО}}}.$$

Целесообразность рассмотрения площади как отдельного показателя обусловлена тем, что удельная площадь размещения не может быть выражена непосредственно через объем аппаратуры, поскольку необходимо учитывать объем, занимаемый конструктивными изделиями (стативами, электротехническими шкафами), а также дополнительное пространство, обеспечивающее возможность беспрепятственного монтажа оборудования и технического обслуживания в процессе эксплуатации системы. Кроме того, дополнительный объем монтажного пространства может потребоваться для реализации эффективного отведения тепла в процессе функционирования силового оборудования.

Конкурентоспособность современной системы автоматики в значительной степени определяется ее функциональными возможностями. Ведущая роль в расширении функциональных возможностей, безусловно, принадлежит вычислительным средствам. Однако появлению новых функций на уровне программного обеспечения зачастую препятствует недостаточный уровень развития силовой аппаратуры. В первую очередь это относится к функциям, связанным с мониторингом исполнительных объектов и диагностикой аппаратуры. Если ставится задача сравнения различных систем или технических решений, представляет интерес *количество новых функций*, не предусмотренных в системах

предшествующего поколения. Например, если речь идет об аппаратуре управления стационарными светофорами, новой функцией является контроль холодных нитей выходных и маневровых светофоров [15], поскольку схемные решения релейных систем централизации не предусматривали такую возможность. Для устройств управления стрелками новой функцией можно считать непрерывный контроль целостности рабочей цепи и обмоток двигателя [16].

Тактико-технические показатели аппаратуры могут иметь самую различную природу, но общим является то, что они количественно характеризуют способность устройства выполнять заданные функции. Некоторые из показателей имеют определяющее значение для комплексной оценки технических решений. Например, в системах централизации ключевым показателем является *дальность управления объектами*. Увеличение дальности управления в микропроцессорных системах ЖАТ способствует появлению качественно новых возможностей, обеспечивающих более эффективную реализацию управления объектами на крупных железнодорожных узлах. В частности, появляется возможность отказа от использования отдельных систем централизации для удаленных районов станций. При значительной дальности управления возможно совмещение функций различных систем, например электрической централизации и автоблокировки, в рамках одного вычислительного комплекса. Последнее способствует повышению экономической эффективности внедрения микропроцессорных систем на малых станциях железнодорожного транспорта, а также в условиях метрополитенов.

Исполнительные объекты в пределах одного вида устройств (светофоры, стрелки и т. п.) имеют различные параметры и варианты исполнения. Например, до недавнего времени все светофоры оснащались лампами накаливания различной мощности. Сегодня вместо ламп на светофорах все чаще используются разнообразные светодиодные излучатели. При разработке аппаратуры сопряжения для светофоров на процесс выбора технических решений оказывают не только особенности конкретных излучателей, но и тот факт, что различные стационарные светофоры имеют не одинаковый набор сигнальных показаний. Аналогичная ситуация характерна для аппаратуры управления стрелками. Ранее стрелочные приводы оснащались двигателями постоянного тока, современные проектные решения предусматривают использование приводов переменного тока, в будущем могут получить распространение вентильные электродвигатели. Различия наблюдаются и в реали-

зации контроля положения стрелочных переводов. В указанных условиях весомым преимуществом является универсальность аппаратуры управления, которую можно определить как способность управлять напольными и постовыми объектами, разнородными по параметрам и конфигурации, с помощью одинаковых по схемотехническому и конструктивному исполнению технических средств. Универсальность устройств способствует сокращению затрат на разработку и производство отдельных модификаций оборудования, упрощает проектирование, монтаж и техническое обслуживание систем автоматики. Для количественной оценки универсальности технических средств предлагается использовать относительный показатель – *коэффициент универсальности* $k_{ун}$, определяемый следующим образом:

$$k_{ун} = \frac{n_{исп}}{n_{мод}},$$

где $n_{исп}$ – количество исполнений управляемого объекта определенного вида; $n_{мод}$ – количество модификаций оборудования, необходимое для управления указанным набором объектов. В случае применения метода расстояний может оказаться целесообразным использование обратной величины данного показателя, вычисленной с помощью формулы (3).

2.4. Энергетические характеристики устройств управления объектами

Общим показателем, характеризующим энергетическую эффективность электронных устройств, является *мощность потребления* [17]. Основными показателями эффективности источников вторичного электропитания считаются *коэффициент полезного действия (КПД)* и *удельная мощность* – выходная мощность источника питания, приходящаяся на единицу объема [18, 19].

Особенностью устройств сопряжения как потребителя электрической энергии является выраженная зависимость энергопотребления силовой аппаратуры от текущего состояния исполнительных объектов. Вместе с тем в общем объеме потребляемой энергии всегда присутствует составляющая, обусловленная расходами на питание функциональных узлов, осуществляющих информационный обмен между УСО и УВК, логическую обработку сигналов, формирование управляющих воздействий для силовых ключей и контроль состояния объектов. Энергетические характеристики перечисленных узлов в большинстве случаев не имеет однозначной связи с количеством ак-

тивных объектов управления. Такая двойственность аппаратуры с точки зрения энергопотребления затрудняет количественную оценку энергетической эффективности, поскольку такие показатели, как мощность потребления и КПД, для аппаратуры сопряжения не являются постоянными величинами. Определенные сложности в связи с этим могут возникать и при расчетах нагрузки на устройства электропитания, производимых в ходе проектирования систем, а также при оценке тепловых режимов оборудования.

С целью обеспечения необходимой полноты описания устройств сопряжения как потребителей энергии предложена модель, основанная на таких понятиях, как «объектная» и «собственная» составляющие энергетических параметров. Графическая интерпретация объектной и собственной составляющей показана на рис. 3.

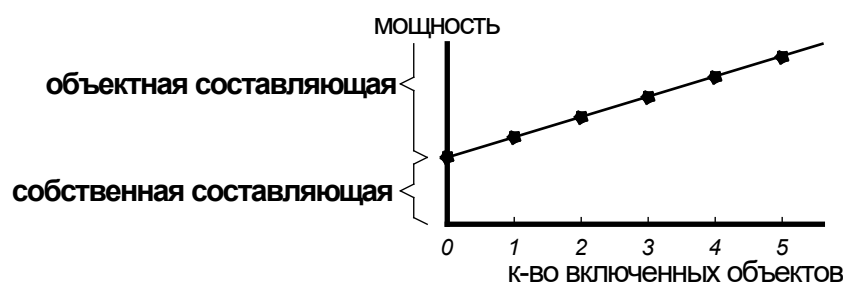


Рис. 3. Объектная и собственная составляющие энергетических параметров

Объектная составляющая отражает изменение энергетических параметров УСО при включении различного количества ИО. Собственная составляющая определяет значения тех же самых параметров устройств сопряжения, когда все объекты находятся в выключенном состоянии, то есть не потребляют электрическую энергию.

Энергоэффективность аппаратуры сопряжения предлагается оценивать по величине потерь энергии. При этом считается, что вся энергия, потребляемая аппаратурой при выключенных объектах, включая составляющую, расходуемую на реализацию контроля состояния ИО, рассеивается в окружающее пространство в виде тепла, то есть является энергией потерь. Поэтому одним из показателей энергетической эффективности аппаратуры можно считать *удельную величину собственной мощности рассеяния* $P_{с.р.}$, характеризующую рассеиваемую мощность, приходящуюся на один исполнительный объект (двигатель стрелочного привода, светофорную лампу) при условии, что все исполнительные объекты выключены. Другим

показателем является *удельная величина объектной мощности рассеяния* $P_{o,p}$, определяющая величину приращения мощности, рассеиваемой в аппаратуре, при включении одного исполнительного объекта. Аналогичный подход целесообразно применять и при анализе энергетической эффективности источников вторичного электропитания, особенно в тех случаях, когда мощность, потребляемая от источника, может изменяться в широких пределах.

2.5. Стоимость комплектации и технологичность аппаратуры

Экономический эффект от внедрения новых систем автоматики в значительной степени зависит от капитальных вложений в силовую аппаратуру. Последние определяются себестоимостью аппаратуры, которая включает в себя суммарную стоимость элементной базы и готовых изделий, массово выпускаемых промышленностью (например, стандартизированных источников вторичного электропитания), а также затраты на монтаж и регулировку изделий в условиях производства. Заметное влияние на экономическую эффективность оказывает объем пусконаладочных работ, выполняемых на объектах внедрения систем.

Корректное сравнение технических решений в части силовой аппаратуры обеспечивается при использовании такого показателя, как *удельная стоимость комплектации*:

$$C_k = \frac{C_{УСО} + C_{УЭП}}{n_{ИО}},$$

где $C_{УСО}$ – общая стоимость комплектации устройств сопряжения для определенного вида исполнительных объектов; $C_{УЭП}$ – общая стоимость комплектации соответствующего назначения, входящей в состав аппаратуры электропитания.

Затраты на монтаж аппаратуры в значительной степени определяются ее технологичностью – свойством конструкции, состоящем в ее приспособленности к повторению в условиях серийного производства. Технологичность электронной аппаратуры непосредственно связана с возможностью применения автоматизированного монтажа. Для оценки технологичности используют систему базовых показателей технологичности электронных узлов [13]. Наибольшую значимость среди базовых показателей имеют коэффициенты

механизации и автоматизации, определяющие относительное количество автоматизируемых операций в общем объеме работ.

В современной аппаратуре подавляющее большинство соединений выполняется печатным монтажом. В условиях крупносерийного производства электронных изделий практически все операции, связанные с монтажом компонентов на печатных платах, могут быть автоматизированы. В результате коэффициенты механизации и автоматизации получаются близкими к единице, т. е. стирается различие между сравниваемыми техническими решениями. В то же время следует понимать, что наличие даже небольшого количества ручных операций по выполнению электрических соединений заметно ухудшает технологичность изделий. Отрицательно влияют на технологичность и сборочные операции, связанные с механическим креплением элементов. В связи с этим для комплексной оценки предложено ориентироваться на объем операций, не поддающихся автоматизации, и использовать такой показатель, как *удельное количество ручных операций* $N_{p.o}$, определяемый следующим образом:

$$N_{p.o} = \frac{n_{п.о.м} + n_{к.э}}{n_{ИО}},$$

где $n_{п.о.м}$ – количество паек, связанных с объемным (проводным) монтажом, включая пайку на печатных платах выводов элементов, конструктивно не приспособленных для печатного монтажа; $n_{к.э}$ – количество крепежных элементов (винтов, саморезов, хомутов-стяжек и т. п.), используемых для механического крепления элементной базы и проводного монтажа, а также для сборки конструктивных элементов изделия (передних панелей, корпусов и других компонентов конструкции).

Принято считать, что широкое использование интегральных микросхем и микросборок способствует повышению технологичности электронных устройств. По мнению автора, это полностью справедливо в тех случаях, когда используются стандартизированные микроэлектронные изделия, выпускаемые широким кругом производителей электронных компонентов. Степень применения микроэлектронных компонентов характеризует относительный показатель – *коэффициент использования ИМС и микросборок* $k_{ИМС}$ [13]:

$$k_{ИМС} = \frac{n_{ИМС}}{n_k},$$

где $n_{\text{ИМС}}$ – количество интегральных микросхем и микросборок; $n_{\text{к}}$ – общее количество компонентов на печатных платах.

Существенные трудозатраты при производстве аппаратуры связаны с необходимостью проведения регулировочных операций, так как последние практически не поддаются автоматизации. Объем регулировочных операций можно отразить *удельным количеством регулировочных элементов* (подстроечных резисторов и конденсаторов, регулировочных переключателей).

Особенностью систем автоматики является то, что существенную долю трудозатрат составляет монтаж готового оборудования на полигонах внедрения, а также проведение пусконаладочных работ перед вводом систем в эксплуатацию. В связи с этим понятие технологичности целесообразно распространить и на эту часть жизненного цикла системы. Электронное оборудование, выпускаемое в промышленных условиях, в общем случае представляет собой набор конструктивно завершенных блоков, соединяемых проводным монтажом. Вполне очевидно, что сокращению времени, необходимого для монтажа оборудования на станциях и перегонах, способствует уменьшение общего количества межблочных соединений, выполняемых непосредственно на полигоне внедрения. Кроме того, положительную роль играет сокращение относительного числа неразъемных электрических соединений, требующих проведения трудоемких технологических операций (снятия изоляции с проводов, монтажа с помощью пайки, на винтовых клеммах и т. п.). Наиболее технологичным вариантом межблочных соединений следует считать использование многоконтактных разъемов и типовых кабельных соединителей, изготавливаемых в промышленных условиях. Для количественной оценки технологичности в данном контексте можно использовать такой показатель, как *удельное количество межблочных соединений* $N_{\text{м.с}}$, включающее в себя как разъемные, так и неразъемные соединения, выполняемые различными способами. Выразить данный показатель можно следующим образом:

$$N_{\text{м.с}} = \frac{n_{\text{н.с}} + n_{\text{р}}}{n_{\text{ИЮ}}},$$

где $n_{\text{н.с}}$ – общее количество неразъемных соединений между блоками; $n_{\text{р}}$ – количество разъемов для межблочных соединений в составе аппаратуры. Степень использования разъемов для соединения блоков можно

охарактеризовать *относительным количеством разъемных соединений* $K_{p.c}$, определив его следующим образом:

$$K_{p.c} = \frac{n_p}{n_{н.с} + n_p}.$$

2.6. Пример комплексной оценки технической эффективности аппаратуры с использованием метода расстояний

Сравнение технической эффективности аппаратных средств может осуществляться по различным наборам критериев в зависимости от степени значимости тех или иных показателей. В качестве примера произведено сравнение технической эффективности различных концепций построения УСО для управления светофорами в условиях организации электропитания устройств от шины постоянного тока (ШПТ). Критериями для сравнения являются компактность и стоимость комплектации силового оборудования. В качестве объектов сравнения рассматривается бесконтактная аппаратура сопряжения на основе преобразовательных схем и устройства сопряжения, построенные с применением safety relay.

В рамках УЭП в рассмотрение принимаются источники вторичного электропитания (ИВЭП), преобразующие напряжение ШПТ к виду, необходимому для работы силовых модулей аппаратуры сопряжения. Бесконтактная аппаратура сопряжения использует постоянное напряжение питания и обеспечивает гальваническую развязку цепей за счет наличия трансформаторов в составе УСО. Поэтому в качестве ИВЭП для указанной аппаратуры можно применять импульсные стабилизаторы напряжения понижающего типа, не содержащие в своем составе трансформаторы и характеризующиеся относительно высоким КПД, а также малым количеством силовых компонентов. Релейная аппаратура сопряжения требует переменного напряжения. Кроме того, гальваническая развязка кабельной сети станции и ШПТ в этом случае должна быть реализована на уровне устройств электропитания. Соответственно, ИВЭП в своем составе будут содержать узлы, конвертирующие величину постоянного напряжения с применением трансформаторов (DC/DC-преобразователи), а также устройства, преобразующие полученное постоянное напряжение в переменное напряжение (инверторы).

Исходная информация для сравнения, нормированные значения показателей, определенные с использованием выражения (2), а также результаты расчета комплексной оценки по формуле (1) приведены в таблице.

Таблица

Концепция построения УСО	Преобразовательные схемы		Релейная коммутация	
	Маневровый	Поездной	Маневровый	Поездной
Назначение светофора				
Стоимость комплектации УСО, руб/светофор	5 209	10 419	5 855	15 868
Стоимость комплектации ИВЭП, руб/светофор	420	420	1 249	1 249
Суммарная стоимость комплектации, руб/светофор	5 630	10 839	7 104	17 117
Объем УСО, см ³ /светофор	1495	2990	797	2392
Объем ИВЭП, см ³ /светофор	170	170	429	429
Суммарный объем аппаратуры, см ³ /светофор	1665	3160	1226	2821
Нормированное значение удельной стоимости	0,793	0,633	1,000	1,000
Нормированное значение удельного объема	1,000	1,000	0,737	0,893
Результат комплексной оценки (чем меньше, тем лучше)	1,28	1,18	1,24	1,34

В стоимости комплектации ИВЭП и УСО учтена стоимость элементной базы, а также основных материалов, используемых для изготовления трансформаторов и теплоотводящих изделий (радиаторов), по данным поставщиков электронных компонентов и электротехнической продукции.

В качестве габаритного показателя рассматривается удельный объем силовой аппаратуры. Удельный объем бесконтактных УСО, реализованных на основе преобразовательных схем, определен по габаритным размерам силового модуля С-4-2 системы микропроцессорной централизации МПЦ-МПК, осуществляющего управление двумя маневровыми или одним поездным светофором. Величина удельного объема ИВЭП для бесконтактных устройств сопряжения получена исходя из габаритов модуля стабилизации МС-48-С, разработанного для системы МПЦ-МПК. Ориентировочная оценка объема УСО и ИВЭП для релейной аппаратуры сопряжения произведена на основании результатов опытно-конструкторских работ.

Результаты комплексного сравнения по объему и стоимости показывают, что техническая эффективность бесконтактной и релейной аппаратуры сопряжения в условиях электропитания от ШПТ отличается несущественно. Значительный объем бесконтактной аппаратуры сопряжения, обусловленный наличием низкочастотных трансформаторов, уравновешивается сравнительно высокой стоимостью релейной аппаратуры (в основном за счет стоимости реле), а также повышенной сложностью ИВЭП, формирующих напряжение для релейных схем коммутации. По результатам оценки видно, что для маневровых светофоров преимущество получает релейная аппаратура сопряжения, а для поездных светофоров более эффективной оказывается бесконтактная аппаратура на основе преобразовательных схем.

Заключение

Достижение высокого технического уровня при разработке аппаратуры для микропроцессорных систем железнодорожной автоматики предполагает необходимость комплексной оценки технических решений. В данной работе рассмотрены вопросы, связанные с силовой аппаратурой, которая составляет преобладающую часть общего объема и стоимости аппаратных средств. Микропроцессорная система автоматики представлена в виде многоуровневой структуры, в которой реализуется передача энергии от сетей электроснабжения к управляемым объектам. Силовая аппаратура, реализующая передачу энергии, включает в себя устройства электропитания, операционную часть устройств сопряжения и линейные цепи, выполняемые в виде кабельных линий. В статье подчеркнута принципиальная важность совместного рассмотрения указанных компонентов, что объясняется взаимозависимостью технических решений, принимаемых для различных уровней передачи энергии.

Комплексная оценка технических решений предполагает наличие набора критериев и показателей технической эффективности. Для силовой аппаратуры предложено семь основных критериев эффективности:

- безопасность;
- надежность;
- компактность;
- функциональная наполненность;
- энергетическая эффективность;

- стоимость комплектации;
- технологичность.

Для сравнительной оценки аппаратуры могут использоваться различные формализованные методы, но наибольший интерес представляет метод расстояний, поскольку он допускает корректировку значимости показателей, а также учитывает количественную разницу между аналогичными показателями в различных технических решениях, что дает возможность адекватной оценки при малом количестве объектов сравнения.

Ряд показателей непосредственно связан с количеством исполнительных объектов на конкретном полигоне внедрения системы. В данной статье предложена система удельных показателей, определяющих различные свойства объектов сравнения по отношению к единице управляемого напольного или постового оборудования.

Безопасность, как и надежность, традиционно оценивается с использованием вероятностных показателей. Для силовой аппаратуры дополнительно введены показатели, связанные с параметрической безопасностью, характеризующей способность устройств поддерживать электрические, частотные и временные параметры сигналов и электрических воздействий на безопасных уровнях.

В понятие компактности в первую очередь предложено включать показатели, представляющие наибольший интерес для потребителя, а именно удельный объем и площадь размещения аппаратуры. Также подчеркивается, что кроме габаритных показателей на конкурентоспособность устройств значительное влияние оказывает наличие дополнительных функций, отсутствующих в релейных системах автоматики, а также универсальность оборудования, позволяющая сокращать количество модификаций устройств.

Проблемой при оценке энергетической эффективности аппаратуры сопряжения является зависимость энергетических параметров от числа включенных исполнительных объектов, что не позволяет сводить оценку эффективности к определению потребляемой мощности или КПД. В статье предложена модель для оценки эффективности аппаратуры, основанная на собственной и объектной составляющих энергетических параметров.

Экономическая эффективность системы в значительной степени определяется стоимостью комплектации и технологичностью изделий. Учитывая современный уровень автоматизации производства электронных изделий, следует отметить уменьшение зависимости технологичности от общего количества электрических соединений (паек) в изделии. По мнению автора,

технологичность должна определяться главным образом по количеству ручных операций, в принципе не поддающихся механизации и автоматизации (проводной монтаж, сборочные операции). Не последнюю роль в экономической эффективности технических решений играют затраты на монтаж и пусконаладочные работы, выполняемые в условиях полигона внедрения. Поэтому понятие технологичности предложено распространить на работы по вводу системы в эксплуатацию, связав ее с количеством и способом выполнения межблочных соединений.

Используя предложенную систему критериев и показателей технической эффективности, можно уточнять область применения различных технических решений, определять приоритетные направления развития аппаратных средств, выбирать системы ЖАТ, в наибольшей степени удовлетворяющие тем или иным требованиям. Однако остается открытым ряд вопросов, непосредственно связанных с технической эффективностью силовой аппаратуры. Необходимо развивать методы оценки параметрической безопасности в условиях протяженных кабельных линий. Представляет значительный интерес рассмотрение проблем безопасности и энергетической эффективности в контексте организации электропитания устройств. Весьма актуальны вопросы, связанные с расширением функциональных возможностей силовой аппаратуры в части мониторинга напольных объектов.

Адекватная оценка существующих технических решений предполагает сравнение с иными концепциями построения оборудования. Экспертный метод оценки показателей, связанных с компактностью, технологичностью и стоимостью комплектации, подвержен воздействию субъективного фактора и не дает достаточно точных и достоверных результатов. Поэтому при отсутствии конкретных примеров практической реализации данные показатели должны уточняться путем проведения опытно-конструкторских работ.

Библиографический список

1. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Х. А. Христов, Д. В. Гавзов ; под ред. Вл. В. Сапожникова – М. : Транспорт, 1995. – 272 с.
2. Микропроцессорная система централизации ЭЦ-ЕМ / С. С. Пресняк, А. С. Ершов, О. Л. Маковеев, А. В. Циркин // Автоматика, связь, информатика. – 2000. – № 9. – С. 2–4.
3. Алешин В. Н. Микропроцессорная централизация стрелок и сигналов системы Ebilock-950 / В. Н. Алешин // Автоматика, связь и информатика. – 2003. – № 1. – С. 13–17.

4. Сапожников В. В. Микропроцессорная система электрической централизации МПЦ-МПК // В. В. Сапожников, А. Б. Никитин // Наука и транспорт. – 2009. – № 1. – С. 18–21.
5. Новиков Ю. В. Разработка устройств сопряжения для персонального компьютера типа IBM PC : практическое пособие / Ю. В. Новиков, О. А. Калашников, С. Э. Гуляев ; под общ. ред. Ю. В. Новикова. – М. : ЭКОМ, 1998. – 224 с.
6. Никитин А. Б. Использование малогабаритных силовых реле в безопасных устройствах сопряжения компьютерных систем железнодорожной автоматики / А. Б. Никитин, А. Н. Ковкин, А. Д. Манаков // Автоматика на транспорте. – 2018. – Том 4. – № 2. – С. 264–278.
7. Шеремет А. Д. Теория экономического анализа / А. Д. Шеремет. – М. : ИНФРА-М, 2011. – 352 с.
8. Слабинская И. А. Развитие методов сравнительного анализа и комплексной оценки финансовой устойчивости предприятий / И. А. Слабинская, О. Б. Бендерская // Вестник АГТУ. Сер. Экономика. – 2015. – № 3. – С. 134–140.
9. Сертификация и доказательство безопасности систем железнодорожной автоматики / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, В. И. Талалаев и др. ; под ред. Вл. В. Сапожникова. – М. : Транспорт, 1997. – 288 с.
10. Гавзов Д. В. Методика расчета количественных показателей безопасности микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и телемеханики / Д. В. Гавзов, Е. В. Самонина // Вестник ВНИИЖТа. – 1992. – № 5. – С. 21–25.
11. Чжоу Ч. Модели надежности и безопасности микропроцессорных систем управления / Ч. Чжоу // Железные дороги мира. – 1981. – № 10. – С. 51–57.
12. Акита Х. Безопасность и отказоустойчивость микропроцессорных систем централизации / К. Акита, Х. Накамура // Железные дороги мира. – 1991. – № 6. – С. 29–34.
13. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры : учебник для вузов / К. И. Билибин, А. И. Власов, Л. В. Журавлева и др. ; под общ. ред. В. А. Шахнова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 568 с.
14. Камышная Э. Н. Методика расчета технологичности конструкций электронной аппаратуры / Э. Н. Камышная // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2003. – № 1. – С. 116–125.
15. Никитин А. Б. Контроль целостности нитей выключенных светофорных ламп / А. Б. Никитин, А. Н. Ковкин // Актуальные вопросы развития систем железнодорожной автоматики и телемеханики : сб. науч. трудов. – СПб. : ПГУПС, 2013. – С. 80–86.
16. Никитин А. Б. Контроль исправности рабочей цепи электроприводов / А. Б. Никитин, А. Н. Ковкин // Развитие элементной базы и совершенствование методов построения устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : сб. науч. трудов. – СПб. : ПГУПС, 2014. – С. 26–30.
17. Ромаш Э. М. Источники вторичного электропитания радиоэлектронной аппаратуры / Э. М. Ромаш. – М. : Радио и связь, 1981. – 224 с.
18. Конев Ю. И. Проблемы ресурсосбережения в энергетической электронике // Ю. И. Конев // Радиопромышленность. – 1996. – № 1. – С. 5–10.
19. Конев Ю. И. Отечественная энергетическая электроника: проблемы, тенденции, достижения / Ю. И. Конев, А. Ю. Гончаров, В. А. Колосов // Электроника: наука, технология, бизнес. – 1998. – № 1. – С. 52–53.

Alexey N. Kovkin

“Automation and remote control on railways” department
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE TECHNICAL EFFICIENCY OF COMPUTER BASED RAILWAY AUTOMATION SYSTEMS POWER EQUIPMENT

This article is devoted to the issues related to the evaluation of technical efficiency of hardware of railway automation computer based systems. The necessity of joint consideration of all components of the power equipment of control is proved and its borders in the general structure of hardware are designated. The characteristic of formalized methods of comprehensive assessment as a means for comparison of technical solutions is given. A system of specific criteria and indicators of technical efficiency of power equipment, developed taking into account the specifics of the industry; it allows to make a comparative assessment of the various concepts of construction of hardware.

interface device, power control equipment, technical efficiency, distance method, specific criteria, performance indicators, parametric safety, own power, object power.

References

1. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Hristov H. A., Gavsov D. V. (1995) Methods of construction of safe microelectronic systems of railway automation [Metody postroeniya bezopasnykh mikroelektronnykh sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki], Edition Sapozhnikov V. V. – Moscow: Transport, 1995. – 272 p.
2. Presnyak S. S., Ershov A. S., Makoveev O. L., Tsirkin A. V. (2000) Microprocessor system of centralization of EC-EM [Mikroprotsessornaya sistema tsentralizatsii ETS-EM] Automation, communication, Informatics [Avtomatika, svyaz, informatika]. 2000. Issue 9.
3. Aleshin V. N. (2003) Microprocessor centralization of points and signals of Ebilock-950 system [Mikroprotsessornaya tsentralizatsiya strelok i signalov sistemy Ebilock-950], Automation, communication and Informatics [Avtomatika, svyaz, informatika]. 2003. Issue 1.
4. Sapozhnikov V. V., Nikitin A. B. (2009) Microprocessor system of electrical centralization MPC-MPK [Mikroprotsessornaya sistema elektricheskoy tsentralizatsii MPTS-MPK], Science and transport [Nauka i transport]. – 2009. – 18–21 Pp.
5. Novikov Yu. V., Kalashnikov O. A., Gulyaev S. E. (1998) Development of interface devices for a personal computer such as IBM PC [Razrabotka ustrojstv sopryazheniya dlya personalnogo kompyutera tipa IBM PC] Edition Y. V. Novikov. Practical guide. – Moscow: EKOM, 1998. – 224 p.
6. Nikitin A. B., Kovkin A. N., Manakov A. D. (2018) The use of small-sized power relays in the safe interface devices of computer systems of railway automation [Ispolzovanie malogabaritnykh silovykh rele v bezopasnykh ustrojstvakh sopryazheniya kompyuternykh sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki], Automation on transport [Avtomatika na transporte]. 2018. Issue 2. Vol. 4.
7. Sheremet A. D. (2011) Theory of economic analysis [Teoriya ekonomicheskogo analiza]. – Moscow: INFRA-M, 2011. – 352 p.
8. Slabinskaya I. A., Benderskaya O. B. (2015) The development of methods of comparative analysis and comprehensive assessment of financial stability of enterprises [Razvitie metodov sravnitel'nogo analiza i kompleksnoj otsenki finansovoj ustojchivosti predpriyatij], Vestnik of Astrakhan State Technical University [Vestnik Astrakhanskiy gosudarstvennyy tekhnicheskij universitet]. Series: Economy. 2015. Issue 3.

9. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Talalaev V. I. et al (1997) Certification and proof of safety of railway automation systems [Sertifikatsiya i dokazatelstvo bezopasnosti sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki] Edition Sapozhnikov V. V. – Moscow: Transport, 1997. – 288 p.
10. Gavzov D. V., Samonina E. V. (1992) The method of calculation of the quantitative safety performance of microprocessor systems of railway automatics and telemechanics [Metodika rascheta kolichestvennykh pokazatelej bezopasnosti mikroprotsessornykh sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki], Vestnik of the Railway Research Institute [Vestnik Nauchno-issledovatel'skiy institut zheleznodorozhnogo transporta]. 1992. Issue 5. 21–25 pp.
11. Zhou H. (1981) Model of reliability and safety microprocessor-based control systems [Modeli nadezhnosti i bezopasnosti mikroprotsessornykh sistem upravleniya], Railways of the world [Zheleznye dorogi mira]. 1981. Issue 10. Pp. 51–57.
12. Akita K., Nakamura H. (1991) Security and fault tolerance of microprocessor centralization systems [Bezopasnost i otkazoustojchivost mikroprotsessornykh sistem tsentralizatsii], Railways of the world [Zheleznye dorogi mira]. 1991. Issue 6. – Pp. 29–34.
13. Bilibin K. I., Vlasov A. I., Zhuravleva L. V. et al. Design and technological design of electronic equipment [Konstruktorsko-tehnologicheskoe proektirovanie elektronnoj apparatury], Textbook for universities, Edition Shakhnova V. A. – M., 2005. – 568 p.
14. Kamyshnaya E. N. (2003) Method of calculating the manufacturability of electronic equipment designs [Metodika rascheta tekhnologichnosti konstruksij elektronnoj apparatury], Bulletin of the Moscow state technical University. N. E. Bauman [Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni N. E. Baumana.]. Series: Instrument making. 2003. Issue 1. 116–125 p.
15. Nikitin A. B., Kovkin A. N. (2013) Operability control filaments of switched-off traffic lights. Topical issues of railway automation and telemechanics systems development. Collection of proceedings [Kontrol tselostnosti nitej vyklyuchennykh svetofornykh lamp. Aktualnye voprosy razvitiya sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki]. – St. Petersburg: Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university [PGUPS], 2013.
16. Nikitin A. B., Kovkin A. N. (2014) Control of operability of a working circuit of electric drives: development of element base and improvement of methods of construction of devices of railway automatic equipment and telemechanics [Kontrol' ispravnosti rabochej tsepi elektroprivodov: Razvitie elementnoj bazy i sovershenstvovanie metodov postroeniya ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki]. Collection of proceedings. – St. Petersburg: Publishing house of Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university [PGUPS], 2014.
17. Romash E. M. (1981) Sources of secondary power supply of electronic equipment [Istochniki vtorichnogo elektropitaniya radioelektronnoj apparatury]. Moscow: Radio and communication [Radio i svyaz], 1981. – 224 p.
18. Konev Yu. I. (1996) Problems of resource saving in power electronics [Problemy resursosberezheniya v energeticheskoy elektronike], Radio industry [Radiopromyshlennost], 1996, Issue 1. 5–10 p.
19. Konev Yu. I., Goncharov A. Yu., Kolosov V. A (1998) Domestic power electronics: problems, trends, achievements [Otechestvennaya energeticheskaya elektronika: problemy, tendentsii, dostizheniya], Electronics: Science, Technology, Business [Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes], 1998, Issue 1.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии А. Б. Никитиным.
Поступила в редакцию 04.03.2019, принята к публикации 22.04.2019.*

КОВКИН Алексей Николаевич – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.
e-mail: akovkin@yandex.ru

© Ковкин А. Н., 2019

УДК 681.518.5:004.052.32

А. Н. Ковкин, канд. техн. наук

Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I, Санкт-Петербург

БЕСКОНТАКТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СВЕТОФОРАМИ В СИСТЕМЕ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ЦЕНТРАЛИЗАЦИИ МПЦ–МПК

Рассмотрена практическая реализация бесконтактных устройств сопряжения на примере аппаратуры управления светофорами железных дорог и метрополитенов в системе микропроцессорной централизации МПЦ–МПК. Описаны общие принципы построения силовых модулей, обеспечивающих непосредственное управление напольными объектами. Особое внимание уделено способам решения специфических проблем, возникающих при бесконтактном управлении удаленными светофорами, а также при реализации функции контроля горения сигнальных показаний без использования огневых реле.

микропроцессорная централизация, бесконтактные устройства сопряжения, силовой модуль, безопасный логический элемент, генератор управляющих сигналов, преобразовательная схема, гальваническая развязка, контроль горения, контроль холодной нити, времязадающая цепь.

DOI: 10.20295/2412-9186-2019-5-3-307-325

Введение

Безопасность микропроцессорных систем ЖАТ достигается путем реализации вычислительных средств в виде многоканальной структуры и использования в устройствах сопряжения с объектами специальных технических решений, исключающих ложную активизацию исполнительных объектов при возникновении отказов [1, 2]. Известны различные принципы построения устройств сопряжения для безопасных систем. Наиболее простым и очевидным путем реализации безопасного сопряжения с объектами является построение аппаратуры сопряжения на основе реле первого класса надежности [3]. Такой принцип обеспечения безопасности используется в отечественных разработках [4], но в силу значительных габаритов аппаратуры, ограниченной возможности использования печатного монтажа и необходимости периодического обслуживания не может рассматриваться в качестве конкурентоспособного варианта. Зарубежные разработчики используют для сопряжения

с объектами иные технические решения, не предусматривающие использование специфичной релейной аппаратуры [5].

Одним из вариантов является применение малогабаритных реле с жестко связанными контактными группами (safety relay), адаптированных для печатного монтажа, что позволяет создавать относительно компактные и технологичные устройства сопряжения, безопасность которых основана на принципе избыточности в сочетании с контролем фактического размыкания контактов [6]. Практическая реализация подобных решений осложняется тем, что указанные реле выпускаются сравнительно небольшим количеством производителей и не имеют отечественных аналогов. Поэтому перспективным направлением развития микропроцессорных систем ЖАТ в нашей стране считается использование бесконтактных устройств сопряжения [7].

Основополагающие принципы обеспечения безопасности при бесконтактном сопряжении с объектами достаточно хорошо известны. Безопасность при возникновении отказов реализуется или путем тестирования полупроводниковых ключей с гарантированным отключением питания при обнаружении отказа, или за счет использования преобразовательных схем, формирующих напряжение для исполнительных объектов в результате динамической работы коммутационных элементов. Интерес представляют способы практической реализации бесконтактных устройств сопряжения, обеспечивающие решение различных сопутствующих проблем. Кроме того, требуют рассмотрения вопросы, связанные с контролем состояния напольных объектов без использования релейно-контактной элементной базы.

Одной из современных разработок в области железнодорожной автоматики, предусматривающих бесконтактное сопряжение с объектами, является система МПЦ-МПК (микропроцессорная централизация на основе микроЭВМ и программируемых контроллеров), разработанная специалистами Петербургского университета путей сообщения [8]. Система предназначена для централизованного управления стрелками и сигналами на станциях магистрального и промышленного железнодорожного транспорта, а также на линиях метрополитенов. Для бесконтактного сопряжения с объектами используются функциональные преобразователи с несимметричным отказом, получающие питание от источников постоянного напряжения. Такой принцип бесконтактного сопряжения с объектами не требует программно-аппаратной реализации контроля исправности полупроводниковых коммутационных элементов и удачно сочетается с современными системами бесперебойного

электропитания на основе шины постоянного тока. Вместе с тем использование преобразовательных устройств требует особого внимания к вопросам безопасности при управлении удаленными объектами, поскольку необходимо учитывать опасное влияние сообщений между кабельными жилами на работу бесконтактных схем управления, наличие высокочастотных гармоник в выходном напряжении, возможность повышения частоты напряжения на выходе устройств при отказе элементов [9].

В современных системах автоматики взаимодействие между вычислительными средствами и устройствами сопряжения реализуется с помощью стандартных интерфейсов, предусматривающих минимальное количество физических цепей. Это определяет необходимость использования в составе устройств сопряжения программируемой элементной базы, реализующей последовательный обмен данными. В системе МПЦ-МПК сопряжение вычислительного комплекса с объектами управления и контроля реализуется с помощью *контроллеров безопасного сопряжения с объектами (КБСО)*. В состав КБСО входит *контроллерный модуль*, являющийся частью вычислительных средств и осуществляющий взаимодействие аппаратуры сопряжения и *центральной вычислительной системы (ЦВС)* с помощью последовательного интерфейса, а также набор *силовых модулей*, реализующих непосредственное управление напольными объектами. Отличительной чертой бесконтактных устройств сопряжения является специфичность силовой аппаратуры, управляющей различными типами исполнительных объектов. В данной статье рассматриваются особенности построения силовых модулей системы МПЦ-МПК, осуществляющих управление светофорами на объектах железнодорожного транспорта и метрополитена.

1. Общие принципы построения силовых модулей в системе микропроцессорной централизации МПЦ-МПК

В основе системы МПЦ-МПК лежит дублированная безопасная вычислительная структура, реализующая управление объектами по принципу «два из двух», при котором активизация исполнительного объекта возможна лишь при наличии соответствующих управляющих сигналов в двух каналах. Для осуществления данного принципа используются различные по схемным решениям безопасные логические элементы, реализующие функцию «И» [10, 11]. В системе МПЦ-МПК безопасные логические элементы

(БЛЭ) входят в состав силовых модулей, осуществляющих бесконтактное управление стрелками и светофорами (рис. 1).

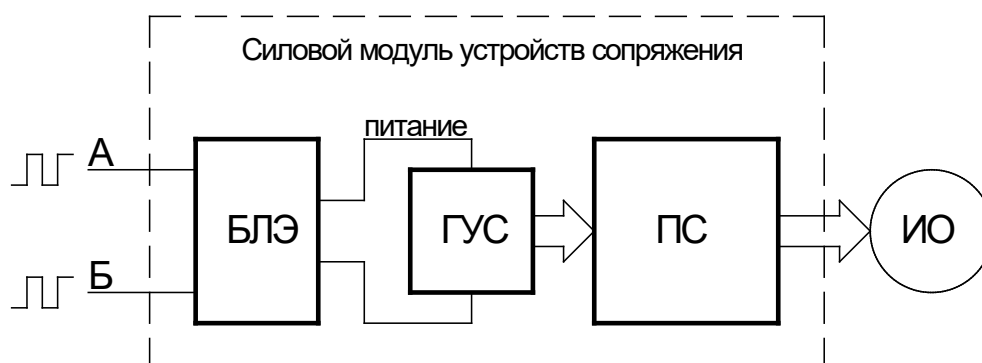


Рис. 1. Структура управляющей схемотехники силовых модулей системы МПЦ-МПК

Входными сигналами силовых модулей являются периодические импульсные последовательности с частотой 10 кГц, поступающие от двухканальной вычислительной структуры. При наличии динамических сигналов на обоих входах на выходе БЛЭ формируется постоянное напряжение. Указанное напряжение обеспечивает питание генератора управляющих сигналов (ГУС), формирующего импульсы, управляющие силовыми ключами преобразовательной схемы (ПС). Напряжение, формируемое ПС, активизирует исполнительный объект (ИО). В случае отсутствия динамического сигнала хотя бы на одном из входов силового модуля постоянное напряжение на выходе БЛЭ отсутствует, питание на схему ГУС не подается и все силовые ключи ПС не получают управляющих воздействий, что является необходимым и достаточным условием для гарантированного нахождения ИО в выключенном состоянии.

Принципиально важным моментом является то, что ПС под воздействием сигналов от схемы ГУС формирует переменное напряжение низкой частоты. Это позволяет минимизировать взаимные влияния в кабельной сети при управлении удаленными объектами. Схемотехника БЛЭ работает на высоких частотах, за счет чего достигается сокращение габаритов элементной базы.

Основным требованием к безопасным логическим элементам, применяемым в дублированных безопасных структурах, можно считать исключение формирования выходного сигнала при отсутствии динамического сигнала хотя бы на одном из входов, вне зависимости от наличия отказов в схеме. Указанное требование определяет необходимость использования схемных

решений с однонаправленным отказом. В системе МПЦ-МПК безопасность логического элемента достигается за счет использования преобразовательных схем [12, 13]. Функциональная схема БЛЭ приведена на рисунке 2.

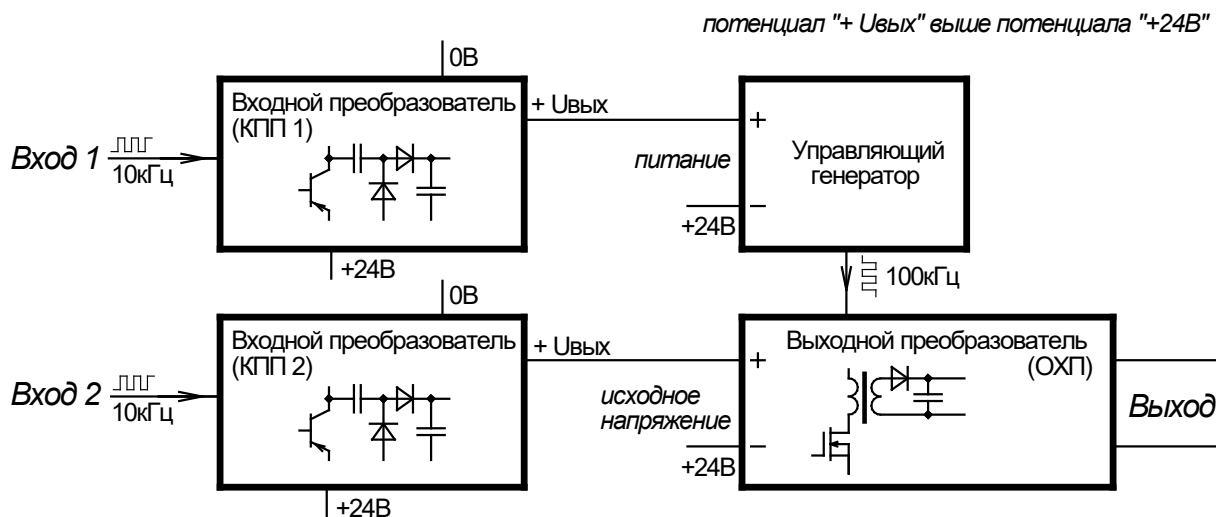


Рис. 2. Функциональная схема БЛЭ

В состав данной схемы входят три преобразователя – два входных и один выходной. Входные преобразователи предназначены для контроля наличия динамических сигналов на входах БЛЭ и представляют собой конденсаторные преобразователи полярности (КПП), широко используемые в различных схемотехнических решениях с несимметричным отказом. Выходной преобразователь осуществляет формирование постоянного напряжения и представляет собой обратноходовой преобразователь (ОХП), включающий в себя малогабаритный импульсный трансформатор. При поступлении на входы БЛЭ динамических сигналов от вычислительной системы КПП формируют постоянные напряжения заданной полярности. Напряжение с выхода КПП1 осуществляет питание управляющего генератора, обеспечивающего переключение коммутационного элемента в схеме выходного преобразователя. Напряжение с выхода КПП2 преобразуется в схеме ОХП и поступает на выход БЛЭ. Если на одном из входов БЛЭ отсутствует динамический сигнал, выходной преобразователь не получает либо управляющее воздействие, либо исходное напряжение для преобразования, значит постоянное напряжение на выходе БЛЭ будет отсутствовать.

2. Силовой модуль для управления светофорными лампами накаливания и светодиодными аналогами

Бесконтактное управление излучателями стационарных светофоров в системе МПЦ-МПК осуществляется с помощью силовых модулей С-4-2. Силовой модуль обеспечивает управление четырьмя светофорными лампами накаливания мощностью 15 Вт или светодиодными аналогами, электрические характеристики которых совпадают с параметрами указанных ламп. В случае использования в кабельной сети светофоров сигнально-блокировочного кабеля парной скрутки максимальная дальность управления светофорами составляет 4 км. Кроме того, силовой модуль реализует контроль горения включенных ламп и светодиодных аналогов, а также контроль целостности холодных нитей выключенных ламп накаливания. При использовании двухнитевых ламп возможно резервирование аппаратуры. В этом случае выходы силового модуля основного комплекта подключаются к одним нитям ламп, а выходы силового модуля резервного комплекта – к другим нитям тех же ламп.

Силовой модуль состоит из четырех одинаковых каналов, реализующих управление одной светофорной лампой. Каждый канал включает в себя схему БЛЭ, инвертор, схему контроля горения (КГ) и схему контроля холодной нити (КХН). Функциональная схема одного канала силового модуля приведена на рисунке 3.

Преобразовательная схема в данном силовом модуле образована инвертором, обеспечивающим формирование выходного напряжения силового модуля путем преобразования постоянного напряжения в переменное напряжение прямоугольной формы и представляющим собой двухтактную схему преобразования с трансформатором [14]. В состав инвертора входит также генератор управляющих сигналов, получающий питание от энергии выходного сигнала БЛЭ. В качестве коммутационных элементов инвертора используются полевые транзисторы с изолированным затвором, что позволяет существенно упростить задачу формирования управляющих сигналов.

При работе инвертора на выходах силового модуля формируется переменное напряжение 100 Гц 110 В. Увеличение частоты напряжения до 100 Гц позволило уменьшить габариты трансформаторов, входящих в состав ПС. Применение пониженной величины напряжения объясняется необходимостью ослабления влияния на соседние цепи линии через емкость кабеля в

условиях несинусоидальных воздействий [15]. Для подключения светофорных ламп используются серийно выпускаемые сигнальные трансформаторы СТ-4 с первичной обмоткой, рассчитанной на напряжение 110 В.

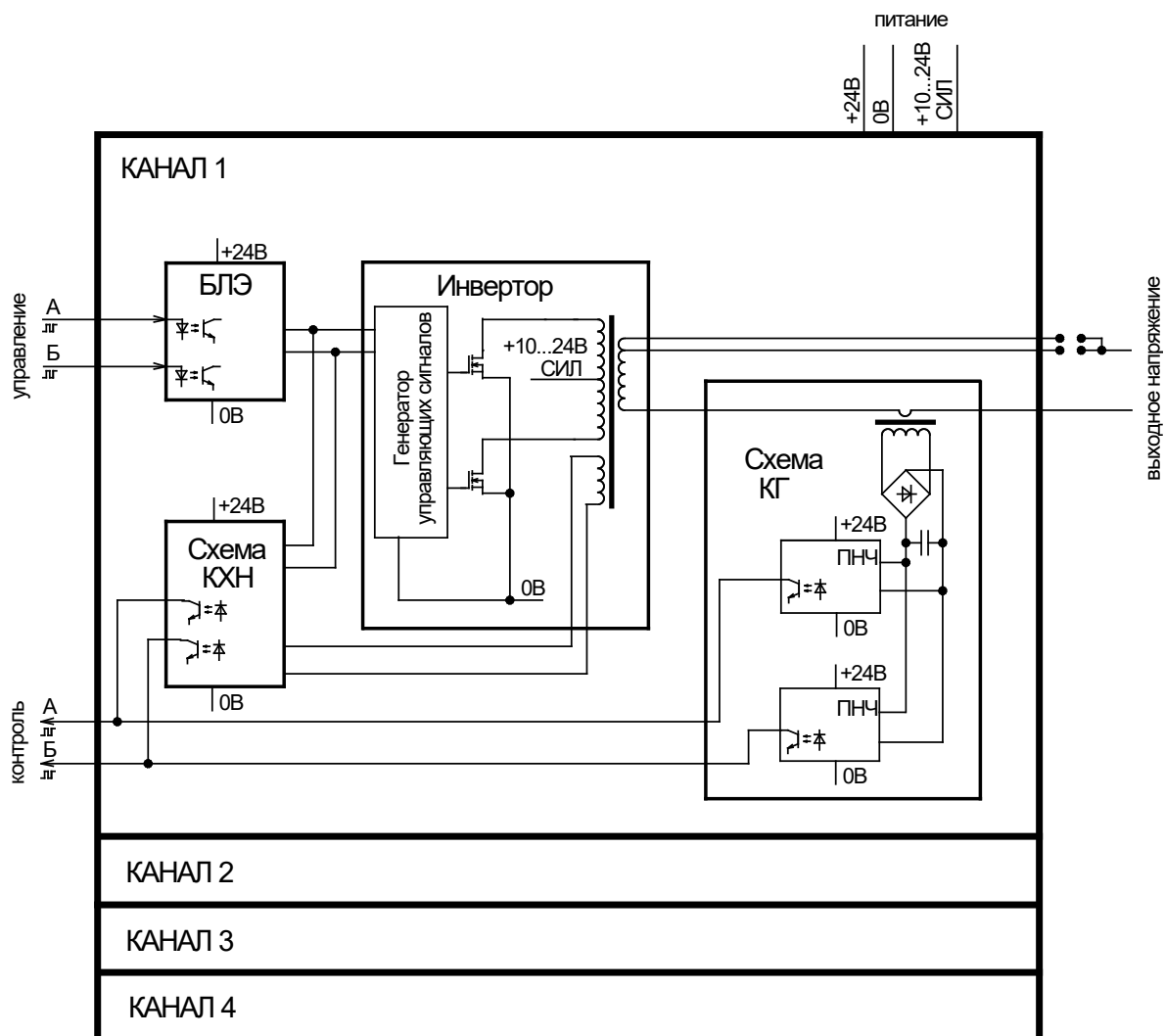


Рис. 3. Функциональная схема силового модуля для управления светофорными лампами

В связи с тем, что лампы подключаются через сигнальные трансформаторы, появление постоянного напряжения в кабельной сети не может привести к ложному включению лампы. Использование трансформаторной схемы преобразования в составе аппаратуры управления объясняется необходимостью гальванической развязки источника силового питания относительно кабельной сети светофоров и позволяет исключить возникновение опасных ситуаций при одиночных замыканиях между кабельными жилами

различных сигнальных показаний [12]. Иными словами, трансформатор создает эффект, аналогичный двухполюсному размыканию цепи в релейных системах централизации. Вторичная обмотка трансформатора имеет дополнительную секцию, используемую совместно с основной обмоткой с целью повышения выходного напряжения при управлении светофорами, удаленными свыше 3 км. Подключение дополнительной секции обмотки реализуется соответствующей установкой переключки.

Схема КГ предназначена для контроля фактического включения светового излучателя. Работа схемы КГ основана на измерении тока, протекающего в выходной цепи силового модуля [16]. Данная схема содержит трансформатор тока, включенный в выходную цепь. Вторичная обмотка трансформатора тока нагружена на выпрямительную схему. Напряжение с выхода выпрямительной схемы поступает на два преобразователя напряжение-частота (ПНЧ), формирующих динамические сигналы, частота которых определяется током в выходной цепи. Указанные динамические сигналы через контрольные выходы силового модуля поступают в каналы вычислительных средств. Использование преобразователей напряжение-частота дает возможность осуществлять оценку величины тока в выходной цепи модуля, что позволяет выявлять такие отказы в цепях световых излучателей, как обрыв и короткое замыкание. Безопасность функционирования схемы КГ обеспечивается использованием двух независимых ПНЧ, формирующих динамические сигналы для различных каналов безопасной структуры. В выходных цепях ПНЧ предусмотрена оптоэлектронная развязка. Возможность ложного формирования динамических сигналов на контрольных выходах силового модуля при отсутствии тока в выходной цепи исключается за счет организации питания светоизлучающих диодов в составе элементов оптоэлектронной развязки от энергии входного сигнала ПНЧ.

Контроль холодных нитей световых ламп осуществляется путем анализа реакции цепи при подаче в выходные цепи модуля коротких импульсов высокой скважности [17, 18]. Импульсы подаются через дополнительную обмотку трансформатора в схеме инвертора. Формирование импульсов и анализ реакции осуществляется схемой КХН. Опасное влияние КХН на выключенную световую лампу исключается путем ограничения энергии импульсов. В случае целостности нити лампы КХН формирует динамический сигнал, который подается на выходы силового модуля, используемые для контроля горения. Указанный сигнал отличается по временным

параметрам от сигнала, формируемого при горении лампы, и интерпретируется программным обеспечением как исправное состояние холодной нити. Для того чтобы при включенном сигнальном показании схема КХН не оказывала мешающего влияния на работу инвертора и схемы КГ, формирование импульсов блокируется сигналом, возникающим на выходе БЛЭ.

Питание силового модуля осуществляется постоянным напряжением от двух источников питания. Один источник питания условно называется логическим, другой – силовым. Логический источник используется для питания БЛЭ, ПНЧ в схеме КГ, а также схемы КХН. Энергия силового источника после преобразования в инверторе передается к исполнительным объектам. Номинальное напряжение логического источника питания составляет 24 В. Напряжение силового источника питания может изменяться в пределах от 10 до 24 В в зависимости от режима работы светофоров («день», «ночь», ДСН).

3. Особенности управления светодиодными излучателями ИСМПЛ

Светодиодные излучатели для использования в метрополитене (ИСМПЛ, далее – излучатели) используются на подземных линиях метрополитенов [19]. Излучатели рассчитаны на работу в цепях переменного тока с номинальным напряжением 30 В. Структурная схема излучателя представлена на рис. 4. Входная цепь реализует выпрямление и сглаживание напряжения. Светодиодная матрица (СДМ) образована четырьмя ветвями по два светодиода в каждой. Схема управления СДМ осуществляет включение и выключение матрицы при достижении входным напряжением определенных значений. Кроме того, схема управления осуществляет стабилизацию напряжения на включенной СДМ, обеспечивая постоянство величины тока, протекающего через светодиоды.

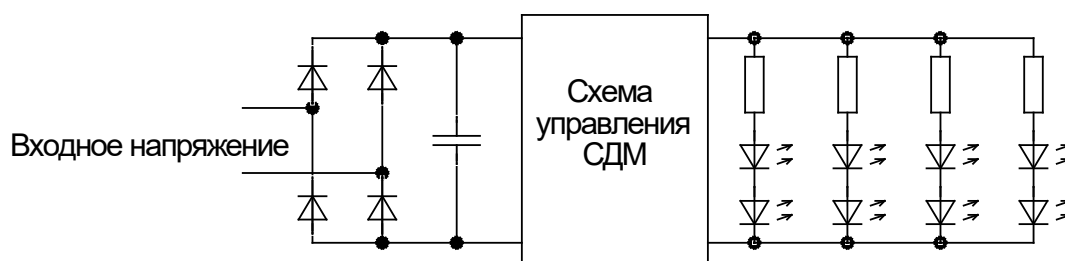


Рис. 4. Структура излучателя ИСМПЛ

В системе МПЦ-МПК рассматриваемые излучатели работают на постоянном напряжении. В условиях значительной протяженности кабельных ли-

ний применение постоянного напряжения является предпочтительным, поскольку существенно снижает вероятность подсветки выключенных сигнальных показаний по причине взаимных влияний между цепями. Кроме того, при использовании постоянных напряжений упрощается задача резервирования аппаратуры, поскольку существует возможность параллельного соединения выходов устройств.

Минимальное допустимое напряжение ограничено возможностью поддержания заданной величины тока через светодиоды. Максимальное напряжение на включенном излучателе определяется по условию допустимого нагрева элементной базы излучателя. Величина напряжения на входе излучателя в значительной степени зависит от сопротивления кабельной линии. Поэтому аппаратура управления удаленными светофорами должна обеспечивать возможность регулировки выходного напряжения.

Управление излучателями в системе МПЦ-МПК осуществляется с помощью силовых модулей С-4-3 (рис. 5).

Один модуль обеспечивает бесконтактное управление четырьмя излучателями. В случае использования в кабельной сети светофоров сигнально-блокировочного кабеля парной скрутки максимальная дальность управления светофорами может достигать 3...5 км в зависимости от типа излучателя. Силовой модуль позволяет осуществлять контроль фактического протекания тока в цепи включенных излучателей, что рассматривается как функция контроля горения сигнального показания.

Силовой модуль С-4-3 состоит из четырех одинаковых каналов. Каждый канал включает в себя схему БЛЭ, инвертор и схему контроля горения (КГ), аналогичные соответствующим узлам модуля С-4-2. Безопасность функционирования силового модуля С-4-3 в части управления и контроля базируется на тех же принципах, что и безопасность модуля С-4-2. В данном силовом модуле функция трансформатора состоит не только в гальванической развязке цепей, но и в предотвращении появления постоянного напряжения в выходной цепи при пробое силовых ключей инвертора.

Основное отличие силового модуля С-4-3 состоит в том, что в структуре устройства предусмотрена выпрямительная схема, обеспечивающая формирование постоянного выходного напряжения, кроме того, отсутствует схема КХН. Вторичная обмотка трансформатора в схеме инвертора имеет несколько дополнительных секций, что обеспечивает возможность ступенчатого регулирования выходных напряжений в зависимости от длины кабельной линии.

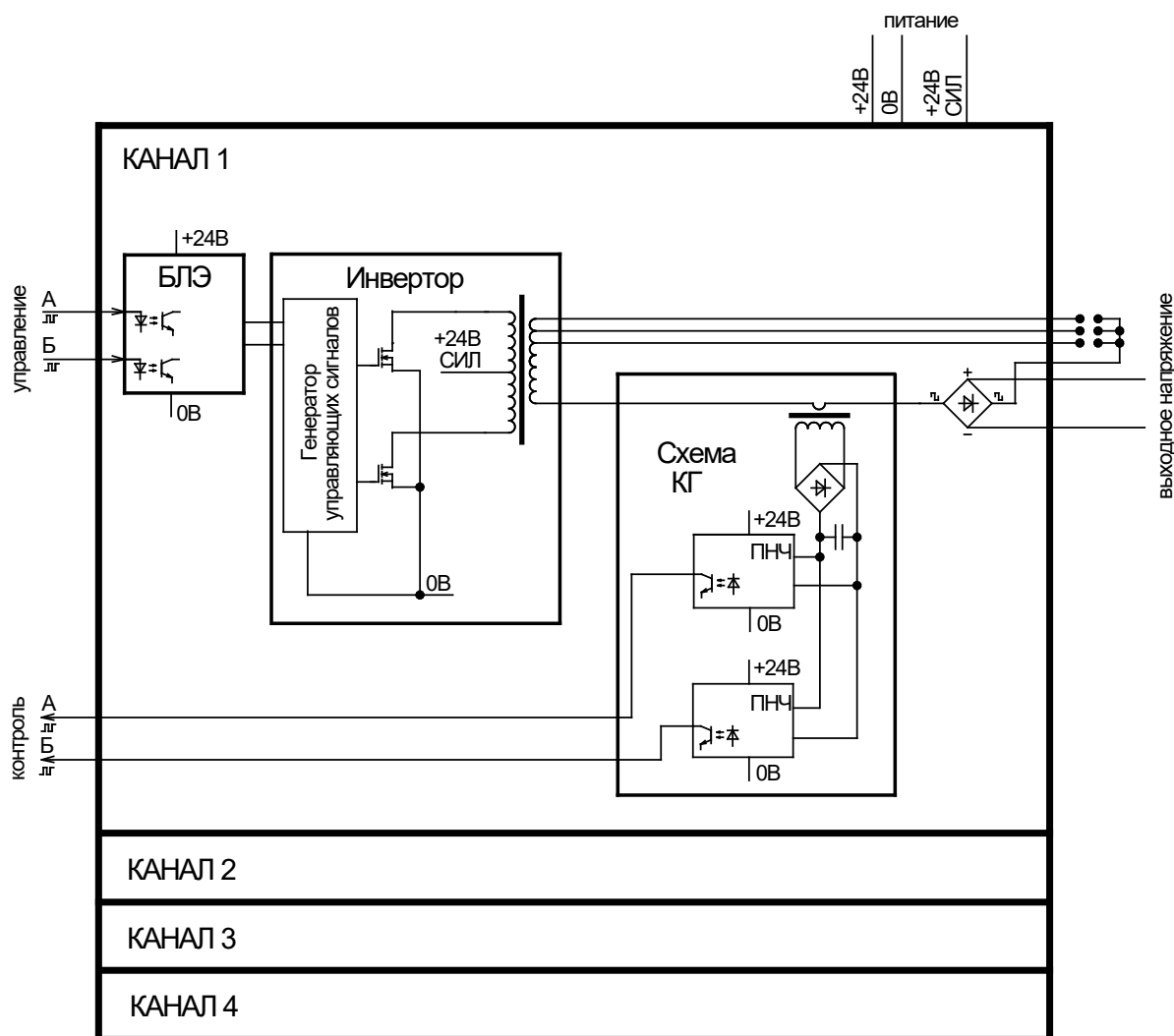


Рис. 5. Функциональная схема силового модуля для управления излучателями ИСМПЛ

4. Безопасное формирование управляющих сигналов для силовых ключей инвертора

При использовании преобразовательных схем для управления светофорами необходимо уделять особое внимание параметрической безопасности в условиях протяженных кабельных линий [12]. Основным фактором, влияющим на безопасность, является возможность взаимных влияний между цепями через емкость кабельной линии. В связи с этим необходимо исключать возможность значительного повышения частоты выходного напряжения при возникновении отказов элементов времязадающих цепей (ВЗЦ) в генераторах управляющих сигналов.

Положительного результата в отношении безопасности можно добиться путем использования схемных решений с двумя ВЗЦ, определяющими продолжительность отдельных частей рабочего цикла генератора. В этом случае при одиночном отказе будет сокращаться либо длительность импульса, либо длительность паузы, значит частота сигнала на выходе генератора увеличится не более чем в два раза. Кроме того, если такой генератор управляет двухтактной схемой преобразования с трансформатором, нарушение идентичности управляющего сигнала в плечах схемы приведет к резкому увеличению потребляемого тока и ухудшению эффективности работы преобразователя. Из этого следует, что отказ может быть обнаружен в результате срабатывания защиты от перегрузок, а возрастание частоты при отказе будет частично компенсироваться снижением выходного напряжения.

В рассматриваемых силовых модулях генератор с двумя ВЗЦ реализован в виде симметричного мультивибратора на транзисторах (рис. 6). В схеме мультивибратора содержится подстроечный резистор, с помощью которого можно добиться равной продолжительности импульсов на силовых ключах инвертора в условиях возможного отклонения параметров элементов. Это дает возможность использования в схеме конденсаторов с допуском на величину емкости до 20 %.

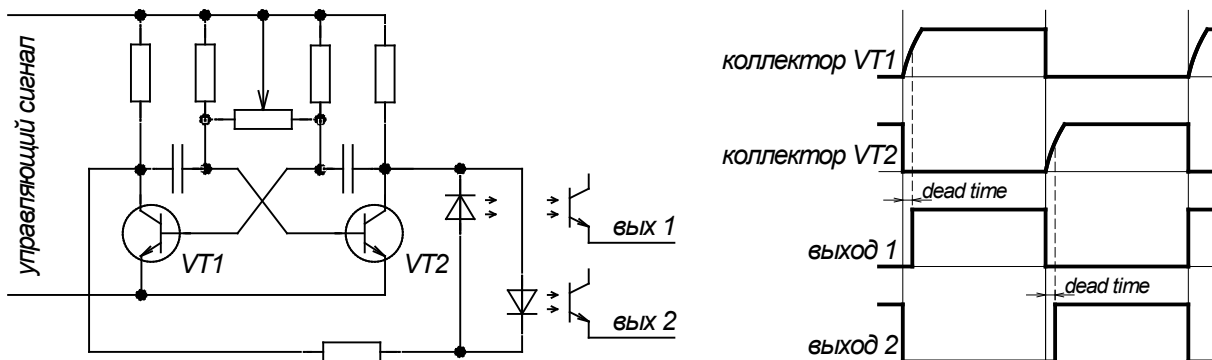


Рис. 6. Схема генератора управляющих сигналов

Оптоэлектронная развязка в выходных цепях мультивибратора повышает помехозащищенность схемы и исключает ложную подачу питания на генератор при возникновении одиночного замыкания на печатной плате устройства. Включение светодиодов оптронов между коллекторами транзи-

сторов VT1 и VT2 способствует незначительному уменьшению длительности импульсов на обоих выходах генератора. Это обеспечивает наличие так называемого «мертвого времени», в течение которого закрыты оба ключа инвертора, что необходимо для предотвращения появления сквозных токов в двухтактной преобразовательной схеме. Выходные сигналы генератора в аппаратуре МПЦ-МПК подаются на силовые ключи через драйверные ИМС (на рисунках не показаны). Это позволяет реализовать электронную защиту силовых ключей от перегрузок и коротких замыканий.

Преимуществом генератора на транзисторах по сравнению с аналогичными решениями на интегральных микросхемах является «прозрачность» схемы с точки зрения доказательства безопасности. При такой реализации генератора есть возможность анализировать поведение устройства при любых отказах элементов, а также имитировать отказы в ходе испытаний образцов изделий на безопасность.

Заключение

Силовые модули аппаратуры сопряжения с объектами в составе системы МПЦ-МПК построены на основе преобразовательных схем, формирующих напряжение, необходимое для работы исполнительных объектов. Управление силовыми ключами преобразовательных схем осуществляется с помощью генераторов управляющих сигналов, получающих питание от безопасных логических элементов «И», обеспечивающих обработку сигналов в дублированной структуре управления.

Особенностью силовых модулей, осуществляющих управление светофорами, является наличие низкочастотных трансформаторов в составе преобразовательных схем, обеспечивающих гальваническую развязку источника питания относительно линейных цепей и предотвращающих ложную активизацию выключенных сигнальных показаний при замыканиях в кабельной сети. Силовые модули, используемые для управления железнодорожными светофорами, формируют пониженные напряжения, равные 110 В, что исключает подсветку ненадлежащих показаний вследствие емкостных связей между цепями. Опасное увеличение частоты выходных напряжений силового модуля вследствие отказов исключается путем построения генератора управляющих сигналов на основе схемных решений с двумя времязадающими цепями.

Модули, осуществляющие управление светодиодными излучателями ИСМПЛ, эксплуатируемыми на подземных линиях метрополитенов, обеспечивают постоянное выходное напряжение с номинальной величиной 30 В. Использование постоянного напряжения снижает остроту проблем, связанных с взаимными влияниями между цепями, и облегчает задачу резервирования аппаратуры.

Все силовые модули, управляющие светофорами, осуществляют также контроль горения сигнальных показаний путем измерения величины тока в выходной цепи устройств. В схемах контроля горения используются трансформаторы тока и дублированные преобразователи напряжение-частота. Такое решение позволяет с высокой достоверностью обнаруживать перегорание ламп, обрывы цепей и короткие замыкания. При управлении лампами накаливания реализуется функция контроля холодной нити. Состояние холодной нити определяется по реакции цепи на воздействие коротких импульсов напряжения.

Рассмотренная аппаратура позволяет осуществлять бесконтактное управление всеми станционными светофорами, кроме входных, поскольку последние требуют реализации резервного питания запрещающих показаний от местного источника. Управление входными светофорами в системе МПЦ-МПК реализуется путем релейного сопряжения с использованием типовых схем релейных шкафов. Дальность управления излучателями ИСМПЛ позволяет реализовать в рамках МПЦ-МПК функции автоблокировки с централизованным управлением сигналами, что значительно повышает эффективность внедрения системы на метрополитенах.

Отличительной чертой аппаратуры управления светофорами в последних версиях системы МПЦ-МПК является идентичность технических решений, используемых для управления разрешающими и запрещающими показаниями. Это обеспечивает унификацию устройств сопряжения и позволяет управлять с помощью одних и тех же аппаратных средств светофорами с различным набором сигнальных показаний. Адаптация технических средств к особенностям алгоритмов управления конкретными светофорами реализуется на уровне программного обеспечения системы.

Конструктивное исполнение аппаратуры МПЦ-МПК обеспечивает приемлемые габаритные показатели в сочетании с высокой технологичностью и удобством обслуживания в процессе эксплуатации. Силовые модули управления светофорами реализованы в закрытых конструктивах «Евромеханика», обеспечивающих возможность быстрой замены

устройств. Оптимальное использование монтажного пространства внутри металлического корпуса модуля достигается за счет выполнения низкочастотных трансформаторов в преобразовательных схемах на кольцевых сердечниках. В габаритах силового модуля 51×250×262 мм реализовано управление четырьмя лампами, что соответствует двум маневровым светофорам или одному выходному светофору с маневровым показанием и одним желтым огнем. В состав светофорного КБСО входит три силовых модуля. Габариты стандартного электротехнического шкафа позволяют разместить до 10 светофорных КБСО.

Использование трансформаторов в выходных цепях силовых модулей не только обеспечивает безопасность, но и способствует повышению устойчивости аппаратуры к воздействию перенапряжений со стороны линейных цепей. Высокие показатели надежности аппаратуры управления светофорами подтверждаются многолетним опытом эксплуатации силовых модулей в составе системы МПЦ-МПК на станциях магистрального и промышленного железнодорожного транспорта, а также на объектах петербургского метрополитена.

Библиографический список

1. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Х. А. Христов, Д. В. Гавзов ; под ред. Вл. В. Сапожникова. – М. : Транспорт, 1995. – 272 с.
2. Безопасность железнодорожной автоматики и телемеханики. Методы и принципы обеспечения безопасности микроэлектронных СЖАТ. РТМ 32 ЦШ 1115842.01-94. – СПб. : ПГУПС, 1994. – 120 с.
3. Построение устройств согласования электронных схем управления с исполнительными реле / А. С. Переборов, М. П. Лисовский, А. А. Прокофьев // Автоматика, телемеханика и связь. – 1982. – № 5. – С. 7–11.
4. Микропроцессорная система централизации ЭЦ-ЕМ / С. С. Пресняк, А. С. Ершов, О. Л. Маковеев, А. В. Циркин // Автоматика, связь, информатика. – 2000. – № 9. – С. 2–4.
5. Алешин В. Н. Микропроцессорная централизация стрелок и сигналов системы Ebilock-950 / В. Н. Алешин // Автоматика, связь и информатика. – 2003. – № 1. – С. 13–17.
6. Никитин А. Б. Использование малогабаритных силовых реле в безопасных устройствах сопряжения компьютерных систем железнодорожной автоматики / А. Б. Никитин, А. Н. Ковкин, А. Д. Манаков // Автоматика на транспорте. – 2018. – Том 4. – № 2. – С. 264–278.
7. Бесконтактные устройства сопряжения микропроцессорных систем железнодорожной автоматики с напольными объектами / О. К. Дрейман, Д. В. Гавзов, М. В. Илюхин // Автоматика, телемеханика и связь. – 1991. – № 1. – С. 12–14.

8. Сапожников В. В. Микропроцессорная система электрической централизации МПЦ-МПК / В. В. Сапожников, А. Б. Никитин // Наука и транспорт. – 2009. – № 1. – С. 18–21.
9. Гавзов Д. В. Бесконтактные УСО для микропроцессорных централизаций / Д. В. Гавзов, А. Н. Ковкин // Проблемы безопасности функциональных преобразователей с несимметричным отказом : сб. науч. трудов. – СПб. : ПГУПС, 2004. – С. 46–49.
10. Христов Х. А. Электронизация на осигурителната техника / Х. А. Христов. – София : Техника, 1984. – 355 с.
11. Schiwiek L. W. Failsafe – Schaltungen mit LOGISAFE – Technik/ Signal and Draht. – 1986. – № 9. – S. 192–197.
12. Ковкин А. Н. Методы построения бесконтактных устройств сопряжения управляющего вычислительного комплекса с исполнительными объектами систем железнодорожной автоматики : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.08. защищена : 29.09.2005 : утв. : 20.01.2006.
13. Патент на полезную модель № RU 114017 U1 МПК В61L 19/00. Устройство для включения исполнительных устройств систем железнодорожной автоматики и телемеханики / Авторы: Никитин А. Б., Ковкин А. Н., Балуев Н. Н., Наседкин О. А., Алешечкин Ю. А. Патентообладатель: ФГБОУ ВПО ПГУПС. Заявка: 2011140197/11. Дата подачи заявки: 03.10.2011. Начало действия патента 03.10.2011. Дата публикации 10.03.2012. Бюл. № 7.
14. Семенов Б. Ю. Силовая электроника для любителей и профессионалов / Б. Ю. Семенов – М. : СОЛОН-Р, 2001. – 327 с.
15. Ковкин А. Н. Влияние кабельных сетей на безопасность функционирования бесконтактных устройств сопряжения / А. Н. Ковкин // Разработка и эксплуатация новых устройств и систем железнодорожной автоматики и телемеханики. Сборник научных трудов. – СПб. : ПГУПС, 2004. – С. 51–55.
16. Ковкин А. Н. Безопасный контроль состояния аналоговых объектов в системах железнодорожной автоматики / А. Н. Ковкин // Автоматика и телемеханика железных дорог России. Новая техника и новые технологии : сб. науч. трудов. – СПб. : ПГУПС, 2008. – С. 58–62.
17. Никитин А. Б. Контроль целостности нитей выключенных светофорных ламп / А. Б. Никитин, А. Н. Ковкин // Актуальные вопросы развития систем железнодорожной автоматики и телемеханики : сб. науч. трудов. – СПб. : ПГУПС, 2013. – С. 80–86.
18. Патент на полезную модель № RU 139451 U1 МПК В61L 5/14 G08G 1/095. Устройство контроля холодных нитей светофорных ламп / Авторы: Никитин А. Б., Ковкин А. Н., Абрамов О. А. Патентообладатель: ФГБОУ ВПО ПГУПС. Заявка: 2013151003/11. Дата подачи заявки: 15.11.2013. Начало действия патента 15.11.2013. Дата публикации 20.04.2014. Бюл. № 11.
19. Излучатель светодиодный метрополитеновский для подземных линий ИСМПЛ. Руководство по эксплуатации. АДКП.432227.009РЭ. – ЗАО «СМП АСУД ГИБДД», 2002. – 9 с.

Alexey N. Kovkin

“Automation and remote control on railways” department
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg

CONTACTLESS SIGNAL CONTROL IN COMPUTER BASED INTERLOCKING SYSTEM MPC-MPK

This article describes the practical implementation of contactless devices interface on the example of railway and subway signal control equipment in the computer based interlocking system MPC-MPK. The general principles of construction of the power modules providing direct control of ground objects are described. Special attention is paid to the methods of solving specific problems arising in the contactless control of remote signals, as well as the implementation of the function of monitoring the signal functioning without the use of relays.

computer based interlocking, a contactless interface device, power module, safe logic element, a generator of control signals, converter circuit, galvanic isolation, functioning monitoring, cold filament monitoring, timing chain.

References

1. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Hristov H. A., Gavsov D. V. (1995) Methods of construction of safe microelectronic systems of railway automation [Metody postroeniya bezopasnykh mikroelektronnykh sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki], Edition Sapozhnikov V. V. – Moscow: Transport, 1995. – 272 p.
2. Safety of railway automation and remote control. Methods and principles of ensuring the safety of microelectronic systems railway automation [Bezopasnost zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki. Metody i printsipy obespecheniya bezopasnosti mikroelektronnykh SZHAT]. Technical guidance material 32 TCSH 1115842.01-94. – St. Petersburg.: Proceedings of Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university [PGUPS]. 1994. – 120 p.
3. Pereborov A. S., Lisowski M. P., Prokofiev A. A. (1982) Construction of devices of coordination of electronic control circuits with Executive relays [Postroenie ustrojstv soglasovaniya elektronnykh skhem upravleniya s ispolnitelnymi rele], Automation, telemechanics and communication [Avtomatika, telemekhanika i svyaz]. 1982. Issue 5. 7–11 p.
4. Presnyak S. S., Ershov A. S., Makoveev O. L., Tsirkin A. V. (2000) Microprocessor system of centralization of EC-EM [Mikroprotsessornaya sistema tsentralizatsii ETS-EM], Automation, communication, Informatics [Avtomatika, svyaz, informatika]. 2000. Issue 9.
5. Aleshin V. N. (2003) Microprocessor centralization of points and signals of Ebilock-950 system [Mikroprotsessornaya tsentralizatsiya strelok i signalov sistemy Ebilock-950], Automation, communication and Informatics [Avtomatika, svyaz i informatika]. 2003. Issue 1.
6. Nikitin A. B., Kovkin A. N., Manakov A. D. (2018) The use of small-sized power relays in the safe interface devices of computer systems of railway automation [Ispolzovanie malogabaritnykh silovykh rele v bezopasnykh ustrojstvakh sopryazheniya kompyuternykh sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki], Automation on transport [Avtomatika na transporte]. 2018. Issue 2. Vol. 4.

7. Dreiman O. K., Gavzov D. V., Ilyukhin M. V. (1991) Contactless devices of interface of microprocessor systems of railway automatics with objects [Beskontaktnye ustrojstva sopryazheniya mikroprotssornykh sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki s napolnymi obektami], Automatics, telemechanics and communication [Avtomatika, telemekhanika i svyaz]. 1991. Issue 1. – Pp. 12–14.
8. Sapozhnikov V. V., Nikitin A. B. (2009) Microprocessor system of electrical centralization MPC-MPK [Mikroprotssornaya sistema elektricheskoy tsentralizatsii MPTS-MPK], Science and transport [Nauka i transport]. – 2009. Pp. 18–21.
9. Gavzov D. V., Kovkin A. N. (2004) Contactless USO for microprocessor centralization. Safety problems of functional converters with asymmetric failure [Beskontaktnye USO dlya mikroprotssornykh tsentralizatsij. Problemy bezopasnosti funktsionalnykh preobrazovatelej s nesimmetrichnym otkazom], Collection of proceedings. – St. Petersburg: Proceedings of Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university [PGUPS], 2004.
10. Hristov H. Electronics in interlocking technology [Elektronizatsiya na osiguritel'nata tekhnika], Sofia: Technique, 1984. – 355 p.
11. Schiwiek L.W. (1986) Failsafe Circuits with LOGISAFE technology, Signal and wire. – 1986. Issue 9. Pp. – 192–197.
12. Kovkin A. N. (2005) Methods of construction of a contactless interface device of the control computer complex with Executive facilities of railway automation systems [Metody postroeniya beskontaktnykh ustrojstv sopryazheniya upravlyayushchego vychislitel'nogo kompleksa s ispolnitelnymi obektami sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki], PhD thesis. St. Petersburg: Proceedings of Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university [PGUPS], 2005.
13. Nikitin A. B., Kovkin A. N., Baluev, N. N., Nasedkin O. A., Aleshechkin Y. A. (2012) Patent for utility model N 114017 MPK B61L. Device for switching on the actuators of railway automation and remote control systems [Ustrojstvo dlya vklyucheniya ispolnitelnykh ustrojstv sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki]. Nachalo dejstviya patenta 03.10.2011. Data publikatsii publication 10.03.2012.
14. Semenov B. Y. (2001) Power electronics for Amateurs and professionals [Silovaya elektronika dlya lyubitelej i professionalov]. Moscow, "SOLON-R", 2001.
15. Kovkin A. N. (2004) The impact of cable networks on the safe of the functioning of the contactless interface device [Vliyanie kabelnykh setej na bezopasnost funktsionirovaniya beskontaktnykh ustrojstv sopryazheniya], Collection of scientific works. – St. Petersburg: Proceedings of Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university [PGUPS], 2004.
16. Kovkin A. N. (2008) Safe control of analog objects in railway automation systems. Automation and telemechanics of Russian Railways. New equipment and new technologies [Bezopasnyj kontrol sostoyaniya analogovykh obektov v sistemakh zheleznodorozhnoj avtomatiki. Avtomatika i telemekhanika zheleznykh dorog Rossii. Novaya tekhnika i novye tekhnologii], Collection of proceedings. – St. Petersburg: Proceedings of Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university [PGUPS], 2008.
17. Nikitin B., Kovkin A. N. (2013) Operability control filaments of switched-off traffic lights. Topical issues of railway automation and telemechanics systems development [Kontrol tselostnosti nitej vyklyuchennykh svetofornykh lamp. Aktualnye voprosy razvitiya sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki], Collection of proceedings. – St. Petersburg: Proceedings of Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university [PGUPS], 2013.

18. Nikitin A. B., Kovkin A. N., Abramov O. A. (2013) The patent for useful model N 139451 MPK B61L. Control device cold filaments traffic lights [Ustrojstvo kontrolya kholodnykh nitej svetofornykh lamp]. Nachalo dejstviya patenta 15.11.2013. Data publikatsii 20.04.2014.
19. Emitter led of the metro underground lines ISMPL [Izluchatel svetodiodnyj metropolitenovskij podzemnykh linij ISMPL]. User manual. ADKP.432227.009RE. ZAO “SMP ASUD GIBDD”. – 2002.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии А. Б. Никитиным.
Поступила в редакцию 18.02.2019, принята к публикации 10.04.2019.*

КОВКИН Алексей Николаевич – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.
e-mail: akovkin@yandex.ru

© Ковкин А. Н., 2019

Эксплуатация транспортных систем

УДК 626.25

А. М. Костроминов, д-р техн. наук

Е. В. Казакевич, канд. техн. наук

Кафедра «Электрическая связь»

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I, Санкт-Петербург

Ал-р А. Костроминов, канд. техн. наук

Кафедра «Высшая математика»

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I, Санкт-Петербург

Ал-й А. Костроминов, канд. техн. наук

Учебный центр АББ в Санкт-Петербурге

АНАЛИЗ ЧАСТОТНЫХ ПОМЕХ ОТ НЕЛИНЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ В RLC-ЦЕПЯХ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

Анализируется специфический источник частотных помех, который возникает в RLC-элементах схем числового кодирования для автоматической локомотивной сигнализации с частотой 50 Гц и тональными рельсовыми цепями. Эксперименты показали, что помехи возникают при воздействии импульсных перенапряжений в цепях питания и относятся к категории феррорезонансных. В статье рассмотрена математическая модель, использующая разложение феррорезонансного процесса в ряд Фурье. С помощью этой модели и программы MathCad 7.0 Professional выполнены вычислительные эксперименты, результаты которых показывают, что феррорезонансные помехи способны не только оказывать мешающие воздействия на путевые приемники тональных рельсовых цепей и любые другие элементы железнодорожной автоматики и телемеханики, но и создавать условия для их повреждения.

частотные помехи, феррорезонанс, тональные рельсовые цепи, числовое кодирование, RLC-элементы, математические модели, светофоры, светодиоды, защита, пороговые элементы.

DOI: 10.20295/2412-9186-2019-5-3-326-337

Введение

При возникновении феррорезонансного процесса в схеме числового кодирования информации для локомотива с несущей частотой 50 Гц автоблокировки с тональными рельсовыми цепями (ТРЦ) кодовый ток существенно возрастает и имеет несинусоидальную форму [1], которая обуславливает наличие в его составе высших гармоник с достаточно большими амплитудами. Поскольку аппаратура автоблокировки с тональными рельсовыми цепями функционирует на частотах в диапазоне 420–780 Гц (приемники ППЗ, ППЗМ) и 4545–5555 Гц (приемники ПП4) [2, 3], то практический интерес представляет оценка уровней гармонических составляющих тока феррорезонанса в диапазоне частот тональных рельсовых цепей.

Рабочее напряжение полезного сигнала на входе ППЗ составляет 2 В, а на входе ПП4 – 0,6 В. Следовательно, если уровень помехи будет превышать эти величины, можно ожидать сбой в работе системы автоблокировки. Эти сбои могут приводить к неправильным показаниям напольных и локомотивных светофоров, а в итоге – к снижению безопасности движения поездов и к экономическим потерям.

Следует принять во внимание и наметившуюся тенденцию перехода от ламп накаливания в светофорах систем СЦБ к светодиодным системам [4], экономичным с точки зрения потребляемой энергии, но обладающим высокой чувствительностью к помехам. Данное обстоятельство особенно актуально в случае использования светодиодов в удаленных от постов ЭЦ светофорах с кабельными связями [5–8]. Возможность проникновения феррорезонансных помех тональной частоты в светофорные кабельные жилы через емкостные связи актуализирует учет этого фактора при планировании испытаний технических решений со светодиодами.

Математическая модель

Предложенная в работах [1, 2, 9–11] математическая модель феррорезонансного процесса дает возможность в аналитическом виде получить гармонический состав тока в установившемся режиме. При этом надо учитывать, что в реальной схеме синусоидальный ток 50 Гц протекает в виде импульсов продолжительностью по 0,22; 0,35; 0,38; 0,23 с или 0,24; 0,35; 0,30; 0,60 с и коммутируется с помощью электронного ключа. Поскольку известно, что ограничение интервала рассмотрения периодического сигнала

приводит к появлению непрерывного спектра, то помимо основных гармоник полезно знать их уровень на некратных частотах.

Рассмотрим установившийся феррорезонансный процесс в RLC- цепи с нелинейной индуктивностью.

Функция $I(x)$, соответствующая неподвижной точке отображения [1, (33)], определяет установившийся процесс в цепи за один период (рис. 1).

$$I(x) = \begin{cases} f(x), & 0 < x < a, \\ g(x), & a < x < \pi, \\ -f(x - \pi), & \pi < x < \pi + a, \\ -g(x - \pi), & \pi + a < x < 2\pi - a. \end{cases} \quad (1)$$

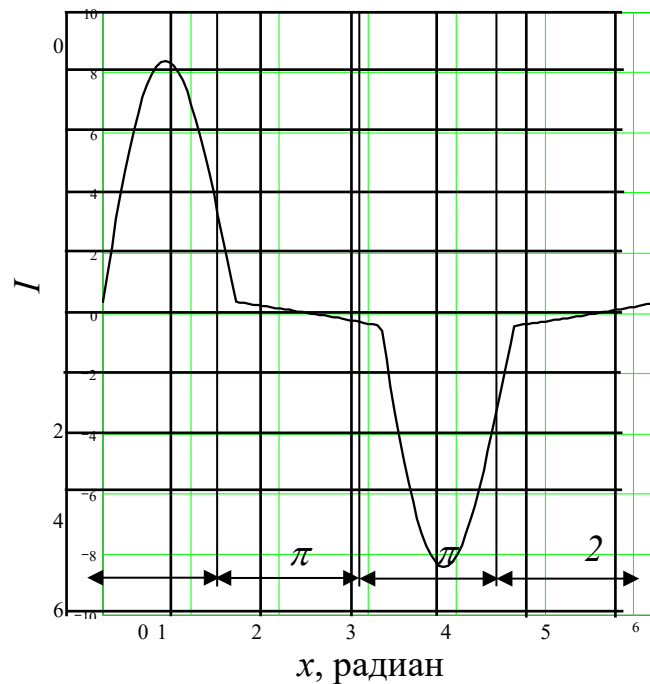


Рис. 1. Пояснение к разложению функции $I(x)$ в ряд Фурье

Функция $f(x)$ определяется выражением [1, (27)], функция $g(x)$ – выражением [1, (28)], а разложение функции $I(x)$ в ряд Фурье имеет следующий вид:

$$I(x) = \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos kx + b_k \sin kx), \quad (2)$$

$$\text{где } a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} I(x) \cos kx dx; \quad b_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} I(x) \sin kx dx$$

(k – номер гармоники).

В разложении отсутствует коэффициент a_0 , так как постоянная составляющая тока в цепи отсутствует. Проведем вычисление остальных коэффициентов разложения Фурье. Будем учитывать, что в силу симметрии характеристики нелинейной индуктивности

$$I(x - \pi) = -I(x), \quad 0 \leq x \leq \pi. \quad (3)$$

Наличие условия (3) предопределяет, что в разложении отсутствуют четные гармоники.

Таким образом, в разложении (2) с учетом условия (3) и представления (1) коэффициенты определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} a_k = & \frac{1}{\pi} (A(I_1(\lambda_2, \beta_2 + k, x_1) + I_1(\lambda_2, \beta_2 - k, x_1)) + \\ & + B(I_2(\lambda_2, \beta_2 + k, x_1) + I_2(\lambda_2, \beta_2 - k, x_1)) + \\ & + C \cos kx_1 (I_1(\lambda_1, \beta_1 + k, \pi - x_1) + I_1(\lambda_1, \beta_1 - k, \pi - x_1)) + \\ & + C \sin kx_1 (I_2(\lambda_1, \beta_1 + k, \pi - x_1) - I_2(\lambda_1, \beta_1 - k, \pi - x_1)) + \\ & + D \cos kx_1 (I_2(\lambda_1, \beta_1 + k, \pi - x_1) + I_2(\lambda_1, \beta_1 - k, \pi - x_1)) + \\ & + D \sin kx_1 (-I_1(\lambda_1, \beta_1 + k, \pi - x_1) + I_1(\lambda_1, \beta_1 - k, \pi - x_1)) + \\ & + \frac{\bar{\Lambda}_2}{k+1} (\cos(\theta_1 + \phi) - \cos((k+1)x_1 + \theta_1 + \phi)) + \\ & + \frac{\bar{\Lambda}_1}{k+1} (\cos((k+1)x_1 + \theta_1 + \phi) - \cos(\theta_1 + \phi)) + T_k^{(1)} + T_k^{(2)}; \\ b_k = & \frac{1}{\pi} (A(I_2(\lambda_2, \beta_2 - k, x_1) - I_2(\lambda_2, \beta_2 + k, x_1)) + \\ & + B(I_1(\lambda_2, \beta_2 + k, x_1) - I_1(\lambda_2, \beta_2 - k, x_1)) + \\ & + C \cos kx_1 (I_2(\lambda_1, \beta_1 - k, \pi - x_1) - I_2(\lambda_1, \beta_1 + k, \pi - x_1)) + \\ & + C \sin kx_1 (I_1(\lambda_1, \beta_1 + k, \pi - x_1) + I_1(\lambda_1, \beta_1 - k, \pi - x_1)) + \\ & + D \cos kx_1 (I_1(\lambda_1, \beta_1 + k, \pi - x_1) - I_1(\lambda_1, \beta_1 - k, \pi - x_1)) + \\ & + D \sin kx_1 (I_2(\lambda_1, \beta_1 + k, \pi - x_1) + I_2(\lambda_1, \beta_1 - k, \pi - x_1)) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\bar{\Lambda}_2}{k+1} (\sin(\theta_2 + \phi) - \sin((k+1)x_1 + \theta_2 + \phi)) + \\
& + \frac{\bar{\Lambda}_1}{k+1} (\sin((k+1)x_1 + \theta_1 + \phi) - \sin(\theta_1 + \phi)) + T_k^{(3)} + T_k^{(4)}.
\end{aligned}$$

Здесь

$$T_k^{(1)} = \begin{cases} -\frac{\bar{\Lambda}_2}{k-1} (\cos(\theta_2 + \phi) - \cos((k-1)x_1 - \theta_2 - \phi)), & k > 1, \\ \bar{\Lambda}_2 \sin(\phi + \theta_2) \cdot x_1, & k = 1; \end{cases}$$

$$T_k^{(2)} = \begin{cases} -\frac{\bar{\Lambda}_1}{k-1} (\cos((k-1)x_1 - \theta_1 - \phi) - \cos(\theta_1 + \phi)), & k > 1, \\ \bar{\Lambda}_1 \sin(\phi + \theta_1) \cdot (\pi - x_1), & k = 1; \end{cases}$$

$$T_k^{(3)} = \begin{cases} \frac{\bar{\Lambda}_2}{k-1} (\sin(\theta_2 + \phi) + \sin((k-1)x_1 - \theta_2 - \phi)), & k > 1, \\ \bar{\Lambda}_2 \cos(\phi + \theta_2) \cdot x_1, & k = 1; \end{cases}$$

$$T_k^{(4)} = \begin{cases} -\frac{\bar{\Lambda}_1}{k-1} (\sin((k-1)x_1 - \theta_1 - \phi) + \sin(\theta_1 + \phi)), & k > 1, \\ \bar{\Lambda}_1 \cos(\phi + \theta_1) \cdot (\pi - x_1), & k = 1; \end{cases}$$

$$I_1(\lambda, \beta, x) = \int_0^x \sin \beta t e^{-\lambda t} dt = \frac{-\beta}{\beta^2 + \lambda^2} \left(e^{-\lambda x} (\cos \beta x + \frac{\lambda}{\beta} \sin \beta x) - 1 \right);$$

$$I_2(\lambda, \beta, x) = \int_0^x \cos \beta t e^{-\lambda t} dt = \frac{-\beta}{\beta^2 + \lambda^2} \left(e^{-\lambda x} (-\sin \beta x + \frac{\lambda}{\beta} \cos \beta x) - \frac{\lambda}{\beta} \right).$$

Алгоритм расчета гармонического состава тока помех в цепи при феррорезонансе для одного периода (см. рис. 1) по построенной математической модели реализован программой, написанной в программной среде MathCad 7.0 Professional.

Анализ полученных результатов расчетов частотного состава феррорезонансного процесса на предмет величин гармоник, пересчитанных к уровню напряжения на входах приемников в диапазоне интересующих частот, приводит к следующему заключению.

1. Уровень действующих значений гармоник, находящихся в диапазоне от 400 до 800 Гц (рабочий диапазон частот приемников ППЗ), превышает значение уровня сигнала 2 В только на частотах, кратных 50 Гц. Так, например,

для частоты 450 Гц (9-я гармоника) уровень напряжения на приемнике составляет 4,1 В, что более чем в 2 раза превышает уровень полезного сигнала. Учитывая, что ближайшая полоса пропускания (406–434 Гц) не захватывает гармонику 450 Гц, можно предположить, что она не будет оказывать влияния на работу приемников ППЗ 8/8 и 8/12. Однако при этом следует иметь в виду наличие дисперсии параметров входных фильтров приемников и некоторое изменение их во времени. От полосы пропускания 9-ю гармонику отделяет всего 16 Гц. Для смещения полосы пропускания до 450 Гц достаточно, чтобы емкость конденсатора фильтра уменьшилась на 0,278 нФ, это составляет примерно 0,3 % от его номинальной величины.

2. 10-я гармоника (500 Гц) в спектре частот меньше 9-й и 11-й. К 10-й гармонике близок диапазон частот 466–494 Гц для блоков ППЗ 9/8 и ППЗ 9/12. Верхняя граница этой полосы пропускания ниже частоты 10-й гармоники всего на 6 Гц. Для попадания 10-й гармоники в полосу пропускания входного фильтра приемника ППЗ 9/8 и 9/12 достаточно, чтобы емкость конденсатора фильтра уменьшилась по отношению к номинальной на 0,1 %.

3. 11-я гармоника по расчету имеет амплитуду больше 2 В и может оказывать влияние на приемники ППЗ 11/8 и ППЗ 11/12 при отклонении емкости конденсатора на 0,3 %.

4. Гармоники с 12-й по 15-ю имеют уровень примерно в 2 раза меньший, чем уровень полезного сигнала, поэтому их влияние на работу приемников ППЗ 14/8 и 14/12, а также ППЗ 15/8 и 15/12 маловероятно.

Чтобы защитить нелинейные RLC-цепи устройств СЦБ от возникновения в них феррорезонанса, провоцируемого коммутационными либо молниевыми процессами, рекомендуется применять пороговые элементы, ограничивающие напряжение на конденсаторах RLC-цепей. Эксперименты показали, что такой способ защиты надежно избавляет от появления стационарного феррорезонанса в нелинейной RLC-цепи.

Впервые явление феррорезонанса было обнаружено в 1905 году французским ученым Ферриером [12]. Впоследствии исследованию этого явления было посвящено много работ. Например, Л. Робинсон, О. Мартиенсен, В. Петерсен [13–15] и другие установили ряд закономерностей, характеризующих влияние параметров цепи, амплитуды и частоты приложенного напряжения на возможность и условия возникновения феррорезонанса.

В 1930-х годах изучение таких нелинейных систем связано с развитием радиотехники, выдвигавшей задачи конструирования статических преобразователей частоты [16, 17].

Со временем, в связи с развитием электроники, интерес к феррорезонансу в низковольтных преобразовательных системах значительно ослаб, но возрос в области электроэнергетики [18, 19], где явление феррорезонанса рассматривается как источник перенапряжений в сетях высокого напряжения.

В настоящее время явлению феррорезонанса также уделяется значительное внимание, но только как процессу, характерному для систем передачи и силового преобразования электроэнергии [20–22], а также для измерительных преобразователей систем электроэнергетики [23, 24].

Представленные в данной работе результаты исследования феррорезонанса как явления, которое может существовать в низковольтных слаботочных цепях автоматики, управления и связи, позволили взглянуть на проблему ЭМС еще с одной позиции – позиции внутренних перенапряжений, вызванных нелинейным характером элементов устройств.

Выводы

Таким образом, при возникновении феррорезонанса в схеме числового кодирования очевидно появление мешающих помех в рабочем диапазоне частот приемников ППЗ (8/8–9/12), по амплитуде напряжения сопоставимых с уровнем полезного сигнала.

Следует принять во внимание, что помехи при феррорезонансе имеют значительную мощность (это вытекает из физики процесса и подтверждено исследованиями), поэтому феррорезонансные помехи являются не только мешающими, вызывающими сбои в работе ТРЦ, но и способными создавать условия для термического повреждения элементов. Статистика отказов аппаратуры автоблокировки с ТРЦ, например, за 1998 год (имеются данные завода-изготовителя) свидетельствует, что из всех вышедших из строя блоков ТРЦ 51 % приходится на долю приемников ППЗ и ПП4, из них почти 70 % составляют блоки ППЗ 8/8, 8/12, 9/8, 9/12 и 11/8. Приведенные данные подтверждают предположение о феррорезонансной природе отказов аппаратуры ТРЦ. Кроме того, эксперименты в заводской лаборатории с искусственным моделированием феррорезонанса также подтвердили разрушающее действие этого процесса.

Мера защиты в виде пороговых элементов является эффективной, при этом простой и доступной.

Библиографический список

1. Электропитание устройств железнодорожной автоматики, телемеханики и связи : учебник для вузов ж.-д. транспорта / Вл. В. Сапожников, Н. П. Ковалев, В. А. Кононов, А. М. Костроминов, Б. С. Сергеев ; под ред. проф. Вл. В. Сапожникова. – М. : Маршрут, 2005. – 453 с.
2. Костроминов Ал-й А. Математическая модель процессов в RLC-цепях с резко нелинейной веберамперной характеристикой катушки индуктивности / Ал-й А. Костроминов, А. М. Костроминов, Ал-р А. Костроминов, М. В. Сапетов // Седьмая Российская научно-техническая конференция по электромагнитной совместимости ЭМС-2002 : сб. докладов. – СПб. : ВИТУ, 2002. – С. 107–114.
3. Сороко В. И. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики : справочник. Кн. 2 / В. И. Сороко, Е. Н. Розенберг – 3-е изд. – М. : НПФ «Планета», 2000. – 1008 с.
4. ГОСТ Р 56057-2014. Системы светооптические светодиодные для железнодорожной светофорной сигнализации. Общие технические требования и методы испытаний. – М. : Стандартинформ, 2015.
5. Наседкин О. А. Имитатор характеристик кабельной линии связи сигнализации, централизации и блокировки для испытаний светооптических светодиодных систем / О. А. Наседкин, Е. В. Ледаев // Автоматика на транспорте. – 2017. – Т. 3. – № 3. – С. 355–367.
6. ГОСТ Р 56292-2014. Кабели для сигнализации и блокировки. Общие технические условия. – М. : Стандартинформ, 2015.
7. Виноградов В. В. Линии железнодорожной автоматики, телемеханики и связи : учебник для вузов ж.-д. транспорта / В. В. Виноградов, С. Е. Кустышев, В. А. Прокофьев. – М. : Маршрут, 2002. – 416 с.
8. ГОСТ Р 27893-88. Кабели связи. Методы испытаний. – М. : Стандартинформ, 2010.
9. Шабалин А. Н. Мешающие и опасные электромагнитные процессы в RLC-цепях систем железнодорожной автоматики / А. Н. Шабалин, Г. Ф. Насонов, В. И. Никонов, А. М. Костроминов, Ал-р А. Костроминов, Ал-й А. Костроминов // Технологии ЭМС. – № 2. – 2004. – С. 22–25.
10. Костроминов А. М. Влияние асимметрии тягового тока на возникновение непреднамеренных электромагнитных процессов в RLC-цепях систем железнодорожной автоматики / А. М. Костроминов, Ал-р А. Костроминов, Ал-й А. Костроминов, А. Н. Шабалин, Г. Ф. Насонов, В. И. Никонов // Технологии ЭМС. – № 3. – 2004. – С. 34–37.
11. Костроминов А. М. Математические модели непреднамеренных электромагнитных процессов в RLC-цепях / А. М. Костроминов, Ал-р А. Костроминов, Ал-й А. Костроминов // Технологии ЭМС. – № 2. – 2004. – С. 25–30.
12. Bethenod J. Concerning transformer resonance // L'Eclairage electrique. – 1907. – V. 53. – P. 289.
13. Martienssen O. Uber neue Resonanzerscheinungen in Wechselstromkreisen // Phys. Ztschr. – 1910. – V. 11. – P. 448–460.
14. Petersen W. Uberspannungen mit Betriebsfrequenz bei Leitungsbruchen und einpoligen Schaltvorgangen // ETZ. – 1915. – V. 36. – P. 353, 366, 383.
15. Robinson L. N. Phenomena accompanying transmission with some types of star transformer connections // Tr. A. J. E. E. – 1915. – V. 34. – P. 2183.
16. Heegner K. Uber Selbsterregungserscheinungen bei System mitgestorter Superposition // Zschr. f. Rhys. – 1924. – V. 29. – № 2. – P. 91–109.
17. Summer F. Schwingungskreise mit Eisenkernspulen. Leipzig, 1950.

18. Butler J. W., Concordia C. Analysis of series capacitor application problems // *Electrical Engineering*. – 1937. – V. 56. – P. 302.
19. Peterson E. A., Schroeder T. W. Abnormal overvoltages caused by transformers magnetizing currents in long transmission lines // *Tr. American journal of electrical engineering*. – 1946. – V. 65. – P. 32.
20. Mork B. A., Stuehm D. L. Application of nonlinear dynamics and chaos to ferroresonance in distribution systems // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 1994. – V. 9. – Is 2. – Pp. 1009–1017.
21. Bayliss C. R., Hardy B. J. *Power Quality – Harmonics in Power Systems. Transmission and Distribution Electrical Engineering*. – ISBN 978-0-08-096912-1. – 4th Edition. – 2011. – Pp. 907–932.
22. Mohammad A. S. Masoum, Ewald F. Fuchs. *Harmonic Models of Transformers. Power Quality in Power Systems and Electrical Machines (Second Edition)*. – ISBN 978-0-12-800782-2. – 2015. – Pp. 105–205.
23. Omar Salah Elsayed Atwa. *Practical Power System and Protective Relays Commissioning*. – 2019. – Pp. 123–132.
24. Valverde V., Mazon A. J., Zamora I., Buigues G. Ferroresonance in Voltage Transformers: Analysis and Simulations // *Renewable Energy and Power Quality Journal*. – 2011. – 1. – 10.24084/repqj05.317. – Pp. 465–471.

Alexander M. Kostrominov

Elena V. Kazakevich

Department of Electrical Communications

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg

Alexander A. Kostrominov

Department of Higher Mathematics

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg

Alexey A. Kostrominov

St. Petersburg ABB Training Center

ANALYSIS OF FREQUENCY INTERFERENCE FROM NONLINEAR PROCESSES IN SIGNALING SYSTEMS RLC-CIRCUITS

The specific source of frequency interference, which occurs in RLC-elements of the numerical coding circuits for automatic locomotive signaling with a frequency of 50 Hz and audio-frequency track circuits, is analyzed. Experiments have shown that interference occurs when pulse overvoltages are applied in the power supply circuits and belong to the category of ferroresonance. The article considers a mathematical model using Fourier series expansion of the ferroresonant processes. With the help of this model and the MathCad 7.0 Professional software, computational experiments were performed, the results of which show that ferroresonant interference can not only interfere with the track receivers of audio-frequency track circuits and any other centralized traffic control devices, but also create conditions for their damage.

frequency interference, ferroresonance, tonal track circuits, numerical coding, RLC elements, mathematical models, signals, LEDs, protection, threshold elements.

Reference

1. Sapozhnikov V. V., Kovalev N. P., Kononov V. A., Kostrominov A. M., Sergeev B. S. (2005) Power Supply of Railway Automation, Telemechanics and Communication Devices [Elektropitanie ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki, telemekhaniki i svyazi], A Textbook for Universities zh.-d. Transport; Edition VL Sapozhnikova. – Moscow: Route [Marshrut], 2005. – 453 p.
2. Kostrominov A. A., Kostrominov A. M., Kostrominov Al-r A., Sapetov M. V. (2002) Mathematical model of processes in RLC circuits with sharply nonlinear weberamper characteristic of inductance [Matematicheskaya model' protsessov v RLC-tsepyakh s rezko nelinejnoy veberampernoj kharakteristikoj katushki induktivnosti], The Seventh Russian Scientific-Technical Conference on Electromagnetic Compatibility EMC-2002: Processing – St. Petersburg.: Ministry of Defence of the Russian Federation, 2002. – Pp. 107–114.
3. Soroko V. I., Rosenberg E. N. (2000) Equipment of railway automation and telemechanics [Apparatura zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki], Reference. Vol 2. – 3rd ed. – Moscow: NPF “PLANETA”, 2000. – 1008 p.
4. GOST R 56057-2014. LED light-optical systems for railway traffic light signaling. General technical requirements and test methods [Sistemy svetoopticheskie svetodiodnye dlya zheleznodorozhnoj svetofornoj signalizatsii. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya i metody ispytaniy]. – Moscow: Standardinform, 2015.
5. Nasedkin O. A., Ledyayev E. V. (2017) The simulator of the characteristics of the cable communication line of signaling, centralizing and blocking for testing light-optical LED systems [Imitator kharakteristik kabel'noj linii svyazi signalizatsii, tsen-tralizatsii i blokirovki dlya ispytaniy svetoopticheskikh svetodiodnykh sistem], Automation on transport [Avtomatika na transporte]. 2017. Vol. 3. Issue 3. Pp. 355–367.
6. State standard R 56292-2014. Cables for signaling and blocking. General technical conditions [GOST R 56292-2014. Kabeli dlya signalizatsii i blokirovki. Obshchie tekhnicheskie usloviya]. – Moscow: Standardinform, 2015.
7. Vinogradov V. V., Kustyshev S. E., Prokofiev V. A. (2002) Lines of railway automatics, telemechanics and communications [Linii zheleznodorozhnoj avtomatiki, telemekhaniki i svyazi: Ucheb-nik dlya vuzov zh.-d. transporta], Textbook for universities. – Moscow: Route [Marshrut], 2002. – 416 p.
8. State standard R 27893-88. Communication cables. Test methods [GOST R 27893-88. Kabeli svyazi. Metody ispytaniy]. – Moscow: Standardinform, 2010.
9. Shabalin A. N., Nasonov G. F., Nikonov V. I., Kostrominov A. M., Kostrominov Al-r A., Kostrominov A. A. (2004) Interfering and dangerous electromagnetic processes in RLC - circuits of railway automation systems [Meshayushchie i opasnye elektromagnitnye protsessy v RLC – tsepyakh sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki], Technologies of electromagnetic compatibility [Tekhnologii elektromagnitnoy sovmestimosti], issue 2, 2004. – Pp. 22–25.
10. Kostrominov A. M., Kostrominov Al-r A., Kostrominov Al-y A., Shabalin A. N., Nasonov G. F., Nikonov V. I. (2004) The influence of the asymmetry of the traction current on the occurrence of unintended electromagnetic processes in the RLC-circuits of railway automation systems [Vliyanie asimmetrii tyagovogo toka na vzniknovenie neprednamerennykh elektromagnitnykh protsessov v RLC-tsepyakh sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki], Technologies of electromagnetic compatibility [Tekhnologii elektromagnitnoy sovmestimosti], issue 3, 2004. – Pp. 34-37.
11. Kostrominov A. M., Kostrominov Al-r A., Kostrominov Al-y A. (2004) Mathematical models of unintended electromagnetic processes in RLC-circuits [Matematicheskie

- modeli neprednamerennykh elektromagnitnykh protsessov v RLC-tsepyakh], Technologies of electromagnetic compatibility [Tekhnologii elektromagnitnoy sovместimosti], issue 2, 2004. – Pp. 25-30.
12. Bethenod J. Concerning transformer resonance, L'Eclairage électrique. 1907. – Vol. 53. – P. 289.
 13. Martienssen O. Über neue Resonanzerscheinungen in Wechselstromkreisen, Phys. Ztschr, 1910, vol.11. – Pp. 448–460.
 14. Petersen W. Überspannungen mit Betriebsfrequenz bei Leitungsbrüchen und einpoligen Schaltvorgängen, ETZ, 1915, vol.36. Pp. 353, 366, 383.
 15. Robinson L. N. Phenomena accompanying transmission with some types of star transformer connections, Tr. A. J. E. E., 1915, vol. 34. – Pp. 21–83.
 16. Heegner K. Über Selbsterregungserscheinungen bei System mitgestorter Superposition, Zschr. f. Rhys, 1924, vol.29, issue 2. – Pp. 91–109.
 17. Summer F. Schwingungskreise mit Eisenkernspulen. Leipzig, 1950.
 18. Butler J. W. Concordia C. Analysis of series capacitor application problems, Electrical Engineering, 1937, vol. 56. – Pp. 302.
 19. Peterson E. A. Schroeder T. W. Abnormal overvoltages caused by transformers magnetizing currents in long transmission lines, Tr. American journal of electrical engineering, 1946, vol. 65. – P. 32.
 20. Mork B. A., Stuehm D. L. Application of nonlinear dynamics and chaos to ferroresonance in distribution systems. IEEE Transactions on Power Delivery, Apr 1994, vol. 9, issue 2.
 21. DrC.R. Bayliss CEng FIET, B.J. Hardy CEng FIET, Power Quality – Harmonics in Power Systems. Transmission and Distribution Electrical Engineering, ISBN 978-0-08-096912-1, 4th Edition, 2011.
 22. Mohammad A. S. Masoum, Ewald F. Fuchs, Harmonic Models of Transformers. Power Quality in Power Systems and Electrical Machines (Second Edition), ISBN 978-0-12-800782-2, 2015.
 23. Omar Salah Elsayed Atwa, Voltage Transformers. Practical Power System and Protective Relays Commissioning, 2019. – Pp 123–132.
 24. Valverde V., Mazon A. J., Zamora I., Buigues G. Ferroresonance in Voltage Transformers: Analysis and Simulations. Renewable Energy and Power Quality Journal. 2011, 1. 10.24084 repqj05.317.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Вал. В. Сапожниковым.

Поступила в редакцию 16.04.2019, принята к публикации 14.05.2019.

КОСТРОМИНОВ Александр Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.
e-mail: triak@grozon.spb.ru

КАЗАКЕВИЧ Елена Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.
e-mail: kev-pgups@yandex.ru

КОСТРОМИНОВ Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Высшая математика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

e-mail: alkostrom@gmail.com

КОСТРОМИНОВ Алексей Александрович – кандидат технических наук, представитель учебного центра АББ в Санкт-Петербурге.

e-mail: alexey.kostrominov@ru.abb.com

© Костроминов А. М., Казакевич Е. В., 2019

© Костроминов Ал-р. А., Костроминов Ал-й. А., 2019

УДК 656.25

А. Д. Манаков, д-р техн. наук

А. А. Рахмонбердиев

Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»,
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I, Санкт-Петербург

ВОЗДЕЙСТВИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ НА УСТРОЙСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ АО «УЗБЕКИСТОН ТЕМИР ЙУЛЛАРИ»

Дан анализ отказов устройств железнодорожной автоматики и телемеханики АО «Узбекистон темир йуллари» (АО «УТЙ» – «Узбекские железные дороги») от атмосферных и коммутационных перенапряжений за период 2014–2018 гг. Определено, что наибольшее количество отказов устройств ЖАТ связано с грозовым периодом. В общем количестве отказов устройств ЖАТ отказы аппаратуры составляют 22 %. Отказы устройств сигнализации, централизации и блокировки по дистанциям сигнализации и связи АО «УТЙ» распределены неравномерно. Наибольшее количество отказов приходится на дистанции, расположенные в пустынных, степных районах и в зоне протекания больших рек. Системами ЖАТ, попадающими в группу А диаграммы Парето по количеству отказов от атмосферных перенапряжений, являются электрическая централизация и числовая кодовая автоматическая блокировка. Кроме того, большое количество отказов приходится на применяемые в эксплуатации устройства защиты от импульсных перенапряжений.

железнодорожная автоматика и телемеханика, сигнализация, централизация и блокировка, атмосферные перенапряжения, коммутационные перенапряжения.

DOI: 10.20295/2412-9186-2019-5-3-338-355

Введение

Работа железнодорожного транспорта связана с повышенной опасностью и ответственностью и жестко регламентирована нормативными документами в виде руководящих указаний, приказов, отраслевых, национальных и межгосударственных стандартов. На этапе существования единого государства во всех союзных республиках проводилась единая техническая

политика в области железнодорожного транспорта. После выделения национальных железных дорог в самостоятельные акционерные общества каждая национальная железная дорога разрабатывает свою техническую политику. При одинаковых технических средствах, доставшихся от единого государства, каждый регион имеет свои природные и климатические особенности. Особенностью узбекских железных дорог является расположение некоторых объектов в пустынных, степных и горных районах.

В области защиты устройств ЖАТ от атмосферных и коммутационных перенапряжений в ОАО «Российские железные дороги» разработаны отраслевые [1–3] и национальный [4] стандарты. На АО «УТЙ» используется документ [5], который также рекомендует к применению морально устаревшие УЗИП.

Атмосферные перенапряжения возникают 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. Такие перенапряжения оказывают опасные электромагнитные воздействия и мешающие электромагнитные влияния на устройства инфраструктуры обеспечения движения поездов [6–16].

Опасные электромагнитные воздействия (ОЭМВ) – напряжения и токи в цепях устройств ЖАТ, вызывающие повреждение технического средства (ТС), – пробой изоляции, тепловое и/или динамическое разрушение, а также поражение электрической энергией обслуживающего персонала [14].

Мешающие электромагнитные влияния (МЭМВ) – напряжения и токи в цепях устройств ЖАТ, в результате действия которых происходят ложное срабатывание и сбои в работе устройств [15]. Электромагнитная помеха (ЭП) – любое электромагнитное явление, которое может ухудшить качество функционирования технического средства [17]. Из сравнения определений МЭМВ и ЭП следует, что по результату воздействия на ТС электромагнитная помеха равнозначна МЭМВ и приводит к сбоям в работе устройства, ухудшая качество его функционирования. Так как ОЭМВ, МЭМВ и ЭП имеют одинаковую природу (электромагнитную), то в ряде публикаций все электромагнитные воздействия называют помехами [3], не отмечая вторую половину определения – *«ЭП может ухудшить качество функционирования технического средства»*, но не разрушить ТС.

Целью статьи является анализ отказов устройств ЖАТ в АО «Узбекистон темир йуллари» при воздействии атмосферных и коммутационных перенапряжений.

1. Анализ отказов устройств железнодорожной автоматики и телемеханики АО «Узбекистон темир йуллари» от воздействия атмосферных перенапряжений

Протяжённость железных дорог АО «УТЙ» в 2019 году составила 4421,316 км. За пять лет, с 1 января 2014 года по 31 декабря 2018 года, по ШЧ АО «УТЙ» было зарегистрировано 48 отказов устройств ЖАТ от воздействия атмосферных перенапряжений [18–22]. Удельная поражаемость устройств СЦБ на 1 км дороги составила 0,011.

В общем количестве отказов устройств ЖАТ отказы аппаратуры составляют 22 %. Анализ распределения отказов аппаратуры ЖАТ по месяцам с 2014 по 2018 г. (рис. 1) показывает, что наибольшее их количество приходится на весенний и осенний, т. е. «грозовые», периоды: 5 отказов в марте, 9 – в апреле, 11 – в мае и соответственно 4 отказа в сентябре, 6 – в октябре и 4 – в ноябре. Кроме того, 8 отказов произошло в июне и 1 отказ – в августе.

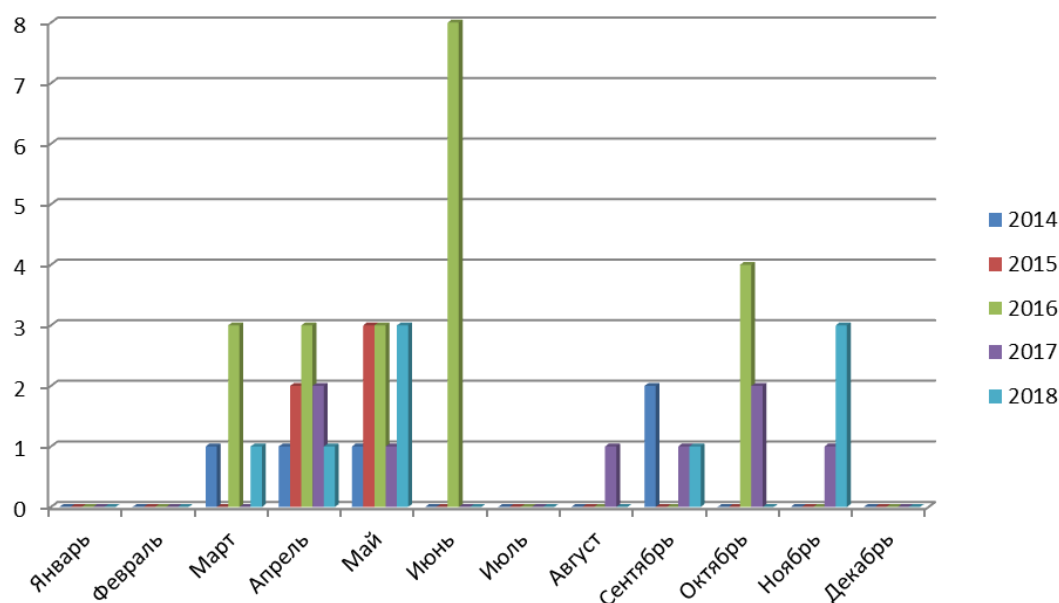


Рис. 1. Распределение повреждений устройств СЦБ от грозовых перенапряжений по месяцам

Проведенный анализ по месяцам показывает, что основные грозовые периоды проходят с марта по май и с сентября по ноябрь. Иногда в июне или в августе бывает гроза, но это редкое явление – аномалия. Средняя ширина грозового фронта составляет не более 16 км. Средняя продолжительность грозы 1–1,5 часа [23].

Воздействия атмосферных перенапряжений на устройства СЦБ по дистанциям сигнализации и связи (ШЧ) распределены неравномерно. Наибольшее количество аппаратуры отказывало в ШЧ-11 (15 отказов) и ШЧ-3 (10 отказов), как показано на рис. 2.

Участок от станции Караузьяк до станции Каракалпакия, который обслуживается дистанцией ШЧ-11, расположен преимущественно в пустынных и степных районах. В этой местности каменистый и песчаный грунт не позволяет обеспечить требуемого сопротивления заземления устройств ЖАТ. Во время грозовых разрядов устройства ЖАТ находятся под высоким потенциалом. Высокое удельное сопротивление грунта создает условия растекания тока грозового разряда по оболочкам кабеля, рельсам и другим токопроводящим предметам, что создает перенапряжение в устройствах ЖАТ.

Участок от станции Сырдарья до станции Джизак, который обслуживается дистанцией ШЧ-3, расположен между реками Сырдарья и Зарафшан, преимущественно в степных районах. На северо-западе района расположено искусственное озеро Айдар куль, кроме того, район с трех сторон окружают: Чаткальский хребет и Угамский хребет – с севера-востока, Туркестанский хребет и Зеравшанский хребет – с юга, Нурагинский хребет – с востока.

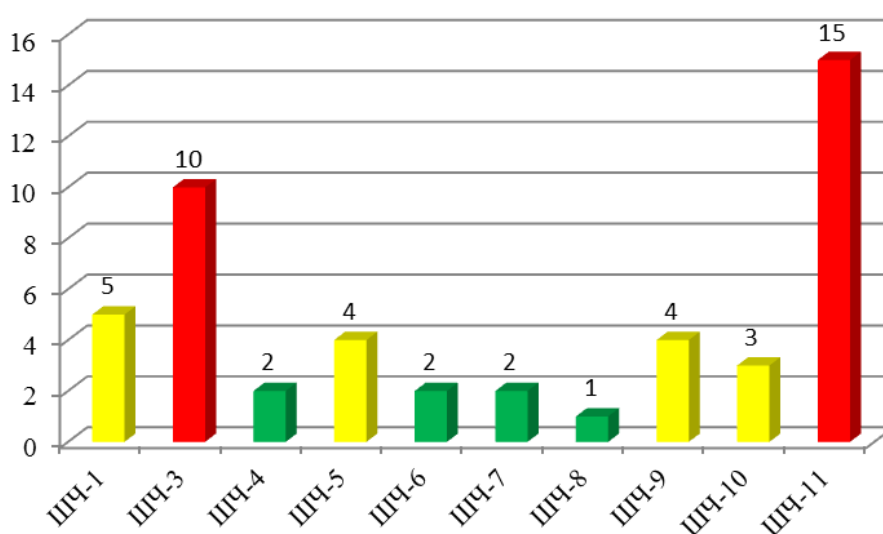


Рис. 2. Распределение количества мест повреждений грозовыми разрядами устройств ЖАТ по дистанциям

В районах рек возрастает вероятность образования грозových облаков с высоким зарядом. Грозовой облако, несущее электрический заряд, в районе реки под ним намного быстрее образует заряд противоположного знака, что увеличивает напряженность электрического поля и приводит к грозovým разрядам в районе рек. При этом увеличивается вероятность ОЭМВ грозových разрядов на железнодорожные устройства, расположенные вблизи рек. Более того, поскольку район окружен горными хребтами с трех сторон, западный и северный ветер нагоняют в этот регион много облаков, а естественные препятствия накапливают облака в горах.

За анализируемый пятилетний период характер отказов систем и устройств ЖАТ рассмотрим с помощью диаграмм Парето (рис. 3, 4, 5). Отказы систем ЖАТ распределились следующим образом (рис. 3): систем электрической централизации (ЭЦ) на базе релейно-контактных схем – 14 (29 % от общего количества отказавших систем); числовой кодовой автоблокировки (ЧКАБ) – 12 (25 %); полуавтоматической блокировки (ПАБ) – 12 (25 %); микропроцессорных систем (ЭССО, МПБ-ТЕГ, МПБ-П, МПЦ-ТЕГ, АБЧК-Е) – 6 (13 %); импульсно-проводной автоблокировки (ИПАБ) – 2 (4 %); систем диспетчерской централизации (ДЦ) – 2 (4 %).

Из диаграммы Парето (см. рис. 3) следует, что наибольшее количество отказов из-за атмосферных перенапряжений произошло в системах ЭЦ, ЧКАБ (54 % всех отказов, группа А), а также в системе ПАБ (группа В). На эти системы (группы А и В) приходится 79 % отказов от общего количества отказавших систем.

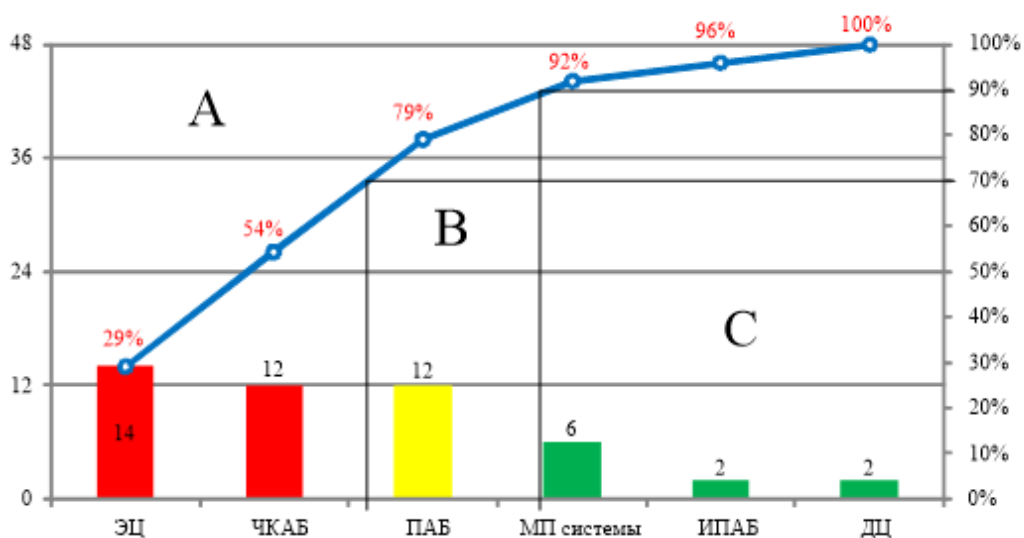


Рис. 3. Распределение отказов систем ЖАТ

Распределение отказов по устройствам ЖАТ от воздействия атмосферных перенапряжений показано на рис. 4:

- аварийные реле – 20 отказов (16,3 % от общего количества отказавшей аппаратуры). Отказы аварийных реле: АСШ2-220М – 6 случаев, из которых 1 – сваривание контактов и пробой диодного моста (выпрямитель), 3 – пробой стабилитронов – 2С930А (КС620А), 2 – подгар контактов; АСШ2-12 – 1 случай – пробой стабилитрона типа Д815Б и диодного моста; АШ2-1440 – 10 случаев, из которых 1 – пробой изоляции между витками обмотки реле, 1 – сгорела обмотка реле, 3 – сваривание контактов, 2 – подгар контактов, 3 – излом контактов; АШ2-110/220 – 2 случая, из которых 1 – пробой диода Д226 и 1 – сваривание контактов; АНВШ2-2400 (аварийные лучевые реле) – 1 случай – пробой диодного моста. Отказы аварийных реле типа АСШ2-220М, АСШ2-12, АШ2-1440 и АШ2-110/220, АНВШ2-2400 связаны с перенапряжением в цепях электропитания автоблокировки;
- блоки дешифратора кодовой автоблокировки (БС-ДА, БИ-ДА и БК-ДА) – 13 случаев (10,5 %). Наиболее подвержены воздействиям атмосферных перенапряжений диоды, установленные в блоках счетчиков БС-ДА – 9 отказов, из них пробой диодов выпрямительного моста – 7 отказов, пробой одиночных диодов в БС-ДА – 2 отказа, в блоках БИ-ДА – 4 случая, пробиты одиночные диоды;
- реле НМШ1-400 – 13 отказов (10,6 %). Характерные отказы для реле НМШ1-400: подгар контактов – 5 случаев, сваривание контактов – 4 случая, излом контактов – 2 случая, обрыв обмотки реле – 2 случая;
- импульсные реле – 12 отказов (9,8 %). Отказы импульсных реле ИМШ1-0,3 – 7 случаев, ИВГ – 5 случаев. Характерными отказами для ИМШ1-0,3 являются подгар контактов (5 случаев) и сваривание контактов (2 случая). В реле ИВГ отказы (5 случаев) произошли по следующим причинам: несвоевременное включение обогрева, перегорание предохранителя обогрева – 1 случай; отказ геркона по причине появления мостящего контакта – уход характеристик (напряжение срабатывания больше нормы, меньше нормы) – 1 случай; пробой выпрямителя КЦ402И – 1 случай. В ряде случаев причину отказа реле ИВГ не удается установить, т. к. после предполагаемого отказа нормальная работа реле восстанавливается и его параметры соответствуют нормам технических условий.

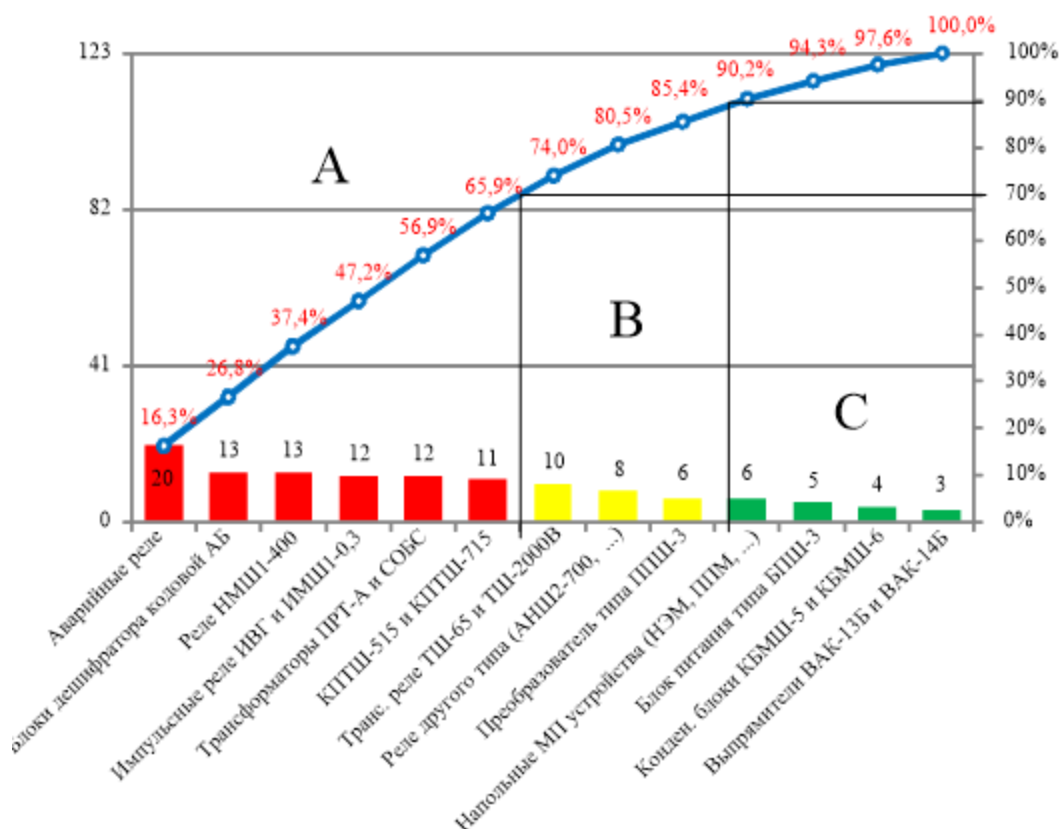


Рис. 4. Распределение отказов устройств ЖАТ

В процессе эксплуатации отказы реле ИВГ происходят по вине работников, т. к. эксплуатируются без предусмотренных элементов защиты от перенапряжений (стабилитроны Д815А (Б) – 2 случая). Допускаются случаи включения обогрева реле ИВГ на завышенное напряжение, что приводит к неисправности геркона МКСР-45-181;

- трансформаторы ПРТ-А и СОБС – 12 отказов (9,7 %). Отказы произошли по следующим причинам: сгорела обмотка трансформатора – 6 случаев, межвитковое КЗ первичной обмотки из-за перенапряжений – 4 случая, пробой изоляции – 2 случая;
- кодовые путевые трансмиттеры штепсельного типа (КПТШ) – 11 отказов (9,0 %). Отказы трансмиттеров КПТШ произошли по причинам: обрыв (отгар) обмотки электродвигателя – 7 приборов, перенапряжение в цепи питания ПХ-ОХ; отсутствие контакта по причине использования некачественной промывочной жидкости – 1 прибор; обрыв (отпай) на конденсаторе – 2 случая; излом контакта – 1 случай;
- трансмиттерные реле ТШ-65В и ТШ-2000В – 10 отказов (8,1 %). Были зафиксированы отказы трансмиттерных реле (ТШ-2000В – 8 случаев и ТШ-65В – 2 случая). Это прежде всего отказы ТШ-2000В

в схемах кодирования рельсовых цепей, вызванные отказом диодов Д226Б или выпрямительных блоков КЦ402И. Наиболее характерными отказами реле ТШ-65В являются подгар, сваривание контактов 11-12 и 41-42 (1 случай) и пробой изоляционных прокладок (2 случая) из-за влияния перенапряжений, возникающих в рельсовых цепях вследствие асимметрии тягового тока;

- реле другого типа (АНШ2-700, АНШМ2-760, КШ1-280 и КШ1-800) – 8 отказов (6,5 %). Отказы реле АНШ2-700 – 2 случая – подгар контактов; АНШМ2-760 – 2 случая, из которых 1 – сваривание контактов, 1 – излом контактов; КШ1-800 – 3 случая, из которых 2 – подгар контактов, 1 – сваривание контактов; КШ1-280 – 1 случай – подгар контактов;
- полупроводниковый преобразователь штепсельного типа (ППШ-3) – 6 отказов (4,9 %): пробой биполярных транзисторов и диодного моста – 3 случая, 2 – пробой конденсатора и 1 – пробой резистора.

Из-за атмосферных перенапряжений были зарегистрированы отказы микропроцессорных систем – 6 отказов (4,8 %). Возникающие отказы в этих системах (см. рис. 3, группа С) приходятся в основном на следующие устройства (см. рис. 4):

- НЭМ – напольный электронный модуль, ППМ – микропроцессорный путевой приемник и рельсовый датчик. Отказы в этих устройствах (6 отказов) составляют 4,8 % от общего количества отказавших устройств. Наиболее характерные отказы для этих устройств – пробой полупроводниковых элементов: пробит диодный мост – 3 случая, пробит транзистор – 2 случая, пробит конденсатор – 1 случай;
- блок питания штепсельного типа, предназначенный для кодовой автоблокировки переменного тока (БПШ-3), – 5 отказов (4,1 %). В двух случаях это был пробой диодного моста на основе диодов Д226А, в двух случаях – пробой конденсатора С1 (20 мкФ) и в одном случае – межвитковое КЗ.

Кроме того, из-за атмосферных перенапряжений произошли отказы в системах ИПАБ и ДЦ (по 2 отказа соответственно, рис. 3, группа С). Отказы в этих системах приходятся в основном на счёт отказов следующих устройств:

- конденсаторные блоки типа КБМШ-5 и КБМШ-6 – 4 отказа (3,3 %), в которых пробиты конденсаторы. Нужно отметить, что блоки КБМШ-5(6) используются не только в системе ИПАБ, но и в системе ПАБ;

- выпрямители ВАК-13Б и ВАК-14Б – 3 отказа (2,4 %). Характерные отказы для этих устройств – пробитие диодного моста – 2 случая, сгорела обмотка трансформатора – 1 случай.

Следующие устройства отказали по одному разу: путевой фильтр типа ФП-25М и маятниковой трансмиттер МТ-1М. В фильтре ФП-25М произошёл пробой конденсатора и сгорели обмотки трансформаторов. Путевые фильтры типа ФП-25М применяются в рельсовых цепях переменного тока частотой 25 Гц для защиты импульсных путевых реле от влияния обратного тягового тока частотой 50 Гц и его гармоник. В маятниковом трансмиттере МТ-1М, установленном в системе ИПАБ, отказали конденсаторы и перегорели резисторы. Трансмиттер типа МТ-1М используется для работы в устройствах импульсной и кодовой автоблокировки для импульсного питания рельсовых цепей.

По результатам анализа можно сделать вывод, что наибольшее количество отказов устройств ЖАТ из-за атмосферных перенапряжений произошло по причине выхода из строя полупроводниковых элементов (рис. 5): диоды – 119 отказов (50,6 %), конденсаторы – 28 отказов (12 %), стабилитроны – 5 отказов (2,1 %), транзисторы – 11 отказов (4,7 %).

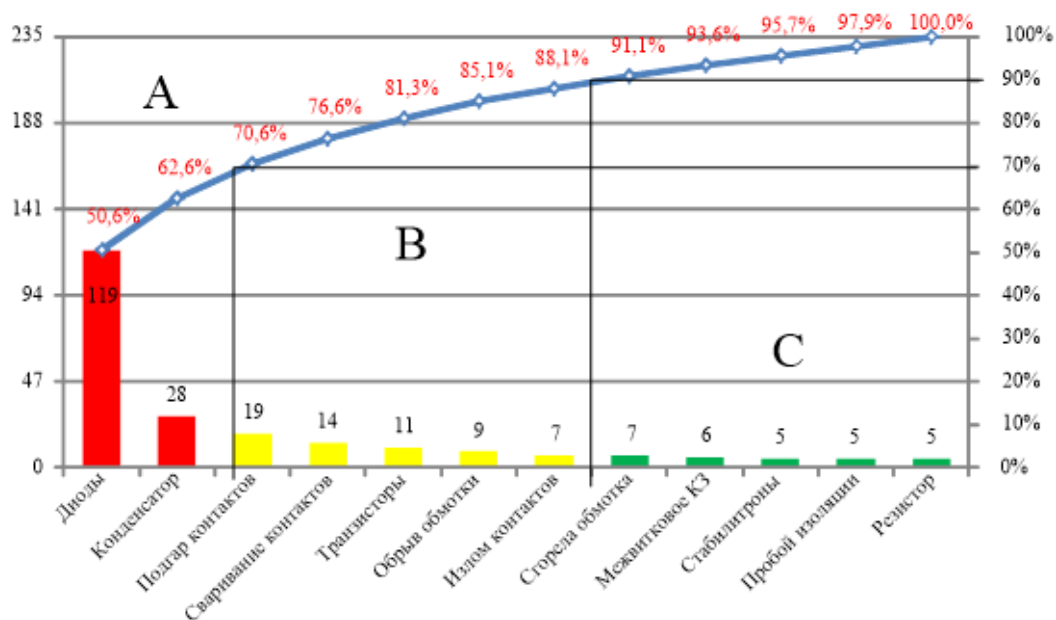


Рис. 5. Характер неисправности при отказах устройств ЖАТ

Отказы диодов происходят в основном в аварийных реле, в блоках дешифратора кодовой автоблокировки (БС-ДА и БИ-ДА), в импульсных реле

ИВГ и ИМШ1-0,3, в трансмиттерных реле ТШ-65В и ТШ-2000В, в преобразователях типа ППШ-3, в блоках питания типа БПШ-3, в напольных микропроцессорных устройствах, в конденсаторном блоке КБМШ-6 и в выпрямителях ВАК-13(14).

Конденсаторы отказывают в основном в блоках БК-ДА, в конденсаторных блоках КБМШ-5(6), в трансмиттерных реле ТШ-65В и ТШ-2000В.

Транзисторы отказывают в устройствах ДЦ, в устройствах ЧКАБ (в преобразователях ППШ-3) и в устройствах микропроцессорных систем (в напольных микропроцессорных устройствах).

Стабилитроны отказывают в устройствах аварийных реле АСШ2-12 и АСШ2-220М, а также в реле ИВГ.

Кроме отказов полупроводниковых элементов реле, также характерны отказы контактов реле: подгар контактов – 19 (8 %), сваривание контактов – 14 (6,0 %), излом контактов – 7 (3,0 %). Фиксировались и отказы в трансформаторах: обрыв обмоток – 9 (3,8 %), выгорание обмоток – 7 (3,0 %), межвитковые замыкания в обмотках – 6 (2,5 %). Отказы по остальным элементам распределились следующим образом: пробой изоляции – 5 (2,2 %), перегорание резисторов – 5 (2,1 %).

По типам аппаратуры наибольшее количество отказов приходится на устройства, работающие в импульсном режиме и содержащие полупроводниковые элементы (диоды, транзисторы, стабилитроны). Наибольшее количество отказов – 20 – приходится на аварийные реле. В аварийных реле наибольшее количество отказов – 13 – приходится на выпрямительные диоды.

2. Анализ причин отказов устройств железнодорожной автоматики и телемеханики АО «Узбекистон темир йуллари» от коммутационных перенапряжений

Основными элементами тяговой сети электрифицированных железных дорог являются: тяговые подстанции, контактные сети и рельсовые линии. Тяговая сеть использует рельсы в качестве обратного провода. Рельсы используются для пропуска сигнального тока при создании устройств контроля свободности участков пути – рельсовых цепей (РЦ). Объединение в рельсовой линии мощного тягового тока и слаботочного сигнального тока требует обеспечения защиты слаботочных цепей от мощных энергетических процессов в тяговой сети при аварийных и коммутационных процессах.

Тяговая сеть оказывает наибольшее влияние на устройства СЦБ при коротком замыкании (КЗ) контактного провода на рельс. КЗ в тяговой сети происходят при повреждении (перекрытии) изоляции поддерживающих конструкций, секционных изоляторов и нейтральных вставок, при обрыве и падении на рельс контактного провода, при повреждении изоляции на электроподвижном составе [24]. В результате КЗ в тяговой сети от тяговой подстанции проходит импульс тока, величина которого может достигать нескольких тысяч ампер [25–28]. Импульс тока создает продольные перенапряжения (между проводом (жилой) и землей) во всех цепях устройств СЦБ. Особенно опасному воздействию подвергается аппаратура РЦ, так как аварийный ток проходит по рельсам. Причиной КЗ в тяговой сети чаще всего выступают грозовые разряды [24]. При действии грозы происходит перекрытие изоляции контактного провода или роговых разрядников на опору контактной сети, металлические элементы которой, по требованиям техники безопасности, соединены с рельсами [29]. При этом по полуобмотке дроссель-трансформатора (ДТ) проходит импульс тока, который оказывает ОЭМВ на устройства РЦ.

На рис. 6 показана гистограмма характерных неисправностей обратной тяговой сети АО «УТЙ» за период 2014–2018 гг. [18–22].

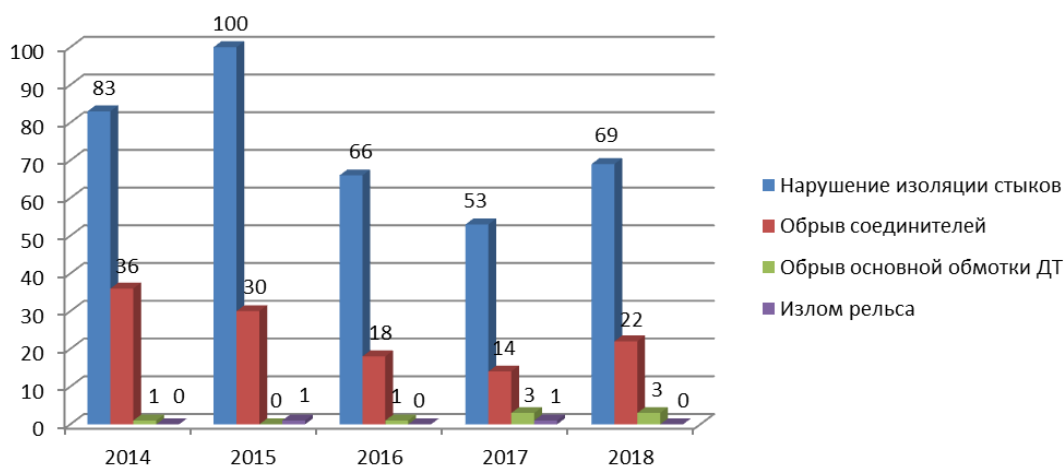


Рис. 6. Гистограмма характерных неисправностей обратной тяговой сети

Указанные неисправности приводят к асимметрии рельсовой линии для обратного тягового тока. При этом увеличивается разность тяговых токов в полуобмотках дроссель-трансформатора, что приводит к ОЭМВ на аппаратуру рельсовых цепей при КЗ в тяговой сети.

На участках железных дорог, электрифицированных по системе постоянного тока, тяговые электродвигатели электровозов, идущих в режиме тяги, при условии КЗ в тяговой сети переходят в генераторный режим. При этом энергия, запасенная в движущемся поезде, осуществляет подпитку места КЗ в течение периода срабатывания средств защиты на электровозе [30].

3. Состояние устройств защиты от импульсных перенапряжений АО «УТЙ»

За анализируемый период зарегистрировано 109 отказов УЗИП. В том числе в 34 случаях элементы защиты были повреждены и не смогли защитить устройства ЖАТ от перенапряжений; в 12 случаях при отказах устройств ЖАТ элементы защиты сохраняли свои характеристики в норме.

В эксплуатации зафиксированы случаи, при которых в результате срабатывания и отказов УЗИП (выравнивателей и разрядников) выходит из строя питающий кабель, происходит оплавление монтажа и возгорание релейных шкафов. Это усугубляет ситуацию и увеличивает продолжительность отказов. После воздействия ПН приходится менять приборы, что требует дополнительных трудозатрат [31].

Основными причинами низкой надежности существующих УЗИП (РКН, ВОЦН, ВОЦШ, ВК и т. д.) являются их электрические характеристики, которые не согласованы с допустимой энергией, действующей на УЗИП. Для современных электронных систем ЖАТ защитные характеристики применяемых элементов не оптимальны и не всегда обеспечивают необходимый уровень защиты наиболее чувствительных полупроводниковых элементов.

Положение усугубляется тем, что не обеспечиваются условия для срабатывания приборов защиты (разрядников), то есть не всегда соблюдаются нормативные требования к заземляющим устройствам по величине сопротивления и по разделению высоковольтных и низковольтных заземлителей, особенно на сигнальных установках.

Заключение

За период с 2014 по 2018 год на дистанциях сигнализации и связи АО «УТЙ» было зарегистрировано 48 отказов систем ЖАТ от воздействия атмосферных перенапряжений. Основное количество отказов приходится на системы ЭЦ, ЧКАБ, ПАБ и микропроцессорные системы. При этом надо учитывать, что в АО «УТЙ» распространённость микропроцессорных систем составляет 21 %.

На участках железных дорог с электрической тягой поездов зафиксированы характерные неисправности элементов обратной тяговой сети (нарушение изоляции стыков, обрыв соединителей, обрыв основной обмотки дроссель-трансформатора, излом рельса), которые при возникновении коротких замыканий в тяговой сети являются причинами коммутационных перенапряжений, действующих на аппаратуру рельсовых цепей.

В результате отказов устройств ЖАТ при воздействии перенапряжений нарушается безопасность движения поездов, происходят задержки поездов, ухудшаются экономические показатели эффективности дороги.

По результатам анализа можно сделать вывод о том, что существующие элементы защиты недостаточно эффективны. Проблема защиты устройств ЖАТ, имеющих полупроводниковые элементы, является приоритетной и актуальной. Широкое внедрение микропроцессорных систем ЖАТ потребует разработки новых высокоэффективных средств защиты, имеющих высокое быстродействие на срабатывание, низкие остающиеся напряжения на средствах защиты и высокую пропускную способность по току.

Библиографический список

1. СТО РЖД 08.024-2015. Устройства железнодорожной автоматики и телемеханики. Защита от атмосферных и коммутационных перенапряжений. Требования к характеристикам испытательных импульсных воздействий – М. : ОАО «РЖД», 2015. – 41 с.
2. СТО РЖД 08.026-2015. Устройства железнодорожной инфраструктуры. Защита от атмосферных и коммутационных перенапряжений. Устройства молниезащиты и заземления технических средств. Технические требования. – М. : ОАО «РЖД», 2015. – 101 с.
3. СТО РЖД 08.026-2015. Устройства железнодорожной автоматики и телемеханики. Защита от атмосферных и коммутационных перенапряжений. Типовая методика обследования электромагнитной обстановки на объектах железнодорожной автоматики и телемеханики. – М. : ОАО «РЖД», 2017. – 108 с.
4. ГОСТ Р 58232. Объекты железнодорожной инфраструктуры. Комплексная защита от атмосферных и коммутационных перенапряжений. Общие требования. – М. : Стандартинформ, 2018. – 103 с.
5. Руководящие указания по защите от перенапряжений устройств СЦБ. – М. : Транспорт, 1990. – 60 с.
6. Кравченко В. И. Грозозащита радиоэлектронных средств : справочник / В. И. Кравченко. – М. : Радио и связь, 1991. – 264 с.
7. Михайлов М. И. Влияние внешних электромагнитных полей на цепи проводной связи и защитные мероприятия / М. И. Михайлов. – М. : Связьиздат, 1959. – 583 с.
8. Михайлов М. И. Защита сооружений связи от опасных и мешающих влияний / М. И. Михайлов, Л. Д. Разумов, С. А. Соколов. – М. : Связь, 1978. – 288 с.
9. Михайлов М. И. Электромагнитные влияния на сооружения связи / М. И. Михайлов, Л. Д. Разумов, С. А. Соколов. – М. : Связь, 1979. – 264 с.

10. Михайлов М.И. Электромагнитные влияния на сооружения связи / М. И. Михайлов, Л. Д. Разумов, А. С. Хоров. – М. : Связьиздат, 1961. – 71 с.
11. Правила защиты устройств проводной связи проводного вещания от влияния тяговой сети электрических железных дорог переменного тока. – М. : Транспорт, 1973. – 96 с.
12. Правила защиты устройств проводной связи проводного вещания от влияния тяговой сети электрических железных дорог постоянного тока. – М. : Транспорт, 1969. – 44 с.
13. Правила защиты установок проводной связи энергосистем от опасных напряжений и токов (Схемы защиты и нормативные указания). – М., 1966. – 20 с.
14. Правила защиты устройств проводной связи, железнодорожной сигнализации и телемеханики от опасного и мешающего влияния линий электропередачи. Ч. 1. Общие положения. Опасные влияния. – М. : Энергия, 1966. – 40 с.
15. Правила защиты устройств проводной связи, железнодорожной сигнализации и телемеханики от опасного и мешающего влияния линий электропередачи. Ч. 2. Мешающие влияния. – М. : Связь, 1972. – 56 с.
16. Бадер М. П. Электромагнитная совместимость / М. П. Бадер. – М. : УМПК МПС, 2002. – 638 с.
17. ГОСТ Р 50397-2011 (МЭК 60050-161:1990). Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения. – М. : Стандартинформ, 2013. – 57 с.
18. Отчёт технического отдела службы СЦБ и связи (Ш) об отказах устройств СЦБ за 2014 год / АО «Узбекистон темир йуллари». – Ташкент, 2015.
19. Отчёт технического отдела службы СЦБ и связи (Ш) об отказах устройств СЦБ за 2015 год / АО «Узбекистон темир йуллари». – Ташкент, 2016.
20. Отчёт технического отдела службы СЦБ и связи (Ш) об отказах устройств СЦБ за 2016 год / АО «Узбекистон темир йуллари». – Ташкент, 2017.
21. Отчёт технического отдела службы СЦБ и связи (Ш) об отказах устройств СЦБ за 2017 год / АО «Узбекистон темир йуллари». – Ташкент, 2018.
22. Отчёт технического отдела службы СЦБ и связи (Ш) об отказах устройств СЦБ за 2018 год / АО «Узбекистон темир йуллари». – Ташкент, 2019.
23. meteocenter.asia – сайт по метеоцентрам Азии (дата обращения 20.05.2019).
24. Сердинов С. М. Повышение надежности устройств электроснабжения электрифицированных железных дорог. – М. : Транспорт, 1985. – 301 с.
25. Кучма К. Г. Защита от токов короткого замыкания в контактной сети / К. Г. Кучма, Г. Г. Марквардт, В.Н.Пушнин. – М. : Трансжелдориздат, 1960. – 259 с.
26. Любимов К. А. Влияние коротких замыканий в контактных сетях на устройства СЦБ и связи / К. А. Любимов, В. С. Ляличев, В. Ф. Шепко // Автоматика, телемеханика и связь. – 1975. – 1 П. – С. 16–21.
27. Ляличев В. С. Исследование и ограничение перенапряжений в рельсовых цепях переменного тока с дроссель-трансформаторами : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.14 / Всесоюз. науч.-исслед. ин-т ж.-д. транспорта. – М., 1974. – 186 с.
28. Радченко В. Д. Перенапряжения и токи короткого замыкания в устройствах электрифицированных железных дорог постоянного тока / В. Д. Радченко, С. Д. Соколов, Н. Д. Сухопрудский. – М. : Гострансиздат, 1959. – 304 с.
29. Косарев Б. И. Электробезопасность в системе электроснабжения железнодорожного транспорта / Б. И. Косарев, Я. А. Зельвянский, Ю. Г. Сибаров. – М. : Транспорт, 1983. – 199 с.
30. Векслер М. И. Защита тяговой сети постоянного тока от токов короткого замыкания / М. И. Векслер. – М. : Транспорт, 1976. – 120 с.
31. Кравченко К. В. Защита систем ЖАТ от грозовых и коммутационных перенапряжений / К. В. Кравченко // Автоматика, связь, информатика. – 2011. – № 4. – С. 25–28.

*Abdulaziz A. Raxmonberdiyev,
Alexander D. Manakov*

«Automation and remote control on railways» department
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg

INFLUENCE OF OVERVOLTAGE ON THE RAILWAY AUTOMATION AND REMOTE CONTROL DEVICES OF JSC “UZBEKISTAN TEMIR YULLARI”

The paper presents an analysis of failures of railway automation and remote control devices of the JSC “Uzbekistan temir yullari” (Uzbekistan Railways) from atmospheric and switching overvoltages for the period 2014-2018. It has been determined that the largest number of failures of railway automation and remote control devices is associated with a thunderstorm period. Hardware failures account for 22% in the total number of failures of railway automation and remote control devices. Failures of signalization, interlocking and blocking devices along the signaling and communication distances of JSC “Uzbekistan Railways” are not evenly distributed. The greatest number of failures occurs at distances located in desert, steppe regions and in the zone of large rivers. Electric interlocking and numeric code automatic block systems are the systems of railway automation and remote control falling into group A of the Pareto diagram by the number of failures from atmospheric overvoltages. It was determined that a large number of failures occur in surge protection devices used in operation.

railway automation and remote control, signalization, interlocking and blocking, atmospheric surge, switching overvoltage.

References

1. Organization standard of Russian Railways 08.024-2015 Devices of railway automation and remote control. Protection against atmospheric and switching overvoltages (2015) Impulse test performance requirements [STO RZHD 08.024-2015 Ustrojstva zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki. Zashchita ot atmosferyh i kommutacionnyh perenapryazhenij. Trebovaniya k harakteristikam ispytatel'nyh impul'snyh vozdeystvij]. Moscow, OJSC “Russian Railways” [OAO "RZHD"]. – 41 p.
2. Organization standard of Russian Railways 08.026-2015 Devices of railway automation and remote control. Protection against atmospheric and switching overvoltages (2015) Lightning protection devices and grounding devices. Technical requirements [STO RZHD 08.026-2015 Ustrojstva zheleznodorozhnoj infrastruktury. Zashchita ot atmosferyh i kommutacionnyh perenapryazhenij. Ustrojstva molniezashchity i zazemleniya tekhnicheskikh sredstv. Tekhnicheskie trebovaniya]. Moscow, OJSC “Russian Railways” [OAO "RZHD"]. – 101 p.
3. Organization standard of Russian Railways 08.026-2015 Devices of railway automation and remote control. Protection against atmospheric and switching overvoltages (2017) Typical methods for examining the electromagnetic environment at the objects of railway automation and remote control [STO RZHD 08.026-2015 Ustrojstva zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki. Zashchita ot atmosferyh i kommutacionnyh perenapryazhenij. Tipovaya metodika obsledovaniya elektromagnitnoj obstanovki na ob'ektah zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki]. Moscow, OJSC “Russian Railways” [OAO "RZHD"]. – 108 p.
4. State standard R 58232 – Objects of railway infrastructure. Comprehensive protection

- against atmospheric and switching overvoltages (2018) General requirements [GOST R 58232 – Ob'ekty zheleznodorozhnoj infrastruktury. Kompleksnaya zashchita ot atmosferynyh i kommutacionnyh perenapryazhenij. Obshchie trebovaniya], Moscow, Standardinform. – 103 p.
5. Guidelines for surge protection of signaling devices (1990) [Rukovodyashchie ukazaniya po zashchite ot perenapryazhenij ustrojstv SCB] Moscow, Transport. – 60 p.
 6. Kravchenko V. I. (1991) Lightning protection of radio electronic means: Reference book [Grozozashchita radioelektronnyh sredstv: Spravochnik]. Moscow, Radio and communication [Radio i svyaz']. – 264 p.
 7. Mikhailov M. I. (1959) Influence of external electromagnetic fields on wired communication circuits and protective measures [Vliyanie vneshnih elektromagnitnyh polej na cepi provodnoj svyazi i zashchitnye meropriyatiya]. Moscow, Svyazizdat. – 583 p.
 8. Mikhailov M. I., Razumov L. D., Sokolov S. A (1978) Protection of communication structures from dangerous and interfering influences [Zashchita sooruzhenij svyazi ot opasnyh i meshajuschih vlijanij]. Moscow, Connection [Svyaz']. – 288 p.
 9. Mikhailov M. I., Razumov L. D., Sokolov S. A (1979) Electromagnetic effects on communication facilities [Elektromagnitnye vliyaniya na sooruzheniya svyazi]. Moscow, Connection [Svyaz']. – 264 p.
 10. Mikhailov M. I., Razumov L. D., Khorov A. S. (1961) Electromagnetic effects on communication facilities [Elektromagnitnye vliyaniya na sooruzheniya svyazi]. Moscow, Svyazizdat. – 71 p.
 11. Rules for the protection of wired communication devices wired broadcasting from the influence of the traction network of AC electric railways [Pravila zashchity ustrojstv provodnoj svyazi provodnogo veshchaniya ot vliyaniya tyagovoj seti elektricheskikh zheleznyh dorog peremennogo toka]. Moscow, Transport. 1973. – 96 p.
 12. Rules for the protection of wired communication devices wired broadcasting from the influence of the traction network of electric railways DC [Pravila zashchity ustrojstv provodnoj svyazi provodnogo veshchaniya ot vliyaniya tyagovoj seti elektricheskikh zheleznyh dorog postoyannogo toka]. Moscow, Transport. 1969. – 44 p.
 13. Rules for the protection of wired communication systems of power systems from dangerous voltages and currents (Protection schemes and regulatory guidelines) [Pravila zashchity ustanovok provodnoj svyazi energosistem ot opasnyh napryazhenij i tokov (Skhemy zashchity i normativnye ukazaniya)]. Moscow, 1966. – 20 p.
 14. Rules for the protection of wired communication devices, railway signaling and remote control from dangerous and interfering influence of power lines (1966). Part 1. General Provisions. Dangerous effects [Pravila zashchity ustrojstv provodnoj svyazi, zheleznodorozhnoj signalizacii i telemekhaniki ot opasnogo i meshayushchego vliyaniya linij elektroperedachi. CHast' 1. Obshchie polozheniya. Opasnye vliyaniya]. Moscow, Connection [Svyaz']. – 40 p.
 15. Rules for the protection of wired communication devices, railway signaling and remote control from dangerous and interfering influence of power lines (1972). Part 2. Disturbing influences [Pravila zashchity ustrojstv provodnoj svyazi, zheleznodorozhnoj signalizacii i telemekhaniki ot opasnogo i meshayushchego vliyaniya linij elektroperedachi. CHast' 2. Meshayushchie vliyaniya]. Moscow, Connection [Svyaz']. – 56 p.
 16. Bader M. P. (2002) Electromagnetic compatibility [Elektromagnitnaya sovmestimost']. Moscow, UMPK MPS [UMPK MPS]. – 638 p.
 17. State standard R 50397-2011 (IEC 60050-161: 1990) Electromagnetic compatibility of technical equipment (2013). Terms and Definitions [GOST R 50397-2011 (MEK 60050-161:1990). Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Terminy i opredeleniya]. Moscow, Publishing house Standardinform [Izd-vo Standartinform]. – 57 p.
 18. Report of the technical department of the signaling and communications service (III) on failures of signaling devices for 2014 [Otchyot tekhnicheskogo otdela sluzhby SCB i

- svyazi (SH) ob otkazah ustrojstv SCB za 2014 god]. JSC “Uzbekistan Railways” [AO «Uzbekiston temir jullari»]. Tashkent, 2015.
19. Report of the technical department of the signaling and communications service (III) on failures of signaling devices for 2015 [Otchyot tekhnicheskogo otdela sluzhby SCB i svyazi (SH) ob otkazah ustrojstv SCB za 2015 god]. JSC “Uzbekistan Railways” [AO «Uzbekiston temir jullari»]. Tashkent, 2016.
 20. Report of the technical department of the signaling and communications service (III) on failures of signaling devices for 2016 [Otchyot tekhnicheskogo otdela sluzhby SCB i svyazi (SH) ob otkazah ustrojstv SCB za 2016 god]. JSC “Uzbekistan Railways” [AO «Uzbekiston temir jullari»]. Tashkent, 2017.
 21. Report of the technical department of the signaling and communications service (III) on failures of signaling devices for 2017 [Otchyot tekhnicheskogo otdela sluzhby SCB i svyazi (SH) ob otkazah ustrojstv SCB za 2017 god]. JSC “Uzbekistan Railways” [AO «Uzbekiston temir jullari»]. Tashkent, 2018.
 22. Report of the technical department of the signaling and communications service (III) on failures of signaling devices for 2018 [Otchyot tekhnicheskogo otdela sluzhby SCB i svyazi (SH) ob otkazah ustrojstv SCB za 2018 god]. JSC “Uzbekistan Railways” [AO «Uzbekiston temir jullari»]. Tashkent, 2019.
 23. meteocenter.asia - site on Asian meteorological centers (request date 20.05.2019). [sajt po meteocentram Azii (data obrashcheniya 20.05.2019)].
 24. Serdinov S. M. (1985) Improving the reliability of power supply devices for electrified railways [Povyshenie nadezhnosti ustrojstv elektrosnabzheniya elektrificirovannyh zheleznyh dorog]. – 301 p.
 25. Kuchma K. G., Marquardt G. G., Pushnin V. N. (1960) Protection against short-circuit currents in the contact network [Zashchita ot tokov korotkogo zamykaniya v kontaktnoj seti]. Moscow, Transgeldorfizdat. – 259 p.
 26. Lyubimov K. A., Lyalichev V. S., Shepko V. F. (1975) The effect of short circuits in contact networks on signaling and signaling devices [Vliyanie korotkih zamykanij v kontaktnyh setyah na ustrojstva SCB i svyazi]. Moscow, Automation, Remote Control and Communication [Avtomatika, telemekhanika i svyaz']. – Pp. 16–21.
 27. Lyalichev V. S. (1974) Research and limiting overvoltages in AC rail circuits with choke transformers [Issledovanie i ogranichenie perenapryazhenij v rel'sovyh cepyah peremennogo toka s drossel'-transformatorami]. PhD thesis. Moscow. – 186 p.
 28. Radchenko V. D., Sokolov S. D., Sukhoprudsky N. D. (1959). Overvoltage and short-circuit currents in devices of electrified DC railways [Perenapryazheniya i toki korotkogo zamykaniya v ustrojstvakh elektrificirovannyh zheleznyh dorog postoyannogo toka]. Moscow, State transport publishing house [Gostransizdat]. – 304 p.
 29. Kosarev B. I., Zelvyansky Ya. A., Sibarov Yu. G. (1983) Electrical safety in the power supply system of railway transport [Elektrobezopasnost' v sisteme elektrosnabzheniya zheleznodorozhnogo transporta]. Moscow, Transport. – 199 p.
 30. Veksler M. I. (1976) Protecting the DC network from short circuit currents [Zashchita tyagovoj seti postoyannogo toka ot tokov korotkogo zamykaniya]. Moscow, Transport. – 120 p.
 31. Kravchenko K. V. (2011) Protection of railway automation and remote control systems from lightning and switching overvoltages [Zashchita sistem ZHAT ot grozovyh i kommutacionnyh perenapryazhenij], Automation, Communication and Informatics [Avtomatika, svyaz', informatika], issue 4. – Pp. 25–28.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Д.С. Марковым.

Поступил в редакцию 06.05.2019, принята к публикации 30.05.2019.

МАНАКОВ Александр Демьянович – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

e-mail: manakoff_2@mail.ru

РАХМОНБЕРДИЕВ Абдулазиз Абдимажитович – аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

e-mail: raa19860102@gmail.com

© Манаков А. Д., Рахмонбердиев А. А., 2019

Электронное моделирование

УДК 004.021+656.25

А. А. Лыков, канд. техн. наук

Д.С. Марков, канд. техн. наук

В. Б. Соколов, канд. техн. наук

Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I, Санкт-Петербург

ФОРМАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ В ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЯХ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ

Определена внешняя среда как объект формализации и моделирования в имитационных моделях систем обеспечения жизненного цикла (далее – системы) железнодорожной автоматики и телемеханики. Приведены состав и характеристики физических объектов – заявок на обслуживание системами, которые формализуются на основе различных подходов как сложные системы массового обслуживания. Сформулированы формализованные схемы внешней среды на основе представления различных систем открытыми, замкнутыми схемами массового обслуживания, а также с детерминированными потоками заявок. На этой основе предложена идея конструктора генераторов потоков заявок, включающего множество программных модулей, различные варианты соединения которых позволяют синтезировать генераторы с требуемыми для конкретных исследований свойствами.

В работе множество включает тринадцать модулей, для программирования каждого из которых выбраны объекты инструментального средства GPSS World. С использованием выбранных наборов объектов разработаны GPSS-программы всех тринадцати модулей, включенных в конструктор генераторов потоков заявок систем. Все модули прошли тестирование, а некоторые уже нашли практическое применение в реальных моделях, что позволило подтвердить правильность и эффективность предложенного подхода с точки зрения затрат времени на синтез и обеспечения адекватности моделей внешней среды систем обеспечения жизненного цикла железнодорожной автоматики и телемеханики.

системы обеспечения жизненного цикла железнодорожной автоматики и телемеханики, системы массового обслуживания, внешняя среда, заявка, формализованная схема, имитационная модель, конструктор генераторов потока заявок.

DOI: 10.20295/2412-9186-2019-5-3-356-374

Введение

Жизненный цикл (ЖЦ) объектов железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) – это совокупность взаимосвязанных, последовательно выполняемых процессов: формулирование исходных требований, разработка концепций, разработка технических и программных решений, доказательство безопасности, сертификация на безопасность или подтверждение соответствия, проектирование, изготовление аппаратных и программных средств, монтаж и пусконаладочные работы, ввод в эксплуатацию, технологическая и техническая эксплуатация, прекращение тиражирования и утилизация на конкретных объектах. Важнейшим и наиболее длительным этапом ЖЦ является технологическая и техническая эксплуатация, включая модернизацию ЖАТ. При этом безопасность и бесперебойность движения поездов определяются не только потребительскими свойствами, показателями безотказности и безопасности ЖАТ как изделия, но и в определяющей степени качеством систем обеспечения жизненного цикла (СОЖЦ) ЖАТ, к которым относятся:

- система технического обслуживания и ремонта систем и устройств ЖАТ;
- системы технической диагностики и удаленного мониторинга технического состояния (СТДМ) ЖАТ;
- системы электронного документооборота технической документации ЖАТ;
- автоматизированные системы управления хозяйством автоматики и телемеханики (АСУ-Ш).

Разработка и модернизация СОЖЦ ЖАТ предполагает выполнение операционных исследований с целью оценки эффективности принимаемых системотехнических решений [1, 2, 4, 5]. В [3, 4] показано, что процессы, выполняемые СОЖЦ, относятся к дискретным в непрерывном времени, а сами системы формализуются как сложные системы массового обслуживания (ССМО), обозначим S . Тогда для оценки СОЖЦ ЖАТ как ССМО применяются методы имитационного моделирования и имитационные модели (ИМ) [3–8]. В качестве инструментального средства реализации ИМ СОЖЦ ЖАТ традиционно используется моделирующая среда GPSS World [11].

1. Основные положения

В [3, 4] предложена обобщенная формализованная схема (ОФС) СОЖЦ ЖАТ как ССМО, включающая:

- модель внешней среды в виде вектора технологической нагрузки – потока заявок на обслуживание;

- структурно-алгоритмическое описание системы и процесса обслуживания заявок;
- параметрическое описание, включающее вероятностно-временные характеристики внешней среды и процесса обслуживания;
- множество операционных характеристик СОЖЦ ЖАТ.

Ранее авторами были предложены методы функционально-алгоритмической [5, 6], морфологической [3] и «порционной» [4, 7] формализации, позволившие существенно упростить и ускорить построение ИМ ССМО в среде GPSS World с одновременным повышением адекватности моделей СОЖЦ. В работах [3–9] представлены методы построения моделей собственно систем массового обслуживания, но недостаточно внимания уделено построению моделей внешней среды [10]. В данной работе модель внешней среды ограничивается генерацией потоков заявок, при этом не рассматриваются условия и характеристики среды функционирования СОЖЦ ЖАТ (климат, механические, электромагнитные воздействия и т. п.), которые влияют на параметры обслуживающих устройств и связей между ними. Данная работа направлена на восполнение указанного пробела и посвящена исследованию проблемы синтеза генераторов потоков заявок (ГПЗ) в имитационных моделях СОЖЦ ЖАТ.

Операционные исследования СОЖЦ подразумевают оценку влияния их свойств на показатели работоспособности и безопасности ЖАТ, например: коэффициенты технического использования и коэффициенты безопасности устройств и систем ЖАТ, которые, в свою очередь, влияют на показатели бесперебойности и безопасности движения поездов. В такой постановке необходимо в зависимости от целей конкретных исследований отображать в ИМ в требуемых сочетаниях следующие процессы:

- 1) движение подвижных единиц;
- 2) отказы технических средств ЖАТ;
- 3) ошибки оперативного персонала;
- 4) восстановление работоспособного состояния ЖАТ;
- 5) регламентное обслуживание устройств ЖАТ;
- 6) формирование, передачу и обработку измерительных, диагностических и информационных сообщений в СТДМ и АСУ-Ш;
- 7) проектирование объектов ЖАТ, их реализацию и техническую эксплуатацию на основе электронного документооборота технической документации (ЭДТД).

Процессу 1 соответствует заявка – подвижная единица на входе станции, сортировочной горки, перегона, участка железной дороги, которые в этом случае представляют собой открытые ССМО.

Процессу 7 соответствуют заявки на проектирование объектов ЖАТ. Это комплекты технических документов, разрабатываемые и обрабатываемые проектными и другими организациями ЭДТД, которые являются открытыми ССМО.

Процессу 6 соответствуют заявки-сообщения в системах СТДМ и АСУ-Ш, также являющихся открытыми ССМО.

Процессы 2 и 4 взаимосвязаны, т. к. возникающие отказы являются заявками на восстановление работоспособности устройств u и систем ЖАТ подразделениями дистанций сигнализации, которые в данном аспекте являются замкнутыми ССМО. В [3] введено понятие формализованной схемы отказа, включающей структурно-алгоритмическое описание поведения управленческого персонала, устройств и (или) систем при отказах элементов и подсистем ЖАТ; структурно-алгоритмическое описание процесса их восстановления, параметрические, т. е. вероятностно-временные характеристики обоих указанных процессов. Одному типу устройств u_m в конкретном исследовании может быть поставлено в соответствие множество отказов различного вида i , соответственно, множество схем отказов $Q_{m,j}$. Тогда заявкой при моделировании процессов 2 и 4 является инициатива на выполнение в ИМ конкретной схемы отказа.

Процессы 3, связанные с ошибочными действиями оперативных работников служб Д и Ш при технологической и технической эксплуатации ЖАТ, сложны, требуют отдельного анализа с точки зрения построения моделей потоков заявок-ошибок, но, предположительно, могут моделироваться по схеме замкнутых ССМО, схожих с моделями потоков заявок-схем отказов процессов 2 и 4. При этом схема «заявки–ошибки» включают только структурно-алгоритмическое и параметрическое описание поведения ЖАТ и управленческого персонала.

Процесс 5 характеризуется заявками-инициативами на выполнение профилактических работ $R_{m,l}$ в соответствии с технологическим процессом обслуживания устройств u_m , т. е. с жесткими временными рамками поступления заявок $R_{m,l}$ в ССМО – систему обслуживания ЖАТ. При этом поток $R_{m,l}$ формализуется как детерминированный. Следует отметить, что профилактические работы $R_{m,l}$ выполняются теми же подразделениями дистанций сигнализации, что и восстановительные после отказов устройств и систем.

Очевидно, что для всех процессов заявками (подвижные единицы, комплекты документации, инициативы на выполнение каких-либо работ, информационные сообщения, электрические сигналы и т. п.) с точки зрения схемы массового обслуживания являются инициативы на выполнение оборудованием ССМО соответствующего набора операций. Заявки могут быть одного (однородный поток) или разных типов (неоднородный поток). Для СОЖЦ ЖАТ характерны неоднородные потоки заявок, например: грузовые и пассажирские поезда; комплекты технических документов проектов электрической централизации, автоблокировки, автоматической переездной сигнализации; работы по техническому обслуживанию множества устройств ЖАТ и т. п. Понятие типа заявок при использовании схемы массового обслуживания имеет смысл только относительно различий процессов их обслуживания, а именно алгоритмов и (или) вероятностно-временных параметров выполнения операций аппаратными средствами ССМО. Кроме того, заявки различного типа могут по-разному вести себя при постановке и выборе из очереди на обслуживание, что в значительной мере определяется их приоритетами. В общем случае заявки в СО ЖЦ характеризуются типом, приоритетом и множеством свойств. Свойствами заявок различного вида могут являться, например, вес и длина поезда; вид, количество и объем документов в комплекте технической документации; структура и объем диагностических сообщений и т. п. Свойства заявок, как правило, определяют алгоритмические и (или) вероятностно-временные особенности обслуживания конкретных заявок данного типа.

2. Формализация модели внешней среды

Проведенный анализ позволяет формализовать схему внешней среды для СОЖЦ ЖАТ как открытых ССМО (процессы 1, 6, 7) в виде вектора технологической нагрузки:

$$V_T = [N; z_d^i; F(\tau); \lambda(t); P_{hi}(t); C_i^{BX}], \quad (1)$$

где N – множество заявок различного типа h_i , $I = \overline{1, I}$, обслуживаемых системой S (i – идентификатор типа заявки);

z_d^i – множество свойств $d = \overline{1, D}$ заявки i -го типа;

$F(\tau)$ – вероятностно-временная характеристика процесса поступления заявок множества N в систему S (ССМО);

$\lambda(t)$ – зависимость интенсивности потока заявок N от текущего времени;

$P_{hi}(t)$ – вероятность поступления в систему заявки i -го типа в зависимости от текущего времени;

C_i^{BX} – идентификаторы устройств S , начинающих обслуживание заявок i -го типа.

Формализованная схема потоков заявок V_z СОЖЦ, формализуемых как замкнутые ССМО, в данном случае обслуживающие системы ЖАТ (процессы 2, 3, 4), формулируется следующим образом:

$$V_z = [S(U_{m,g}); Q_{m,j}; F(\tau_m); P_{Q_{m,j}}; F(\tau_{m,j}^B)], \quad (2)$$

где $S(U_{m,g})$ – обслуживаемая система, включающая $1 = \overline{1, M}$ типов и $g = \overline{1, G}$ элементов каждого типа $U_{m,g}$;

$Q_{m,j}$ – схемы отказов ($j = \overline{1, J}$) элементов m -го типа;

$F(\tau_m)$ – обобщенная вероятностно-временная характеристика потока отказов для элементов m -го типа Q_m по всем $j = \overline{1, J}$ схемам его отказов;

$P_{Q_{m,j}}$ – вероятность возникновения j -й схемы отказа m -го элемента;

$F(\tau_{m,j}^B)$ – вероятностно-временная характеристика восстановления работоспособного состояния m -го элемента по схеме отказа j -го типа.

Формализованная схема детерминированных потоков заявок СОЖЦ ЖАТ (процесс 5) формулируется следующим образом:

$$V_r = [S(U_k); R_{k,l}; t_{k,l}], \quad (3)$$

где $S(U_k)$ – обслуживаемая система, включающая $k = \overline{1, K}$ элементов на профилактическом обслуживании, причем $K \leq M$;

$R_{k,l}$, $l = \overline{1, L_k}$, – профилактические работы, выполняемые обслуживающей ССМО для k -го элемента системы $S(U_k)$;

$t_{k,l}$ – момент времени начала выполнения l -й работы для k -го элемента $R_{k,l}$.

Особым случаем описания потока заявок является его порционная формализация [4]. Заявка-порция $p_{i,v}$, $v = \overline{1, V}$, – это совокупность заявок единичных объектов (ЕО) $z_{i,v}$, поступивших за i -й интервал ΔT_i , на v -й вход, где i – индекс порции по расположению на оси времени t_i от начала моделируемого периода; V – количество входов в ССМО. Таким образом, поток заявок ЕО аппроксимируется потоком заявок-порций $p_{i,v}$, а случайным объектом является $z_{i,v}$ – количество ЕО в порции. Тогда поток заявок-порций формализуется следующим образом:

$$V_P = [p_{i,v}; t_i; \Delta T_i; z_{i,v}; V]. \quad (4)$$

3. Реализация модели внешней среды в GPSS WORLD

Предложенная формализация потоков заявок позволяет реализовать идею конструктора ГПЗ СОЖЦ ЖАТ, т. к. определяет состав программных модулей (M_n) и выбор средств их реализации в среде GPSS WORLD. При этом идея конструктора ГПЗ заключается в возможности сборки различных ГПЗ из M_n , $n=\overline{1, N}$, по требованиям конкретных исследований. Множество $\{M_n\}$ в соответствии с выражениями (1)–(4) включает следующие модули:

- $M_1 (F(\tau))$ – модуль генерации однородного потока заявок с заданной функцией распределения интервалов времени ($F(\tau)$);
- $M_2 (\lambda(t))$ – модуль представления зависимости $\lambda(t)$ в виде табличной функции или арифметического выражения;
- $M_3 (\Phi(t))$ – модуль определения типа заявки по схеме полной группы событий с изменяющимися во времени соотношениями;
- $M_4 (z_d^i)$ – модуль задания свойств заявок на основе процедур вероятностного розыгрыша или детерминированного подхода с использованием табличных функций или арифметических выражений;
- $M_5 (C_i^{BX})$ – модуль задания идентификатора обслуживающего устройства, начинающего обслуживание заявки i -го типа в моделируемой ССМО;
- $M_6 (U_{m,g})$ – модуль генерации заявок по количеству M типов устройств и количеству G устройств каждого типа;
- $M_7 F(\tau_m)$ – модуль задания вероятностно-временных характеристик интервалов времени между отказами для каждого типа ($m=1, M$) устройств;
- $M_8 (P_{Q_{m,j}})$ – модуль идентификации j -й заявки – схемы отказа устройства m -го типа $Q_{m,j}$;
- $M_9 F(\tau_{m,j}^B)$ – модуль, задающий время обработки заявки $Q_{m,j}$ и определяющий переход к заданию времени появления следующего отказа m -го устройства (M_7). Следует отметить, что такой алгоритм практически не вносит искажений в процесс генерации потока отказов, т. к. $\tau_m \gg \tau_{m,j}^B$;
- $M_{10} (K)$ – модуль генерации множества транзактов, представляющих обслуживаемые устройства u_k , $k=\overline{1, K}$;
- $M_{11} (R_{k,l}; t_{k,l})$ – модуль генерации детерминированного потока заявок – регламентных работ $R_{k,l}$ – по заданным в табличном виде значениям $t_{k,l}$ и индексам работ l_k по каждому устройству;

- $M_{12}(V)$ – модуль генерации транзактов по количеству V входов ССМО;
- $M_{13}(t_i; \Delta T_i; z_{i,v}; p_{i,v})$ – модуль генерации заявок-порций $p_{i,v}$ на V входов ССМО по заданным в табличном виде значениям $t_i, \Delta T_i, z_{i,v}$.

Рассмотрим средства реализации модулей M_1 – M_{13} в среде GPSS World.

Модуль M_1 – оператор `generate`, в операндах A и B которого задаются вид и параметры функции распределения интервалов времени $F(\tau)$ между моментами появления заявок в генерируемом потоке. Инструментальное средство GPSS World содержит встроенные генераторы случайных величин с 24 различными, наиболее часто встречающимися на практике функциями распределения, что вполне достаточно для синтеза моделей 1–4 внешней среды СОЖЦ ЖАТ.

Модуль M_2 – выражение встроенного языка PLUS, арифметическая переменная `variable`, непрерывная функция `C`, описывающие зависимость $\lambda(t)$, аргументом которых является текущее время t (например, значения соответствующих ячеек памяти программы `timer` [10]). Имя полученного описания с учетом выбранного для этого средства GPSS указывается в операнде A оператора `generate`.

Модуль M_3^1 – дискретные функции `D` и оператор `assign`. Если вероятности появления заявок в неоднородном потоке не зависят от текущего времени и поток является ординарным, то для розыгрыша типа заявки i по схеме полной группы несовместных событий достаточно использовать одну дискретную функцию `D` (например, с именем `typ`), аргументом которой является случайное равномерно распределенное на интервале $[0-1]$ число, а функцией – идентификаторы (например, номера) типов заявок. Тогда для присвоения транзакту типа заявки i достаточно в какой-либо его параметр (как правило, $P1$) записать оператором `assign 1,fn$typ` значение функции `typ`.

Модуль M_3^2 – на практике вероятность появления заявок различного типа на транспорте, как правило, зависит от времени суток, сезона и т. п. В соответствии с этим свойства полной группы событий также зависят от текущего времени. Для описания этой ситуации предлагается использовать I дискретных функций по количеству типов заявок (идентификаторы функций – номера заявок). Выделить статистически стационарные фрагменты потока по всем типам заявок в текущем времени. Аргумент всех $F_i, i=\overline{1, I}$, функций – значение текущего времени для заданного периода (для систем

реального времени это смена, сутки), а функция – значение вероятности появления заявки i -го типа. Таким образом, вероятностная характеристика полной группы несовместных событий в зависимости от текущего времени описывается значениями I дискретных D -функций по всем стационарным фрагментам неоднородного потока заявок.

	savevalue	l1,m10;	(1)
	assign	l,1;	(2)
ndfunct	test le	xl1,fn*1,sign1;	(3)
	transfer	,identVH;	(4)
sign1	assign	l+,1;	(5)
	transfer	,ndfunct;	(6)

Операторы 3, 5, 6 организуют цикл сравнения значений D -функций со случайным числом в ячейке $l1$ (оператор 1). В результате сравнения (оператор 3) в параметре l транзакта сохраняется номер последней сравниваемой D -функции, т. е. индекс типа заявки i (оператор 5). Транзакт с присвоенным типом заявки направляется оператором 4 на вход ССМО в соответствии с идентификаторами входов C_i^{BX} .

Модуль M_4 – параметры транзакта, операторы assign, записывающие значения свойств заявки в параметры транзакта, количество которых не ограничено.

Модуль M_5 – множество операторов test и transfer, количество которых определяется количеством типов заявок I .

tip1	test e	p1,1,tip2;	(1)
	transfer	,ustr1;	(2)
tip2	test e	p1,2,typ3;	(3)
	transfer	,ustr2;	(4)

Операторы 1, 3 определяют тип заявки i по параметру $P1$ вошедшего транзакта, причем оператором 2 либо отправляется на соответствующий типу заявки вход ССМО, либо передается следующему оператору test (3). Указанные процедуры повторяются до отправки каждого вошедшего транзакта на соответствующий вход ССМО.

Модуль M_6 – операторы split, savevalue, assign, матрица ячеек памяти mx\$kvou.

	generate	1,,1;	(1)
	split	x100,rrr;	(2)
	terminate;		(3)
rrr	savevalue	1+,1;	(4)
	assign	1,x1;	(5)
	split	mx\$kvou(p1,1),tmo	(6)
	terminate;		(7)

Оператор 1 вводит в модель один основной транзакт, который копируется оператором 2. Количество создаваемых копий задано в ячейке памяти X100 и равно количеству типов устройств M , входящих в ССМО. Операторы 4, 5 присваивают параметру P1 копий индексы $m=\overline{1, M}$. Оператор 6 создает для каждого транзакта с индексом m количество копий, равное количеству устройств данного типа G в ССМО, заданное в матрице mxkvou$.

Модуль M_7 – операторы assign, advance, матрица ячеек памяти totk.

tmo	assign	5,mx\$totk(p1,1);	(1)
	assign	6,mx\$totk(p1,2);	(2)
	advance	p5,p6;	(3)

Оператор 1 записывает в параметр P5 из матрицы totk среднее время между отказами m -го устройства по его индексу m , записанному в P1 транзакта. Аналогично в параметр P6 из mxtotk$ оператором (2) записывается модификатор. Оператор (3) задерживает транзакт на время τ_m в соответствии с функцией $F(\tau_m)$, заданной в его параметрах P5, P6.

Модуль M_8 – дискретные функции $D\ shotk(1..M)$, аргументом которых являются случайные равномерно-распределенные числа на интервале $[0,1]$ (генераторы $rn1..rnM$), а значениями функций – индексы схем отказов j_m для m -го устройства $Q_{m,j}$; операторы assign, test, transfer.

	test e	p1,1,ustr2;	(1)
	assign	2,fn\$shotku1;	(2)
	test e	p2,1,sh12;	(3)
	transfer	,shotk11;	(4)
sh12	test e	p2,2,sh13;	(5)
	transfer	,shotk12;	(6)
sh13	test e	p2,3,sh14;	(7)
	transfer	,shotk13;	(8)

Оператор 1 по значению параметра P1 определяет принадлежность транзакта устройству с индексом $m=1$. Если $P1>1$, то выполняется переход к аналогичному оператору для проверки $P1>2$ и т. д. до выполнения условия $P1=m$, т. е. до определения принадлежности транзакта устройству с индексом m . Например, если $P1=1$, то оператор 2 присваивает параметру P2 значение j_1 дискретной функции $shotku_1$, которое является индексом схемы отказа $Q_{1,j}$ устройства u_1 в текущей реализации модели. Далее операторами 3, 5, 7, ... по значению параметра P2 определяется принадлежность транзакта j_1 -й схеме отказа устройства с индексом 1. Операторы 4, 6, 8 ... передают транзакт модели j_1 -й схеме отказа. Количество пар операторов *test*, *transfer* для данного устройства равно (J_1-1) . Общий объем программы модуля M_8 определяется количеством типов устройств M и количеством схем отказов $\sum I_m$, учитываемых в модели. Следует отметить, что для различных устройств одного типа выполняются одни и те же операторы модуля M_8 .

Модуль M_9 – операторы *assign*, *advance*, *transfer*, матрицы ячеек памяти $mx(m)$ ($mx1 \dots mxM$). Матрицы имеют индекс устройств m (параметр P1), а их строки – индекс схемы отказа j_m (параметр P2). В первом столбце $mx(m)$ записано среднее время $\tau_{m,j}^B$, во втором – его модификатор.

<i>assign</i>	$10, mx*1(p2,1);$	(1)
<i>assign</i>	$11, mx*1(p2,2);$	(2)
<i>advance</i>	$p10, p11;$	(3)
<i>transfer</i>	$, tmo;$	(4)

Оператор 1 по значению первого параметра *1 обращается к m -й матрице, по параметру P2 – к ее j -й строке и первому столбцу. Тем самым в параметр P10 записывается среднее время $\tau_{m,j}^B$. Аналогично оператор 2 записывает в параметр P11 из второго столбца значение модификатора. Оператор 3 по значениям параметров P10, P11 выполняет задержку транзакта на время обработки схемы отказа $Q_{m,j}$ в текущей реализации модели. По окончании задержки оператором 4 транзакт отправляется на генерацию следующего отказа m -го устройства (модуль M_7).

Модуль M_{10} – операторы *generate*, *split*, *assign*, *savevalue*, *transfer*, *terminate*.

<i>generate</i>	$1,,1;$	(1)
<i>split</i>	$x2, ggg;$	(2)
<i>terminate</i> ;		(3)
<i>ggg savevalue</i>	$1+,1;$	(4)

	assign	1,x1;	(5)
gis1	assign	2,1;	(6)
	assign	12,1;	(7)
	assign	10,1;	(8)
	split	1,rrr;	(9)
	transfer	,rab;	(10)

Операторы 1, 2 вводят в модель K транзактов, каждый из которых представляет устройство, находящееся на регламентном обслуживании. Количество таких устройств K записывается в ячейку памяти $x2$ командой `initial` до начала моделирования. Операторы 4, 5 присваивают транзактам (параметр $p1$) индекс устройства k . Оператор 6 иницирует параметр $p2$ для последующей обработки матриц регламентных работ. Операторы 7 и 8 присваивают параметрам $p10$, $p12$ начальное время и индекс первой регламентной работы соответственно. Операторы 9, 10 отправляют основной транзакт на выполнение модели первой регламентной работы $R_{k,1}$, а копию – на обработку матриц регламентных работ.

Модуль M_{11} – операторы `split`, `assign`, `savevalue`, `transfer`, `test`; матрицы регламентных работ $mx1 \dots mxK$. Матрицы имеют индекс устройств на регламентном обслуживании k , при этом количество строк L_k k -й матрицы равно количеству работ, выполняемых для данного устройства. В первом столбце строки $mx(k)$ записано время начала выполнения работы $t_{k,1}$, во втором – индекс работы $1 \dots L_k$. В первом столбце последней строки $mx(k)$ записано любое отрицательное число как знак окончания цикла работ по k -й матрице.

	rrr	assign 2+,1;	(1)
	test g	$mx * 1(p2,1), 0, rmi1$;	(2)
	assign	$12, mx * 1(p2,1)$;	(3)
	assign	$11, (mx * 1(p2,2) - p10)$;	(4)
	assign	$10, mx * 1(p2,2)$;	(5)
	advance	$p11$;	(6)
	split	$1, rab$;	(7)
	transfer	$, rrr$;	(8)
rmi1	savevalue	$10+, 1$;	(9)
	transfer	$, gis1$;	(10)

Оператор 1 присваивает параметру $p2$ индекс текущей строки $mx(k)$. Оператор 2 определяет завершение цикла обработки по каждой $mx(k)$. Если элемент матрицы $mx(k)(p2,1)$ – отрицательное число, то транзакт передается

оператору 9 – счетчику количества завершений, а затем оператору 10 для выполнения следующего цикла. В противном случае выполняются операторы 3, 4, 5: в параметр p12 записывается индекс следующей работы, p10 – время начала предыдущей работы, p11 – интервал времени между моментами начала предыдущей и следующей работы. Оператор 6 выполняет задержку транзакта до момента начала следующей работы. Операторы 7, 8 отправляют основной транзакт на начало цикла обработки $mx(k)$ – оператор 1, а транзакт-копию по метке gab на выполнение модели регламентной работы по индексу в параметре p12.

Модуль M_{12} – операторы generate, split, assign; ячейка памяти x2, в которую записано количество V входов ССМО.

	generate	1,,1;	(1)
	split	x2,ggg;	(2)
	terminate;		(3)
ggg	savevalue	1+,1;	(4)
	assign	1,x1;	(5)
gis1	assign	2,0;	(6)

Операторы 1, 2 вводят в модель (ячейка x2) V транзактов по количеству входов ССМО. Операторы 4, 5 присваивают первому параметру индекс входа v . Оператор 6 иницирует параметр p2 для дальнейшей обработки матриц входов.

Модуль M_{13} – операторы: assign, test, split, advance, savevalue; матрицы входов $mx1 \dots mxV$, количество строк которых равно количеству моментов времени t_i передачи транзактов, представляющих заявки-порции $p_{i,v}$ на входы ССМО. В первый столбец матриц записывается количество $z_{i,v}$ единичных объектов потока заявок ЕО по v -му входу для интервала $\Delta T_i = t_{i+1} - t_i$, а во второй – значение t_i . Заполнение матриц $mx(v)$ данными $z_{i,v}$, t_i может выполняться как до начала, так и в процессе моделирования.

rrr	assign	2+,1;	(1)
	assign	3,(p2+1);	(2)
	test g	$mx*1(p3,1),0,rmi1$;	(3)
	assign	$12,mx*1(p2,1)$;	(4)
	assign	$10,mx*1(p2,2)$;	(5)
	assign	$11,mx*1(p3,2)$;	(6)
	assign	$14,(p11-p10)$;	(7)
	split	1,vhod;	(8)

	advance	p14;	(9)
	transfer	,rrr;	(10)
rmi1	savevalue	10+,1;	(11)
	transfer	,gis1;	(12)

Следует отметить, что программа модуля M_{13} разработана на основе программы модуля M_{11} . Операторы 1, 2 присваивают параметрам p_2 и p_3 текущие значения индексов i строк матриц $mx_1 \dots mx_V$. Оператор 2 определяет завершение цикла обработки по каждой $mx(v)$. Если элемент матрицы $mx(v)(p_2,1)$ – отрицательное число, то транзакт передается оператору 11 – счетчику циклов, а затем оператору 12 для выполнения следующего цикла. В противном случае выполняются операторы 4, 5, 6, 7: в параметр p_{10} записывается время начала текущего интервала $\Delta T_i - t_i$, в параметр p_{11} – время окончания интервала $\Delta T_i - t_{i+1}$, в параметр p_{12} – значение $z_{i,v}$ для интервала $\Delta T_i = t_{i+1} - t_i$, в параметр p_{14} – значение интервала ΔT_i . Оператор 8 отправляет основной транзакт на задержку на время ΔT_i , а транзакт-копию на v -й вход ССМО с информацией в параметрах $p_1, p_{10}, p_{11}, p_{12}, p_{14}$, достаточной для выполнения моделей обслуживающих устройств [7]. По окончании задержки оператором 9 основной транзакт оператором 10 передается на начало цикла обработки матриц $mx(v)$.

Заключение

Предложенный набор модулей M_1 – M_{13} и их программная реализация в среде GPSS World решает поставленную в работе задачу разработки конструктора генераторов потоков заявок с различными свойствами. Для синтеза ГПЗ достаточно в требуемом порядке соединить нужные для решения конкретной задачи модули из множества M_1 – M_{13} . Для примера ГПЗ в соответствии с формализованными схемами (1), (2), (3), (4) в алфавите модулей реализуются следующим образом:

$$(1) \text{ ГПЗ}(V_T) = M_1 \& M_2 \& (M_3^1 \text{ или } M_3^2) \& M_4 \& M_5;$$

$$(2) \text{ ГПЗ}(V_z) = M_6 \& M_7 \& M_8 \& M_9;$$

$$(3) \text{ ГПЗ}(V_r) = M_{10} \& M_{11};$$

$$(4) \text{ ГПЗ}(V_p) = M_{12} \& M_{13}.$$

Настройка модулей выполняется на уровне исходных данных заполнением соответствующих матриц, ячеек памяти, табличных функций, заданием

параметров стандартных функций GPSS без изменения текстов программ модулей. Отдельные модули M_1 , M_3^2 , M_6 , M_8 , M_{13} применялись авторами в моделях: электронного документооборота технической документации ЖАТ, системы технической диагностики и удаленного мониторинга устройств ЖАТ, обслуживания пассажиропотоков на метрополитене, а также в моделях автоматизированных технологических комплексов на станциях и перегонах, что и явилось предпосылкой выполнения данной работы.

Полученные результаты:

- определено понятие внешней среды СОЖЦ ЖАТ как ССМО;
- определен состав заявок для всех рассматриваемых СОЖЦ ЖАТ;
- сформулирована идея конструктора генераторов потоков заявок СОЖЦ ЖАТ как сложных ССМО;
- предложены формализованные схемы внешней среды систем обеспечения жизненного цикла ЖАТ;
- на основе анализа формализованных схем определены состав и задачи функциональных модулей M_1 – M_{13} , включенных в конструктор;
- определены средства GPSS World для разработки программ модулей M_1 – M_{13} ;
- представлены GPSS-программы модулей M_1 – M_{13} .

Перспективы:

- расширение и детализация формализованных схем и набора модулей для моделирования СОЖЦ ЖАТ;
- автоматизация процедур синтеза ГПЗ из предложенного набора модулей;
- доработка программ модулей с целью управления процессами генерации потоков заявок во время моделирования в соответствии с планом проведения серий имитационных экспериментов;
- выполнение практических исследований операционных характеристик СОЖЦ ЖАТ с использованием конструктора ГПЗ и программных средств алгоритмической, морфологической или порционной формализации имитационных моделей.

Библиографический список

1. Лыков А. А. Техническое диагностирование и мониторинг состояния устройств ЖАТ / А. А. Лыков, Д. В. Ефанов, С. В. Власенко // Транспорт Российской Федерации. – 2012. – № 5. – С. 67–72.

2. Лыков А. А. Методика комплексной оценки показателей эффективности систем технического диагностирования и мониторинга / А. А. Лыков, Д. С. Марков, С. В. Бочкарев // Развитие элементной базы и совершенствование методов построения устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : сб. науч. тр. – СПб. : ПГУПС, 2014. – С. 14–23.
3. Марков Д. С. Метод формализации имитационных моделей технологических процессов в хозяйстве автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте / Д. С. Марков, А. А. Лыков // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2012. – № 1. – С. 23–28.
4. Марков Д. С. Метод порционного моделирования транспортных систем массового обслуживания / Д. С. Марков, В. Б. Соколов // Развитие элементной базы и совершенствование методов построения устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : сб. науч. тр. – СПб. : ПГУПС, 2014. – С. 43–47.
5. 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. 63–74.
6. Марков Д. С. Иерархическая многоматричная формализация имитационной модели электронного документооборота технической документации / Д. С. Марков, П. Е. Булавский // Актуальные вопросы развития систем железнодорожной автоматики и телемеханики : сб. науч. тр. – СПб. : ПГУПС, 2013. – С. 52–60.
7. Марков Д. С. Синтез GPSS-модели обслуживающих устройств сложных систем массового обслуживания на основе порционной формализации / Д. С. Марков, В. Б. Соколов, В. А. Соколов // Автоматика на транспорте. – 2016. – Том 2. – № 3. – С. 442–455.
8. Василенко М. Н. Имитационная модель обслуживания пассажиропотоков на метрополитене / М. Н. Василенко, Д. С. Марков, В. Б. Соколов, К. Г. Сорокин // Конструирование, сертификация и техническая эксплуатация устройств и систем ж.-д. автоматики и телемеханики : сб. науч. тр. – СПб. : ПГУПС, 2003. – С. 17–25.
9. Марков Д. С. Формализация алгоритмического описания систем обеспечения жизненного цикла железнодорожной автоматики и телемеханики / П. Е. Булавский, Д. С. Марков, В. Б. Соколов, Т. Ю. Константинова // Автоматика на транспорте. – 2015. – Том 1. – № 4. – С. 418–433.
10. Марков Д. С. Моделирование потока заявок сложных систем на языке GPSS / Д. С. Марков, М. Н. Василенко, А. В. Гриненко // Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте : сб. ЦНИИ ТЭИ МПС. – 1981. – № ДР1252. – С. 57–65.
11. Кудрявцев Е. М. GPSS WORLD. Основы имитационного моделирования различных систем / Е. М. Кудрявцев. – М. : ДМК Пресс, 2004. – 317 с.

*Andrey A. Lykov,
Dmitry S. Markov,
Vadim B. Sokolov*

«Automation and remote control on railways» department
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg

FORMALIZATION OF ENVIRONMENTAL MODELS IN SIMULATION MODELS OF RAILWAY AUTOMATION LIFE CYCLE SUPPORT SYSTEMS

The external environment is defined as an object of formalization and modeling in simulation models of life cycle support systems (hereinafter systems) of railway automation and remote control. The composition and characteristics of physical objects - service requests by systems, which are formalized on the basis of different approaches as complex queuing systems, are given. Formalized schemes of the external environment are formulated on the basis of representation of various systems by open, enclosed queuing schemes, and also with deterministic flows of applications. On this basis, the idea of the request flow generator designer is proposed, which includes a set of software modules with various connection options that allow to synthesize generators with the properties required for specific studies. In this work, the set includes thirteen modules, for programming each of which objects of the tool GPSS World are selected. Using the selected sets of objects, the GPSS programs of all thirteen modules included in the system request flow generator designer have been developed. All modules have been tested, and some have already found practical application in real models, which allowed to confirm the correctness and effectiveness of the proposed approach in terms of time spent on the synthesis and ensuring the adequacy of the models of the external environment of the life cycle of railway automation and remote control systems.

life cycle support systems for railway automatics and telemechanics, Queuing systems, external environment, application, formalized scheme, simulation model, request flow generator designer.

References

1. Lykov A. A., Efanov D. V., Vlasenko S. V. (2012) Technical diagnostics and monitoring of railway automation and remote control [Tekhnicheskodiagnostirovaniei monitoring sostoyaniyaustrojstv ZHAT], Transport of the Russian Federation [Transport Rossijskoj Federatsii], 2012, issue 5. – Pp. 67–72.
2. Lykov A. A., Markov D. S., Bochkarev S. V. (2014) Methodology for a comprehensive assessment of the performance indicators of technical diagnostic systems and monitoring [Metodika kompleksnoj otsenki pokazatelej effektivnosti sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya i monitoringa], Component base development and railway automation and remote control devices design methods improvement. St. Petersburg, Proceedings St. Petersburg state transport university [PGUPS], 2014. – Pp. 14–23.
3. Markov D. S., Lykov A. A. (2012). Method for formalization of simulation models of technological processes within railway transport automation and remote control facilities [Metod formalizatsii imitatsionnykh modelej tekhnologicheskikh protsessov v khozyajstve avtomatiki i telemekhaniki na zheleznodorozhnom transporte], Proceedings St.

- Petersburg state transport university [Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya], issue 1. – Pp. 23–28.
4. Markov D. S., Sokolov V. B. (2014) The method of portion modeling of transport queuing systems. Component base development and railway automation and remote control devices design methods improvement [Metod portsiionnogo modelirovaniya transportnykh sistem massovogo obsluzhivaniya. Razvitie elementnoj bazy i sovershenstvovanie metodov postroeniya ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki], Edition VI. V. Sapozhnikov. St. Petersburg, Proceedings St. Petersburg state transport university [PGUPS], 2014. – Pp. 43–47.
 5. Bulavsky P. E., Markov D. S. (2010) The matrix method of complex queuing system simulation models formalization [Matrichnyj metod formalizatsii imitatsionnykh modelej slozhnykh sistem massovogo obsluzhivaniya], Proceedings St. Petersburg state transport university [Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya], 2010, issue 4. – Pp. 186–195.
 6. Markov D. S., Bulavskij P. E. (2013) Hierarchical multi-matrix formalization of a simulation model of electronic document management of technical documentation [Ier-arhicheskaya mnogomatrixnaya formalizatsiya imitatsionnoj modeli elektronnoho dokumentooborota tekhnicheskoy dokumentatsii], Actual issues of the development of railway automation and telemechanics systems, St. Petersburg, Proceedings St. Petersburg state transport university [PGUPS], 2013. – Pp. 63–74.
 7. Bulavsky P. E., Markov D. S., Sokolov V. B., Sokolov V. A. (2016) Synthesis of GPSS-model of service devices of complex queuing systems, based on the batchwise formalization [Sintez GPSS-modeli obsluzhivayushchikh ustrojstv slozhnykh sistem massovogo obsluzhivaniya na osnove portsiionnoj formalizatsii], Automation on transport [Avtomatika na transporte], 2016, vol. 2, issue 3. – Pp. 442–455.
 8. Vasilenko M. N., Markov D. S., Sokolov V. B., Sorokin K. G. (2003) Simulation model of passenger handling for subway, Engineering, certification and technical operation of railway automation and remote control devices and systems [Imitatsionnaya model' obsluzhivaniya passazhiropotokov na metropolitene. Konstruirovaniye, sertifikatsiya i tekhnicheskaya ekspluatatsiya ustrojstv i sistem zhd. Avtomatiki i telemekhaniki], Proceedings St. Petersburg state transport university [PGUPS], St. Petersburg. – Pp. 17–25.
 9. Bulavsky P. E., Markov D. S., Sokolov V. B., Konstantinova T. Yu. (2015) Formalization of algorithmic description of systems of railway automation and remote control life cycle provision [Formalizatsiya algoritmicheskogo opisaniya sistem obespecheniya zhiznennogo tsikla zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki], Automation on transport [Avtomatika na transporte]. Proceedings St. Petersburg state transport university, 2015, vol 1, issue 4. – Pp. 418–433.
 10. Markov D. S., Vasilenko M. N., Grinenko A. V. (1981) Modeling the application flow for complex systems in the GPSS language [Modelirovaniye potoka zayavok slozhnykh sistem na yazyke GPSS], Automatics and telemechanics at the railway transport [Avtomatika i telemekhanika na zheleznodorozhnom transporte]. CNII TEI MPS. – 1981. – issue DR1252. – Pp. 57–65.
 11. Kudryavtsev E. M. (2004). GPSS WORLD. Fundamentals of simulation modelling of different systems [Osnovy imitatsionnogo modelirovaniya razlichnykh sistem]. Moscow, DMK Press. – 317 p.

Статья представлена к публикации членом редколлегии М.Н. Василенко.

Поступила в редакцию 07.02.2019, принята к публикации 13.05.2019.

ЛЫКОВ Андрей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I
e-mail: bastdrew@mail.ru

МАРКОВ Дмитрий Спиридонович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I
e-mail: MDS1945@yandex.ru

СОКОЛОВ Вадим Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I
e-mail: SVB9@yandex.ru

© Лыков А. А., Марков Д. С., Соколов В. Б., 2019

УДК 004.942+656.25

П. Е. Булавский, д-р техн. наук
О. К. Ваисов

Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»,
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I, Санкт-Петербург

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ С ПОМОЩЬЮ СЕТЕЙ ПЕТРИ

Рассматривается определение области применения аппарата сетей Петри для формализации технологических процессов с учетом особенностей электронного документооборота технической документации, разработка имитационной модели для оценки качества технической документации на устройства систем железнодорожной автоматики и телемеханики путем анализа временных параметров выполнения технологических процессов. Используются методы теории сетей Петри, которая базируется на дискретно-событийной парадигме. Разработаны требования к средствам моделирования и классификация различных расширений сетей Петри, формализованы технологические цепочки процессов ЭДТД на базе цветных временных сетей Петри и упрощенная ИМ с использованием иерархических временных цветных сетей Петри для оценки качества технической документации технологических процессов электронного документооборота технической документации.

Представленные упрощенные модели технологических процессов электронного документооборота технической документации и возможности предложенной ИМ на базе аппарата сетей Петри дают возможность оценить качество электронного документооборота технической документации путем анализа состояния и фиксации времени выполнения операций. ИМ дает возможность определять проблемные участки технологических процессов при анализе состояния сетей Петри, в конечном итоге выработать рекомендации по снижению временных затрат на проектирование, проведение пусконаладочных работ и ведение комплекта технической документации, в целом способствуя повышению ее качества.

электронный документооборот технической документации, цветные сети Петри, качество технической документации, маркировка, позиции, переходы, дуги, события, условия, иерархия, вложенность.

DOI: 10.20295/2412-9186-2019-5-3-375-390

Введение

Оценка параметров электронного документооборота технической документации (ЭДТД) систем железнодорожной автоматики и телемеханики

(СЖАТ) предполагает выполнение системных исследований методом имитационного моделирования с учетом территориальной распределенности средств ЭДТД, временной продолжительности реализации проектов СЖАТ, большого числа участников, решающих разнородные задачи [1].

Существенное влияние на все процессы жизненного цикла СЖАТ оказывает качество технической документации (ТД), под которым понимается весь объем признаков и характеристик ТД, относящихся к ее способности удовлетворять установленные потребности [2].

В данной статье рассматриваются основные требования, предъявляемые к методам и средствам моделирования технологических процессов ЭДТД, а также классификация различных расширений сетей Петри (СП). Оценка качества ТД выполнена путем формализации на базе методологии СП и имитационного моделирования с применением возможностей среды моделирования CPN Tools.

Система CPN Tools является специальной средой моделирования, которая использует аппарат СП и язык функционального программирования CPN ML [3].

1. Основные положения

В соответствии с предложенными определениями ТД в статье [4] сформулированы требования к методам и моделям ЭДТД для моделирования при помощи аппарата СП:

1. Формализация ЭДТД с учетом их особенностей, таких как территориальная распределенность средств ЭДТД, большая продолжительности реализации проектов СЖАТ, значительное число участников, решающих разнородные задачи, и влияние качества ТД на процессы ЭДТД.
2. Моделирование иерархических структур с возможностью представления многоуровневой структуры, в которой выделяются сети различного уровня.
3. Вложенность, т. е. возможность замещать одним переходом СП несколько сетей, характеризующих технологические цепочки ЭДТД.
4. Задание детерминированного или вероятностного характера времени выполнения технологических цепочек ЭДТД.
5. Выполнение процедур перехода от материалов обследования деятельности предприятия, представленных с учетом требований стандарта IDEF, к имитационному моделированию процессов ЭДТД.

6. Наличие возможности анализа параллельных технологических процессов ЭДТД.
7. Простота выполнения процедур, анализ сложных систем массового обслуживания.
8. Возможность наглядного представления процессов выполнения технологических цепочек.
9. Наличие инструментальных средств диагностирования и отладки имитационных моделей на базе методологии СП.
10. Относительная простота алгоритмизации и программной реализации технологических цепочек ЭДТД.
11. Формализация множества операций и проверок логических условий.

На базе этих требований был проведен анализ существующих методов формализации и инструментальных средств ИМ технологических процессов ЭДТД. Он показал, что GPSS World является эффективным инструментом имитационного моделирования, свободным от ограничений аналитических и численных методов, с нестандартной обработкой данных и снимающим с программиста множество нетривиальных проблем программирования и отладки моделей. Но следует отметить некоторые серьезные недостатки: отсутствие визуального представления схемы технологической линии; отсутствие возможности регулирования темпа автоматического моделирования; невозможность простого отслеживания технологических процессов; медленное пошаговое продвижение транзактов, что при моделировании в среде требует высокой квалификации программиста.

2. Классификация расширений сетей Петри

Рассмотрим классификацию СП для выявления наиболее подходящих для целей моделирования технологических цепочек ЭДТД. Она представлена в виде схемы (рис. 1).

Все виды элементарных СП являются модификациями классической, т. е. простыми СП [5]. Данная сеть – наиболее универсальная из всех элементарных.

В автоматной СП каждый переход имеет ровно одно входное и ровно одно выходное место. Автоматные сети, как правило, формализуют последовательные процессы с ветвлением по условию.

В синхронизационных графах у каждой позиции есть не более одного входа и не более одного выхода. При помощи этой сети производится моделирование последовательно-параллельных процессов.

WF-сеть является подклассом СП и сетью потоков работ. Она применяется для проверки графов потоков работ на существование определенных структурных конфликтов, таких как «тупики» и «недостатки синхронизации». Структурные конфликты не наблюдаются, если выполняется условие бездефектности WF-сети.

Сеть свободного выбора характеризуется тем, что каждая дуга, выходящая из позиции, это либо единственный выход из нее, либо единственный вход в переход. Такие сети применяются для формализации процессов управления.

Ингибиторные СП содержат дуги определенного типа – так называемые ингибиторные дуги, которые препятствуют срабатыванию перехода, если во входной позиции, связанной с переходом ингибиторной дугой, находится фишка. Такие сети используются в случаях, когда необходимо выполнить проверку маркировки позиции на ноль.

Элементарные сети Петри либо являются универсальными алгоритмическими системами, либо требуют для представления ряда объектов составления моделей, размер которых стремится к бесконечности. В частности, это можно сказать о простых СП, поскольку любая иерархическая цветная СП может быть заменена простой сетью Петри бесконечной размерности. Один из главных недостатков классических СП – невозможность моделирования любого произвольного объекта [6].

Особенностью специальных СП является высокая сложность их устройства. Специальные сети имеют характеристики, позволяющие точнее определять те или иные свойства реальных объектов и систем.

Временные сети Петри используются при моделировании изменения состояния объекта с течением времени. На практике процессы не протекают мгновенно, потому необходимо учитывать и фиксировать их продолжительность. Такие возможности предоставлены во временных СП и других, основанных на комбинировании различных расширений сетей.

Стохастические СП предназначены для учета специфических особенностей, например вероятностного характера многих событий, имеют ряд расширений, таких как детерминированные, обобщенные, флюидные и гибридные. Однако следует обратить внимание и на недостаток, так как при моделировании сложных объектов для ряда прикладных задач, в частности в системах поддержки принятия решений, одной из проблем становится обеспечение предсказуемости [7], т. е. одинакового результата работы при одних и тех же входных данных. Стохастические СП не обладают свойством предсказуемости, следовательно, их практическое применение ограничено.

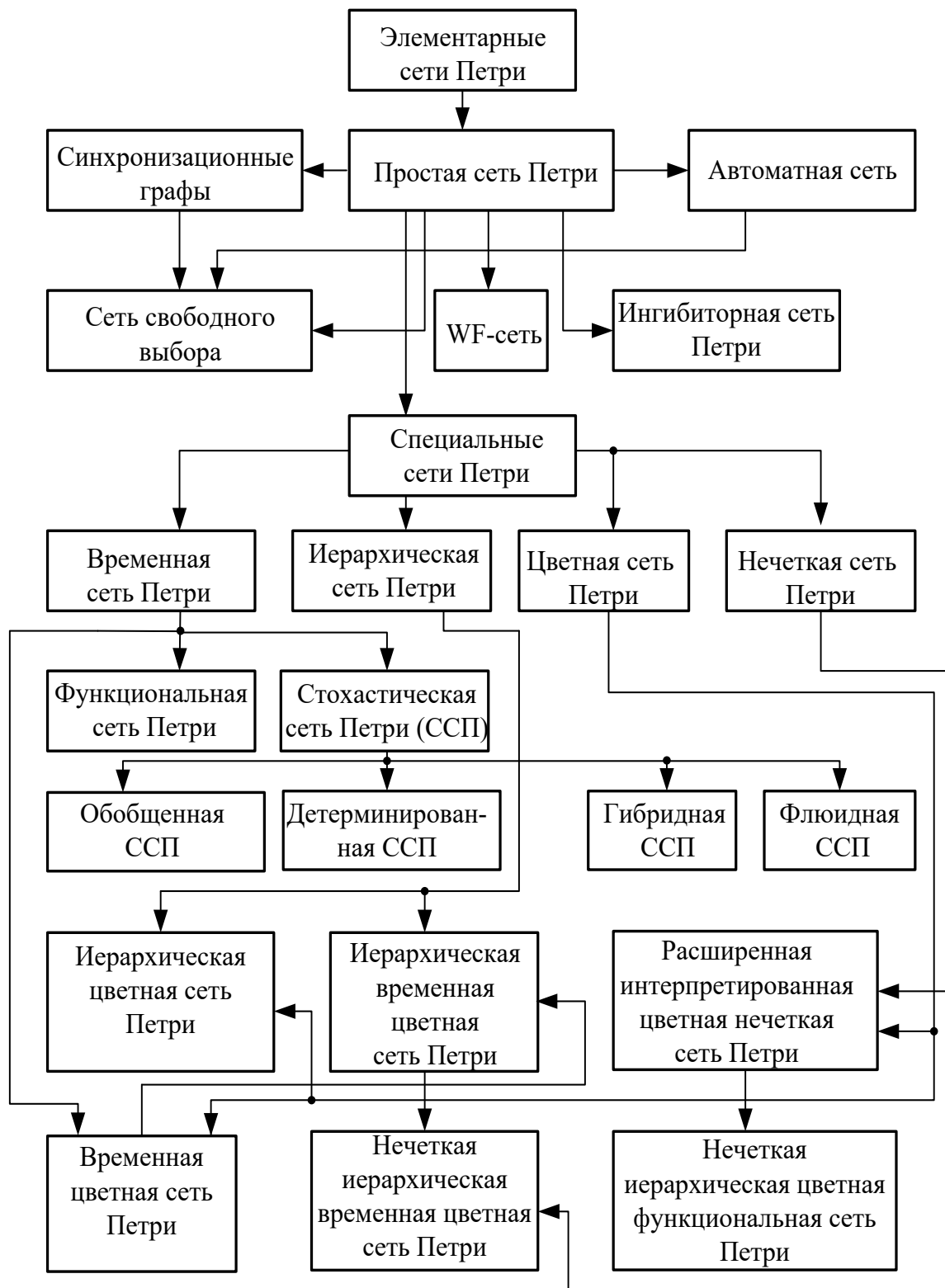


Рис. 1. Классификация сетей Петри

Функциональные СП необходимы для вычислений в сети при выявлении определенных параметров (времени задержки). Это может быть весьма

эффективно с практической точки зрения, поэтому целесообразно внедрять свойства функциональных СП в другие их виды.

Наиболее весомым видом СП являются цветные (раскрашенные) СП, так как они преобразуют дискретное множество фишек (меток) в непрерывное. Более того, каждая фишка в них может быть объектом со сложной структурой. Такие возможности предоставляют бóльшую гибкость для создания имитационных моделей объектов и систем в целом.

Иерархические СП используются при описании сложных объектов, так как модель разбивается на уровни иерархии. Такая возможность позволяет упростить процесс проектирования и анализа.

Потребность в нечетких СП возникли из-за необходимости моделировать объекты, у которых определенные параметры и особенности характера протекающих процессов невозможно строго формализовать. Однако специальные СП позволяют моделировать множество видов объектов и систем в сравнении с классическими (элементарными) СП, они также относятся к универсальным алгоритмическим системам.

Комбинированные СП отличаются наибольшей сложностью. Они формируются путем взаимодействия различных видов специальных СП и обладают свойствами и характеристиками всех «предшественников». Так, иерархическая цветная СП есть комбинация иерархических и цветных СП и обладает всеми преимуществами и тех и других [8].

Временные цветные СП применяются, когда необходимо моделировать изменение состояния во времени объекта, который обладает рядом свойств и характеристик, не являющихся дискретными величинами.

Иерархические цветные СП используются вместо цветных СП тогда, когда моделируемая система или объект состоит из большого количества частей, связанных между собой отношениями подчинения [9].

Иерархические временные цветные СП (ИВЦСП) являются универсальной алгоритмической системой, так как они предоставляют возможность проектировать и моделировать каждый произвольный объект или систему любой сложности.

Анализ различных расширений СП и требования к ним позволили определить, что преимущества иерархических цветных СП достаточны для полноценной формализации технологических процессов ЭДТД и в конечном итоге могут дать возможность для адекватной оценки качества ТД.

3. Формализация документооборота с помощью сетей Петри

В соответствии с требованиями к СП оценку качества технологических процессов ЭДТД целесообразно производить на базе иерархических цветных СП с временными ограничениями. Реальные технологические процессы ЭДТД имеют конечную продолжительность, что может быть изображено графически на временных графиках. Согласно [10], временные цветные СП задаются следующим набором:

$$TCPN = (P, T, A, \Sigma, N, C, G, E, I),$$

где $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ – конечное множество позиций, т. е. условий, при которых будет выполнена технологическая операция ЭДТД; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ – конечное множество переходов; $P \cup T = \emptyset$ и $P \cap T = \emptyset$; $A = \{a_1, a_2, \dots, a_l\}$ – конечное множество направленных дуг; Σ – конечное множество непустых наборов цветов; N – функция узла, определенная из A в $P \times T \cup T \times P$; $C: P \rightarrow \Sigma$ – функция набора цветов, которая назначает цвет для каждого места; $G: T \rightarrow EXPR$ – защитная функция, которая назначает защиту для каждого перехода t следующим образом:

$$[Type(G(t)) = Bool \wedge Type(Var(G(t))) \subseteq \Sigma];$$

$E: A \rightarrow EXPR$ – функция выражения дуги, которая присваивает дуговое выражение каждой дуге a :

$$\forall a \in A: [Type(E(a)) = C(p(a))_{MS} \wedge Type(Var(E(a))) \subseteq \Sigma];$$

$I: P \rightarrow EXPR$ – является функцией инициализации, которая присваивает выражение инициализации каждому месту p :

$$\forall p \in P: [Type(I(p)) = C(p)_{MS} \wedge Type(Var(I(p))) \subseteq \emptyset],$$

Var обозначает набор переменных в выражении $expr$.

В статье [11] выделены технологические цепочки, соответствующие стадийности выполнения работ от их начала до завершения строительства и ввода СЖАТ в эксплуатацию. Под технологической цепочкой понимается функционально завершенная последовательность операций над комплектом ТД. На основании этих данных построена условная модель технологической цепочки ЭДТД на базе цветных СП с временными ограничениями (рис. 2). В данной модели приняты в соответствии с результатами [12] и с синтаксисом языка CPN ML атрибуты позиции в виде выражения

$I^2++I^3++I^4$, которое задает начальную маркировку позиций (фишек), состоящую из трех меток: одна метка со значением 2, одна метка со значением 3 и одна метка со значением 4.

С учетом особенностей технологических процессов ЭДТД фишки имеют временной характер. Для задания временных свойств фишек использовано следующее обозначение:

$$\text{closet } tED = \text{int } \text{timed},$$

где *closet* – системное слово языка CPN ML для определения типа данных; *timed* – системное слово языка CPN ML, означающее, что фишки данного типа имеют временные метки; *tED* – обозначение нового типа данных; *int* – название типа данных (*integer*). Атрибутом дуг ЦВСП служит переменная *k*, необходимая для переноса соответствующих фишек между позициями и переходами. Переменная *k* объявлена следующим образом: *var: k: tED* (см. рис. 2). Возможности среды моделирования CPN Tools позволяют задавать временные задержки срабатывания переходов и перемещения фишек через дуги путем задания случайной величины, распределенной по некоторому закону [13]. Так для дуги обратной связи на рис. 2 от перехода *T2* к позиции *P1* используется функция экспоненциального закона распределения случайных величин, параметры которого выбраны случайным образом:

$$I^2++I^3++I^4@+\text{ceil}(\text{exponential}(0,7)).$$

Значения множества переходов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значение множества переходов

Обозначение перехода	Описание перехода
<i>T1</i>	Выдача технического задания и технических условий по запросам
<i>T2</i>	Проектирование утверждаемой части проектно-сметной документации (ПСД)
<i>T3</i>	Согласование и утверждение утверждаемой части ПСД
<i>T4</i>	Проектирование ПСД
<i>T5</i>	Отправка и экспертиза ПСД
<i>T6</i>	Изготовление, строительство и проведение пусконаладочных работ
<i>T7</i>	Введение и архивирование ТД

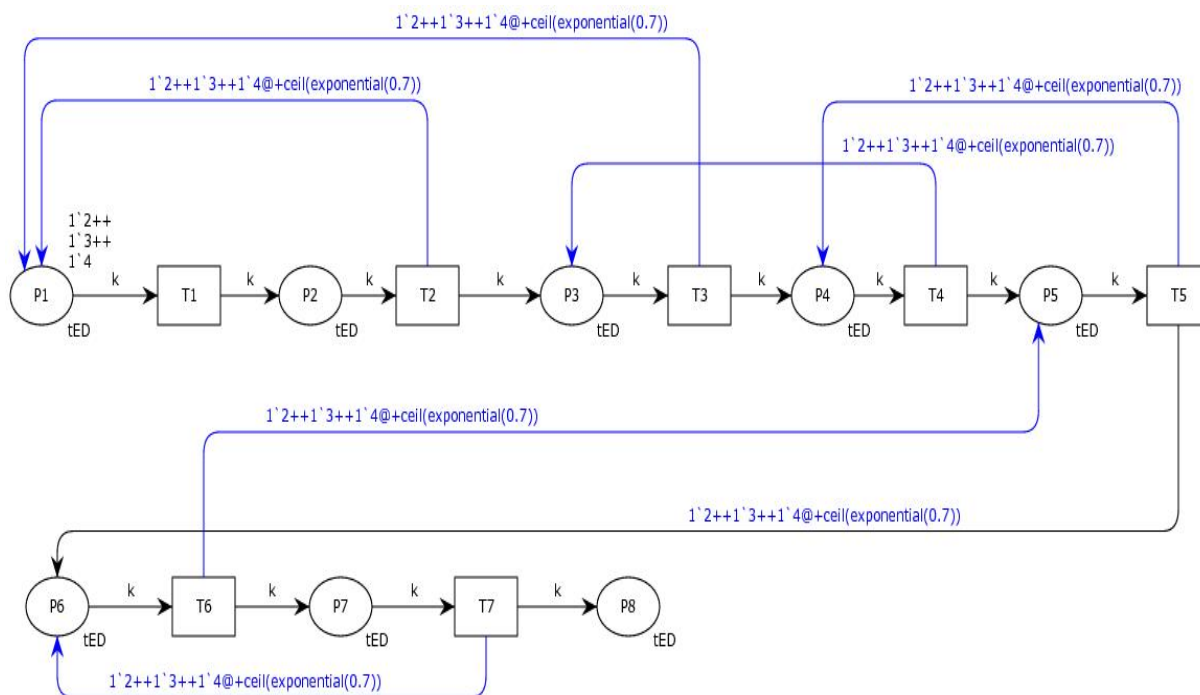


Рис. 2. ЦВСП технологической цепочки алгоритмов ЭДТД

Описание множества позиций, т. е. условий, при которых выполняются технологические операции ЭДТД, приведено в табл. 2.

Таблица 2
Значение множества позиций

Обозначение позиции	Описание позиции
<i>P1</i>	Наличие технического задания и технических условий
<i>P2</i>	Проверка выданных технического задания и технических условий по запросам и начало выполнения проектирования ПСД
<i>P3</i>	Наличие утверждаемой части ПСД
<i>P4</i>	Наличие ТД, согласованной и утвержденной утверждаемой части ПСД и проектирование ПСД
<i>P5</i>	Наличие проекта и отправка на экспертизу ПСД
<i>P6</i>	Заключение экспертизы ПСД и начало строительства
<i>P7</i>	Завершение проведения пусконаладочных работ с учетом регламентных процедур
<i>P8</i>	Наличие ТД для ведения и архивирования на дистанции автоматики и телемеханики

Таким образом, в соответствии с [14] CPN Tools поддерживает функциональный язык программирования ML, который необходим для описания переменных, условий и функций, с помощью которых формулируются

логические условия, временные характеристики и другие свойства технологических процессов ЭДТД. Наличие временных фишек (меток) позволяет моделировать технологические процессы ЭДТД с учетом времени их выполнения для оценки качества ТД [15].

4. Иерархическая имитационная модель сетей Петри для документооборота

Согласно концептуальной модели, предложенной в [16], и иерархической структуре технологических операций ЭДТД, при проектировании ТД разработаны иерархические ЦВСП на базе среды моделирования CPN Tools (рис. 3).

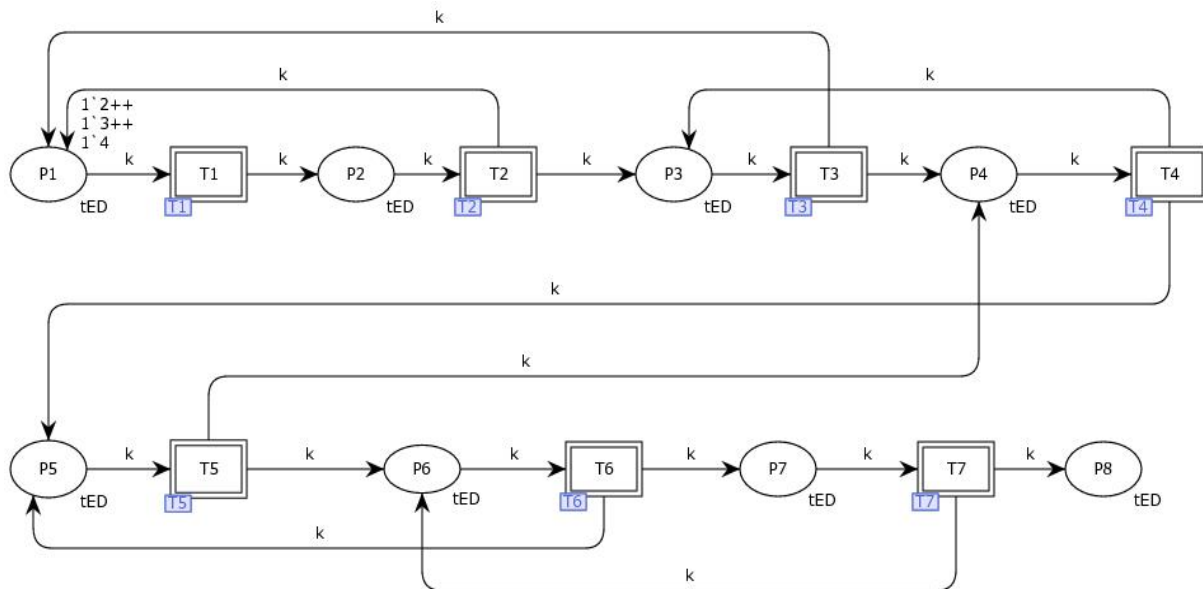


Рис. 3. Иерархические ЦВСП технологической цепочки алгоритмов ЭДТД

На рис. 4 представлена модель подстановочного перехода $T5$ (см. рис. 3). Позиция In является входной, ей соответствует позиция $P9$ модели верхнего уровня, позиции Out – выходные, им отвечают позиции $P4$ и $P6$.

Возможности ИЦВСП позволяют производить разработку сложных ИМ технологических процессов ЭДТД путем замещения их одним переходом, характерным для определенной степени детализации алгоритмических уровней, так как алгоритмические уровни представляют собой конкретную степень детализации элементарных технологических процессов. Таким образом реализуются вложенные СП в соответствии со сформулированными

требованиями. Из рис. 4 следует, что все переходы имеют вложенную структуру. В качестве примера рассмотрим процесс оценки времени выполнения технологических операций ЭДТД на Тихвинской дистанции сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) ШЧ-8. Результаты обследования приведены в статье [17]. Так как разработанная ИМ является универсальной, настроим ее в соответствии с полученными в ходе обследования результатами. Для определения условий срабатывания соответствующих переходов, отвечающих за конкретные технологические операции ($T1, T2, T3, T4, T5$), воспользуемся функцией равномерного закона распределения (*uniform*) случайных величин. Пример записи условий срабатывания перехода $T2$ выглядит следующим образом:

$$t_1 @ + \text{ceil}(\text{uniform}(4.0, 16.0)).$$

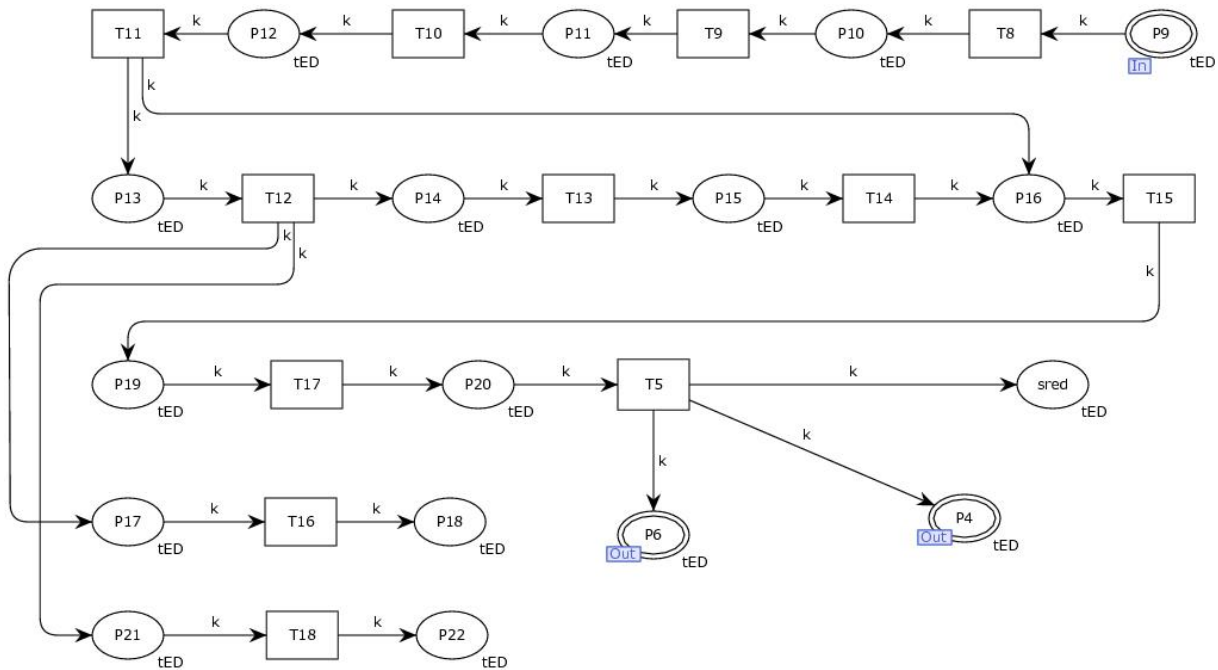


Рис. 4. Вложенная модель перехода T5 ИЦВСП технологической цепочки алгоритмов ЭДТД

Результаты исследования на ИМ ЭДТД приведены в табл. 3. Функции программного комплекса CPN Tools позволяют осуществлять моделирование как в пошаговом режиме, так и в автоматическом. Одна единица модельного времени приравнивается к одной неделе реального времени.

Таблица 3
Результаты исследования на ИМ ЭДТД

Наименование технологических процессов	Продолжительность работы (в неделях)
Формирование технического задания и технических условий	2
Проектирование утверждаемой части ПСД	2
Согласование и утверждение утверждаемой части ПСД	2
Проектирование ПСД	15
Отправка и экспертиза ПСД	3
Изготовление, строительство и проведение пусконаладочных работ	14
Ведение и архивирование ТД	2
Итого	40

Заключение

Сети Петри позволяют решать задачи определения причинно-следственных связей и структурирования процессов ЭДТД. Оценка количественных характеристик технологических цепочек ЭДТД при этом, как правило, довольно сложная, так как воздействующих на ЭДТД факторов очень много. В связи с этим модели, разработанные на базе аппарата СП, целесообразно использовать для решения специфических задач при моделировании ЭДТД. Методологию СП можно применять для решения широкого круга задач по выявлению взаимосвязей структуры технологических цепочек ЭДТД, оценке качества ТД путем получения временных параметров срабатывания переходов и движения фишек, верификации и валидации имитационных моделей ЭДТД.

Для синтеза ИМ разработаны требования к СП с учетом особенностей технологических процессов ЭДТД. Проведен анализ существующих расширений СП для решения проблемы создания ИМ, позволяющих оценивать качество ТД, в результате построена классификация СП. При анализе особенностей различных расширений СП установлено, что иерархические ЦВСП наиболее полно соответствуют разработанным требованиям. С помощью аппарата иерархических ЦВСП и их особенностей формализованы технологические процессы ЭДТД. На базе инструментального средства *CPN Tools* и встроенного функционального языка программирования разработана упрощенная ИМ, позволяющая оценивать время выполнения технологических операций при проектировании ТД для систем СЖАТ. Для рассмотренного примера оценка временных параметров процесса ЭДТД занимает 40

недель (см. табл. 3). Путем анализа временных параметров срабатывания переходов и особенностей логики СП выявляются наиболее затратные с точки зрения времени выполнения технологические цепочки электронного документооборота, что позволяет принять меры для снижения временных затрат.

Следующими этапами выполнения работ по исследованию ИМ ЭДТД на базе иерархических ЦВСП являются: 1) определение временных параметров выполнения технологических процессов ЭДТД в реальных условиях путем натурных исследований или при помощи анализа соответствующих статистических данных; 2) планирование и проведение серий имитационных экспериментов для оценки выбранных показателей качества ЭДТД.

Библиографический список

1. Василенко М. Н. Организация электронного документооборота при проектировании систем автоматики и телемеханики / М. Н. Василенко, Б. П. Денисов, П. Е. Булавский, В. Г. Трохов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – 2007. – Вып. 3. – С. 16–29.
2. Булавский П. Е. Метод оценки времени выполнения процессов и адекватности имитационной модели электронного документооборота технической документации / П. Е. Булавский, Д. С. Марков // Автоматика на транспорте. – 2014. – Т. 2. – № 1. – С. 45–56.
3. Скородумов П. В. Анализ перспективных расширений сетей Петри / П. В. Скородумов // Наука и мир. – 2014. – Т. 1. – № 10. – С. 66–68.
4. Булавский П. Е. Метод оценки времени выполнения процессов электронного документооборота технической документации / П. Е. Булавский, Д. С. Марков // Развитие элементной базы и совершенствование методов построения устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : сб. науч. трудов ; под ред. Вл. В. Сапожникова. – СПб. : ПГУПС, 2014. – С. 64–69.
5. Симанков В. С. Моделирование сложных объектов в режиме реального времени на основе сетей Петри / В. С. Симанков, Д. М. Толкачев // Вестник Адыгейск. гос. ун-та. – 2012. – Вып. 4. – С. 202–209.
6. Устимов К. О. Автоматизация построения иерархической имитационной модели бизнес-процессов в виде раскрашенных сетей Петри на основе модели IDEF0 / К. О. Устимов // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2014. – С. 90–94.
7. Устимов К. О. Алгоритм преобразования IDEF0-модели в раскрашенную сеть Петри / К. О. Устимов, Н. В. Федоров // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2014. – С. 321–327.
8. Kulagin V. P. Tensor methods of designing computer system structures / V. P. Kulagin // Automatic Control and Computer Sciences. Ed by – New York, 1989. – P. 55–61.
9. Frumin D. Branching processes of conservative nested Petri nets / D. Frumin, I. A. Lomazova // VPT 2014. Second International Workshop on Verification and Program Transformation Vol. 28: EPiC Series. EasyChair, 2014. – P. 19–35.
10. Jensen K., Kristensen L. M. Formal Definition of Timed Coloured Petri Nets. In Coloured Petri Nets; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2009. – Pp. 257–271.

11. Wang S., Zhou M. C., Li Z., Wang C. A New Modified Reachability Tree Approach and Its Applications to Unbounded Petri Nets. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, July 2013, Vol. 43, no. 4. – Pp. 932–940.
12. The tool for modeling of wireless sensor networks with nested Petri nets. In *Proceedings of 7th the Spring / Nina Buchina and Leonid Dworzanski // Summer Young Researchers' Colloquium on Software Engineering, SYRCoSE '13*. Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences, 2013. – Pp. 15–18.
13. Cabral F. G., Moreira M. V., Diene O. A petri net diagnoser for discrete event systems modeled by finite state automata. *Transaction on Automatic Control*, 2015, Vol. 61, no. 1. – Pp. 59–71.
14. Q. Shen, J. Qiu, G. Liu, and K. Lv. Intermittent fault's parameter framework and stochastic petri net based formalization model. *Eksploatacja i Niezawodnosc-Maintenance and Reliability*, 2016, Vol. 18, no. 2. – Pp. 210–217.
15. Ермакова В. О. Трансляция вложенных сетей Петри для верификации разверток / В. О. Ермакова, И. А. Ломазова // Труды ИСП РАН. – 2016. – Т. 28. – № 4. – С. 115–136.
16. Булавский П. Е. Концептуальная модель электронного документооборота технической документации / Булавский П. Е. // Транспорт Российской Федерации. – 2011. – № 1. – С. 60–63.
17. Добряков И. А. Анализ документооборота дистанции СЦБ на основе международных стандартов / И. А. Добряков, П. Е. Булавский, Д. С. Марков // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2015 – № 2. – С. 39–47.

*Peter E. Bulavsky,
Oleg K. Vaisov*

«Automation and remote control on railways» department
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg

MODELING OF ELECTRONIC TECHNICAL DOCUMENTATION MANAGEMENT PROCESSES WITH THE HELP OF PETRI NETS

Consideration is given to determining the scope of application of the Petri nets apparatus for the formalization of technological processes, taking into account the features of electronic document circulation of technical documentation (EDTD), the development of a simulation model (IM) for assessing the quality of technical documentation on devices of railway automation and telemechanics systems analysis of the time parameters of the implementation of technological processes. The methods used in the theory of Petri nets (SP) are used, which is based on the discrete-event paradigm of IM. Requirements for modeling tools and classification of various JV extensions were developed, technological chains of EDTD processes based on color temporary Petri nets and simplified MI using hierarchical temporal color Petri nets to assess the quality of technical documentation of technological EDTD processes were formalized. The presented simplified models of the technological processes of EDTD and the possibilities of the proposed MI based on the apparatus of Petri nets make it possible to assess the quality of the EDTD by analyzing the state and fixing the execution time of operations. MI makes it possible to identify problem areas of technological processes when analyzing the state of Petri nets, ultimately to develop recommendations for reducing the time spent on

design, commissioning and maintenance of a set of technical documentation, generally contributing to improving its quality.

electronic document flow of technical documentation, colored Petri nets, quality of technical documentation, marking, positions, transitions, arcs, events, conditions, hierarchy, nesting.

Reference

1. Vasilenko M. N., Denisov B. P., Bulavskiy P. Ye., Trokhov V. G. (2007) Organization of electronic document management in the design of automation and remote control systems [Organizatsiya elektronnoogo dokumentooborota pri proyektirovanii sistem avtomatiki i telemekhaniki], Proceedings St. Petersburg state transport university [Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya]. – St. Petersburg, vol.1. – Pp. 16–29.
2. Bulavsky P. E., Markov D. S. (2014) A method for estimating the execution time of processes and the adequacy of the simulation model of electronic document management of technical documentation [Metod otsenki vremeni vypolneniya protsessov i adekvatnosti imitatsionnoy modeli elektronnoogo dokumentooborota tekhnicheskoy dokumentatsii], Automation of Transport [Avtomatiki na transporte], vol. 2. – Pp. 45–56.
3. Skorodumov P. V. (2014) Analysis of perspective extensions of Petri nets [Analiz perspektivnykh rasshireniy setey Petri], Science and Peace [Nauka i mir]. Vol 1, issue 10. – Pp. 66–68.
4. Bulavsky P. E., Markov D. S. (2014) Method for estimating the time taken to complete electronic document management processes of technical documentation [Metod otsenki vremeni na vypolneniya protsessov elektronnoogo dokumentooborota tekhnicheskoy dokumentatsii], Development of the element base and improvement of methods for constructing railway automation and telemechanics devices, Edition VI. V. Sapozhnikov. St. Petersburg, Proceedings St. Petersburg state transport university [PGUPS]. – Pp. 64–69.
5. Simankov V. S., Tolkachev D. M. (2012) Simulation of complex objects in real time based on Petri nets [Modelirovaniye slozhnykh obyektov v rezhime realnogo vremeni na osnove setey Petri], Adyghe State University [Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta], Vol. 4. – Pp. 202–209.
6. Ustimov K. O. (2014) Automation of constructing a hierarchical simulation model of business processes in the form of colored Petri nets based on the IDEF0 model [Avtomatizatsiya postroyeniya iyerarkhicheskoy imitatsionnoy modeli biznes-protsessov v vide raskrashennykh setey Petri na osnove modeli IDEF0], Mining information analytical bulletin (scientific and technical journal) [Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten']. – 2014. – Pp. 90–94.
7. Ustimov K. O., Fedorov N. V. (2014) The algorithm for converting the IDEF0 model into a colored Petri net [Algoritm preobrazovaniya IDEF0 modeli v raskrashennuyu set' Petri], Mining information analytical bulletin (scientific and technical journal) [Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten']. – 2014. – Pp. 321–327.
8. Kulagin V. P. Tensor Methods of Designing Computer System Structures, Automatic Control and Computer Sciences. – New York, 1989. – Pp. 55–61.
9. Frumin D., Lomazova I. A. (2014) Branching processes of conservative nested Petri nets. VPT 2014. Second International Workshop on Verification and Program Transformation Vol. 28: EPiC Series. EasyChair, 2014. – Pp. 19–35.
10. Jensen K., Kristensen L. M. (2009) Formal Definition of Timed Coloured Petri Nets. In Coloured Petri Nets; Springer: Berlin, Heidelberg, Germany, 2009. – Pp. 257–271.

11. Wang S., Zhou M. C., Li Z., Wang C. (2013) "A New Modified Reachability Tree Approach and Its Applications to Unbounded Petri Nets," *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 43, issue 4. – Pp. 932–940, July 2013.
12. Nina Buchina and Leonid Dworzanski (2013) The tool for modeling of wireless sensor networks with nested Petri nets. In *Proceedings of 7th the Spring, Summer Young Researchers' Colloquium on Software Engineering, SYRCoSE '13*,. Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences, 2013. – Pp. 15–18.
13. Cabral F. G., Moreira M. V., Diene O. (2015) "A petri net diagnoser for discrete event systems modeled by finite state automata," *Transaction on Automatic Control*, 2015, vol. 61, issue 1. – Pp. 59–71
14. Shen Q., Qiu J., Liu G., Lv K. (2016) "Intermittent fault's parameter framework and stochastic petri net based formalization model," *Eksploatacja i Niezawodnosc-Maintenance and Reliability*, 2016, vol. 18, issue 2. – Pp. 210–217.
15. Yermakova V. O., Lomazova I. A. (2016) *Translyatsiya vlozhennykh setey Petri dlya verifikatsii razvertok* [Translation of nested Petri nets for verification of sweeps] *Proceedings of ISP RAS*. 2016, vol. 28, issue 4. – Pp. 115–136.
16. Bulavskiy P. Y. (2011) A conceptual model of electronic document management technical documentation [Kontseptual'naya model' elektronnoy dokumentooborota tekhnicheskoy dokumentatsii], *Transport of the Russian Federation [Transport Rossijskoj Federatsii]*, vol. 1. – Pp. 60–63.
17. Dobryakov I. A., Bulavsky P. E., Markov D. S. (2015) Analysis of document flow of distance signaling on the basis of international standards [Analiz dokumentooborota distantsii STSB na osnove mezhdunarodnykh standartov], *Proceedings St. Petersburg state transport university [Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya]*. – St. Petersburg, Issue 2. – Pp. 39–47.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии М. Н. Василенко.
Поступила в редакцию 27.03.2019, принята к публикации 17.05.2019.*

БУЛАВСКИЙ Петр Евгеньевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.
pbulavsky@gmail.com

ВАЙСОВ Олег Кахрамонович – аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.
olegvaisov@gmail.com

© Булавский П. Е., Вайсов О. К., 2019

Техническая диагностика и контролепригодные системы

УДК 681.518.5:004.052.32

Д. В. Ефанов, д-р техн. наук
В. В. Хорошев

ООО «ЛокоТех-Сигнал»,
Кафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»
Российский университет транспорта, Москва

БИНАРНО – ТЕРНАРНЫЕ ВОПРОСНИКИ

Теория вопросников позволяет решать разнообразные задачи дискретного поиска и идентификации, эффективным ее приложением является техническая диагностика систем автоматики и управления. Вопросник представляет собой совокупность событий и вопросов, которые необходимо поставить для решения задачи идентификации данных событий. Соответственно в технической диагностике – это множество состояний технического объекта и множество проверок, позволяющих эти состояния идентифицировать. Особую роль теория вопросников может сыграть в развитии тестового обеспечения при повышении уровня автоматизации и управления с внедрением развитых средств технического диагностирования и мониторинга.

Авторы статьи фокусируют свое внимание на исследованиях особых типов вопросников – таких, которые содержат как вопросы с двумя исходами (бинарные вопросы), так и вопросы с тремя исходами (тернарные вопросы). Рассмотрение именно данного сочетания вопросов важно потому, что при построении вопросника для фиксированного множества событий в таком случае потребуется меньшее количество вопросов, чем в бинарном вопроснике. При этом тернарные вопросы гораздо чаще встречаются на практике, чем вопросы с большим числом исходов. Использование бинарно-тернарных вопросников при решении задач идентификации может оказать влияние на среднее значение цены обхода и оказаться эффективнее применения чисто бинарных вопросников. Это актуально, например, при ограничениях на среднее время идентификации событий.

В работе описаны основные особенности бинарно-тернарных вопросников, представлено описание метода динамического программирования для оптимизации данного класса вопросников, приводятся примеры реализации вопросников в системах автоматики и управления на железнодорожном транспорте.

задачи распознавания и идентификации, дискретный поиск, вопросник, анкета, оптимизация вопросников, техническая диагностика дискретных систем.

DOI: 10.20295/2412-9186-2019-5-3-391-422

Введение

Проблемы распознавания и дискретного поиска встречаются в практике довольно часто [1, 2]. К ним относятся совершенно различные по своей природе и физической реализации приложения. Одним из таких приложений является техническая диагностика устройств автоматики и вычислительной техники, в задачи которой входит определение технического состояния объекта и локализация дефекта [3]. Удобным математическим аппаратом, позволяющим находить решение указанной задачи, является теория вопросников [4].

Возникновение теории вопросников связывают с именем К. Ф. Пикара, который в середине XX века предложил эту теорию как математический аппарат идентификации различного рода событий. Одной из первых работ на эту тему является его книга [5]. Впоследствии он продолжил развитие данной теории наряду со своими соотечественниками [6–8]. В техническую диагностику данный математический аппарат был введен в конце 1960-х гг. известным специалистом П. П. Пархоменко [9, 10]. В настоящее время аппарат теории вопросников позволяет решать задачу выбора наиболее эффективного способа идентификации (распознавания, разделения и т. д.) событий по заранее выбранному критерию.

В самом общем смысле вопросник представляет собой совокупность множества идентифицируемых событий $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ и множества необходимых для его разделения вопросов $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$. Если вопросы таковы, что позволяют разделить исходное множество событий на одноэлементные подмножества, то говорят, что решается задача полной идентификации. В противном случае решается задача неполной идентификации. При решении задачи идентификации учитывают такие параметры, как «важность» идентифицируемого события и «стоимость» постановки каждого вопроса. Показателем «важности» в технической диагностике может являться вероятность возникновения того или иного события, дефекта, а показателем «стоимости» проверки – время проведения этой проверки, ее эффективность или понесенные затраты. Таким образом, задача идентификации событий может быть решена различными способами за различную цену, что определяется последовательностью постановки вопросов. Центральной задачей теории вопросников является задача оптимизации вопросника по критерию минимума средней цены идентификации события [11]. Вопросник с наименьшей стоимостью является оптимальным вопросником, а вопросник, близкий к оптимальному, – квазиоптимальным.

Существуют универсальные методы оптимизации, такие как метод ветвей и границ [12] и метод динамического программирования [13], позволяющие получить оптимальный вопросник любого вида. Эти методы, однако, имеют экспоненциальную сложность от числа идентифицируемых событий и вследствие этого – ограниченную применимость. Как правило, число идентифицируемых событий ограничивается 30–35, что вызвано сложностью решения задач, основанных на переборе вариантов, даже с применением современной вычислительной техники. По этой причине во многих практических задачах ограничиваются получением не оптимального вопросника, а квазиоптимального.

Особый класс вопросников представляют бинарные вопросники – такие вопросники включают в себя только вопросы с двумя исходами, имеющими аналогию с ответами «да» и «нет» («идентифицирован» или «не идентифицирован») [14]. Такие вопросники естественно возникают в технике при решении задач технической диагностики, когда, например, следует установить отказавший компонент устройства или системы [15, 16]. Теория бинарных вопросников развита в работах А. Ю. Аржененко [17–24]. Им предложены более простые методы оптимизации бинарных вопросников, чем традиционные, а также описаны вопросники, допускающие ошибки и неопределенные ответы.

Некоторые задачи идентификации могут включать в себя и вопросы с большим числом исходов [25]. К примеру, при технической диагностике некоторые процедуры при одной проверке могут дать выявление сразу нескольких событий [26]. Вопросники, включающие в себя вопросы с различным числом исходов, называются гетерогенными [27]. Если все вопросы имеют одинаковое число исходов, то такие вопросники называют гомогенными. Бинарные вопросники относятся к гомогенным вопросникам. Следующим за бинарным вопросом по числу исходов является тернарный вопрос, допускающий три варианта ответа (три исхода) [28]. Увеличение числа исходов позволяет уменьшить число вопросов для одного и того же множества идентифицируемых событий, но увеличение числа исходов вопросов в реальности ограничивается здравым смыслом, а также полнотой и глубиной диагностирования. Тем не менее ряд задач, таких, например, как поиск оптимального (или квазиоптимального) вопросника с ограничением на значение средней цены идентификации события, может быть решен с применением как бинарных вопросов, так и вопросов с большим числом исходов.

Данная статья посвящена анализу гетерогенных вопросников, включающих в себя только бинарные и тернарные вопросы – *бинарно-тернарных вопросников*.

1. Особенности бинарно-тернарных вопросников

Вопросники могут быть заданы несколькими количеством способов. Наименее наглядным способом является перечисление всех допустимых вопросов с указанием способов разбиения исходного множества идентифицируемых событий $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ на подмножества $X_{y_i}^k$, где $y_i \in Y$, $k \in \{1; 2; \dots; n\}$. К примеру, вопросник может быть задан списком:

$$\begin{aligned} y_1 &= \{x_1, x_2, x_3\} \cup \{x_4, x_5, x_6\} \cup \{x_7, x_8, x_9\}; \\ y_2 &= \{x_1, x_4, x_7\} \cup \{x_2, x_5, x_8\} \cup \{x_3, x_6, x_9\}; \\ y_3 &= \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_9\} \cup \{x_5, x_6, x_7, x_8\}; \\ y_4 &= \{x_1, x_3, x_6, x_7\} \cup \{x_2, x_4, x_5, x_8, x_9\}; \\ y_5 &= \{x_2, x_3, x_5, x_7, x_8\} \cup \{x_1, x_4, x_6, x_9\}; \\ y_6 &= \{x_1, x_2, x_5, x_6, x_9\} \cup \{x_3, x_4, x_7, x_8\}. \end{aligned}$$

Естественной формой задания, вытекающей из предыдущей, является задание вопросника в виде матрицы (табл. 1), содержащей по вертикали все идентифицируемые события, а по горизонтали – все допустимые для решения задачи разделения вопросы. На пересечении строки и столбца такой матрицы указывается условный номер исхода каждого вопроса при постановке его на множестве событий $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$. Кроме того, в матрице для каждого события указывается значение весового коэффициента $\omega(x_j)$, $x_j \in X$, а для каждого вопроса указывается значение цены $c(y_i)$ и весового коэффициента $\omega(y_i)$, $y_i \in Y$. Весовой коэффициент каждого вопроса складывается из суммы весовых коэффициентов событий, входящих в подмножества его исходов. При этом весовой коэффициент вопроса зависит от последовательности его постановки. Часто весовые коэффициенты нормируют и задают в виде условных вероятностей идентифицируемых событий:

$$p(x_j) = \frac{\omega(x_j)}{\sum_{j=1}^m \omega(x_j)}. \quad (1)$$

$$\text{При этом } \sum_{j=1}^m p(x_j) = 1.$$

Таблица 1
Анкета рассматриваемого вопросника

y_i	$c(y_i)$	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
y_1	$c(y_1)$	2	2	2	1	1	1	0	0	0
y_2	$c(y_2)$	2	1	0	2	1	0	2	1	0
y_3	$c(y_3)$	1	1	1	1	0	0	0	0	1
y_4	$c(y_4)$	1	0	1	0	0	1	1	0	0
y_5	$c(y_5)$	0	1	1	0	1	0	1	1	0
y_6	$c(y_6)$	1	1	0	0	1	1	0	0	1
$p(x_j)$		$p(x_1)$	$p(x_2)$	$p(x_3)$	$p(x_4)$	$p(x_5)$	$p(x_6)$	$p(x_7)$	$p(x_8)$	$p(x_9)$

Способ задания вопросника в виде матрицы называют также заданием в виде анкеты [14].

Наиболее наглядной формой задания вопросника является задание его в виде древовидного ориентированного графа [4, 10, 11]. Вершины в вопроснике могут иметь только исходящие дуги, только входящую дугу (в древовидном графе она всегда одна) или и те и другие. Первые и третьи виды вершин соответствуют корневому вопросу и промежуточным вопросам, вторые – идентифицируемым событиям. Каждая исходящая из вершины-вопроса дуга соответствует его исходу. Возле вершин, не имеющих исходящих дуг, приписывают в виде чисел значения весовых коэффициентов. Возле вершин, имеющих исходящие дуги, также приписывают в виде чисел значения весовых коэффициентов, а в виде чисел в скобках – значения цен вопросов. На рис. 1 представлены различные вопросники, позволяющие решить задачу полной идентификации для рассматриваемого примера.

Число исходов каждого вопроса называют его основанием и обозначают как $\alpha(y_i)$ (на рисунках номера исходов следуют справа налево в порядке возрастания для каждого вопроса). Если основания всех вопросов одинаковые, то вопросник является гомогенным (однородным). При этом бинарные вопросники – это те, для которых $\forall y_i \in Y \alpha(y_i) = 2$ (их также называют дихотомичными вопросниками). Вопросники, для которых $\forall y_i \in Y \alpha(y_i) > 2$, называются полихотомичными. Если вопросы имеют различающиеся основания, вопросники называются гетерогенными.

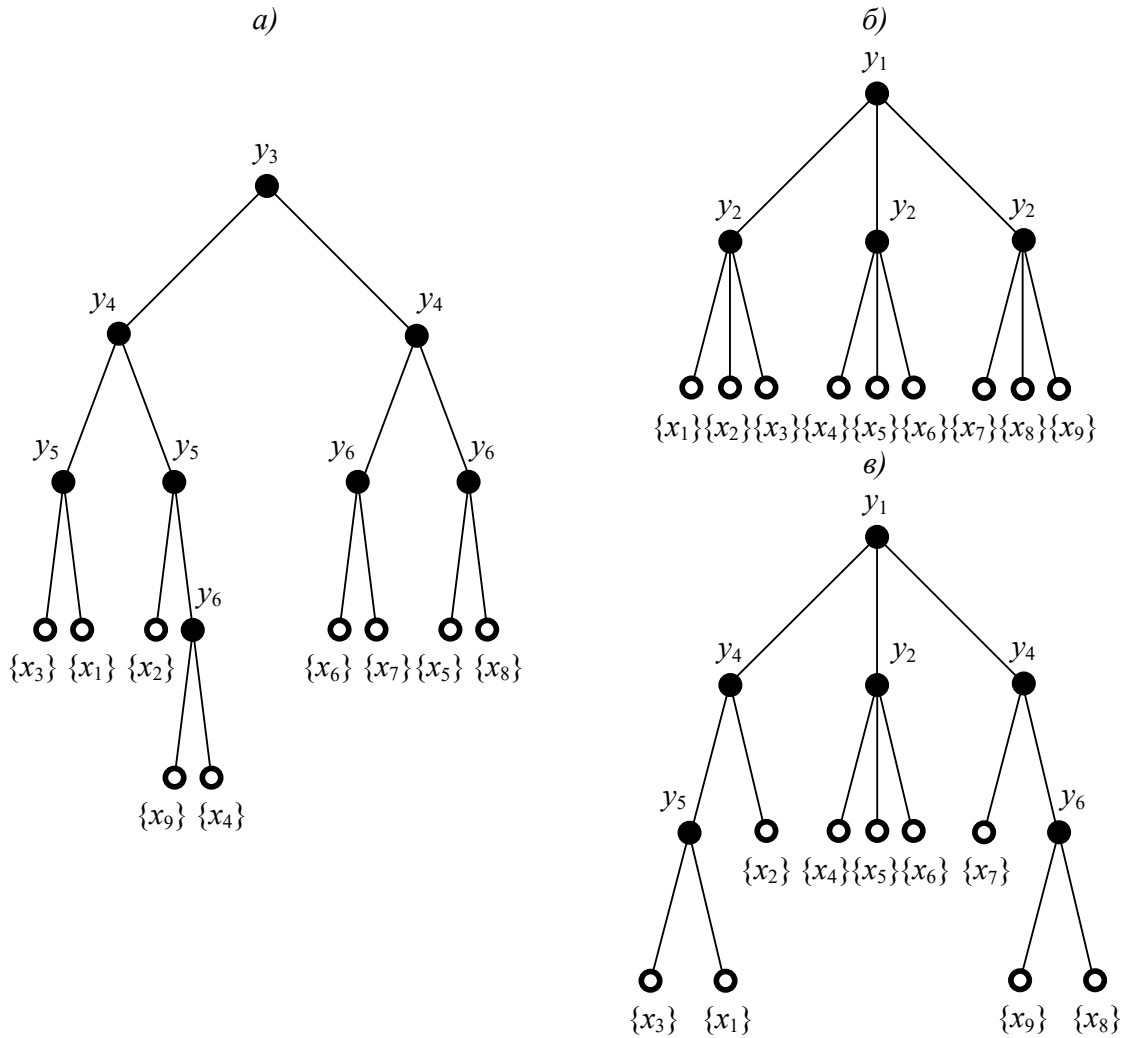


Рис. 1. Задание вопросника графом: *a* – вопросник, состоящий из бинарных вопросов; *б* – вопросник, состоящий из тернарных вопросов; *в* – вопросник, состоящий из бинарных и тернарных вопросов

Для каждого конкретного вопросника может быть определена средняя стоимость идентификации множества событий $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$, называемая ценой обхода вопросника:

$$C = \sum_{i=1}^n p(y_i) c(y_i). \quad (2)$$

Различные вопросники могут иметь различное значение цены обхода.

К примеру, зададимся значениями вероятностей идентификации событий и цен вопросов для рассмотренной выше анкеты (табл. 1): $c(y_1) = 3$; $c(y_2) = 4$; $c(y_3) = 3$; $c(y_4) = 1$; $c(y_5) = 2$; $c(y_6) = 1$; $p(x_1) = 0,1$; $p(x_2) = 0,1$; $p(x_3) = 0,05$; $p(x_4) = 0,2$; $p(x_5) = 0,1$; $p(x_6) = 0,05$; $p(x_7) = 0,1$; $p(x_8) = 0,15$; $p(x_9) = 0,15$.

Для вопросника на рис. 1,а:

$$\begin{aligned} C_1 &= 3 \cdot 1,00 + 4 \cdot (0,1 + 0,1 + 0,05 + 0,2 + 0,15) + 2 \cdot (0,1 + 0,05) + \\ &+ 2 \cdot (0,1 + 0,2 + 0,15) + 1 \cdot (0,2 + 0,15) + 1 \cdot (0,1 + 0,05 + 0,1 + 0,15) + \\ &+ 1 \cdot (0,05 + 0,1) + 1 \cdot (0,1 + 0,15) = \\ &= 3 + 0,6 + 0,3 + 0,9 + 0,35 + 0,5 + 0,15 + 0,25 = 6,05. \end{aligned}$$

Для вопросника на рис. 1,б:

$$\begin{aligned} C_2 &= 3 \cdot 1,00 + 4 \cdot (0,1 + 0,1 + 0,05) + 4 \cdot (0,2 + 0,1 + 0,05) + 4 \cdot (0,1 + 0,15 + 0,15) = \\ &= 3 + 1 + 1,4 + 1,6 = 7. \end{aligned}$$

Для вопросника на рис. 1,в:

$$\begin{aligned} C_3 &= 3 \cdot 1,00 + 1 \cdot (0,1 + 0,1 + 0,05) + 2 \cdot (0,1 + 0,05) + \\ &+ 4 \cdot (0,2 + 0,1 + 0,05) + 1 \cdot (0,1 + 0,15 + 0,15) + 1 \cdot (0,15 + 0,15) = \\ &= 3 + 0,25 + 0,3 + 1,4 + 0,4 + 0,3 = 5,65. \end{aligned}$$

Сравнивая значения цен обхода каждого вопросника, отмечаем, что $C_3 < C_1 < C_2$. Таким образом, алгоритм диагностирования, реализованный по третьему вопроснику, позволяет идентифицировать события в среднем быстрее, чем алгоритм, реализованный по всем остальным вопросникам. При этом отметим, что в третьем алгоритме использованы и бинарные, и тернарные вопросы. В зависимости от соотношения цен вопросов и весовых коэффициентов идентифицируемых событий может быть выгоден тот или иной вариант.

Основной задачей теории вопросников является поиск оптимального по критерию минимума значения C вопросника, для которого $C = C_{\min}$. Например, вопросник, приведенный на рис. 1, в имеет наименьшую цену из всех трех вопросников, однако может существовать вопросник с меньшей ценой обхода. Методы оптимизации вопросников определяются исходя из вида вопросника и особенностей соотношения между ценами вопросов и весовых коэффициентов идентифицируемых событий [29]. На рис. 2 приведена классификация вопросников, основанная на выделении вопросов с различными основаниями. Каждый из таких вопросников может иметь и специальный вид, например: включать только равновесные события или иметь только равноценные вопросы. Кроме того, вопросник может содержать вопросы, допускающие ошибки и неопределенные ответы.

Следует отметить, что можно оптимизировать вопросник непосредственно по анкете (см. табл. 1) и получить гетерогенный вопросник. Если

есть ограничение на вид вопросника и виды задаваемых вопросов, то можно отдельно оптимизировать только бинарный вопросник или отдельно только тернарный вопросник.

Для решения задачи идентификации событий $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ минимально необходимо Y_{\min} вопросов. Число Y_{\min} определяется основаниями вопросов в вопроснике. Например, для бинарных вопросников это $Y_{\min} = \lceil \log_2 m \rceil$ (запись $\lceil \dots \rceil$ обозначает целое сверху от вычисляемого значения), а для тернарных вопросников $Y_{\min} = \lceil \log_3 m \rceil$. Неизбыточное множество вопросов Y задается таким образом, что $|Y| \geq Y_{\min}$. В случае если $|Y| = Y_{\min}$, вопросник называется компактным, иначе – некомпактным.

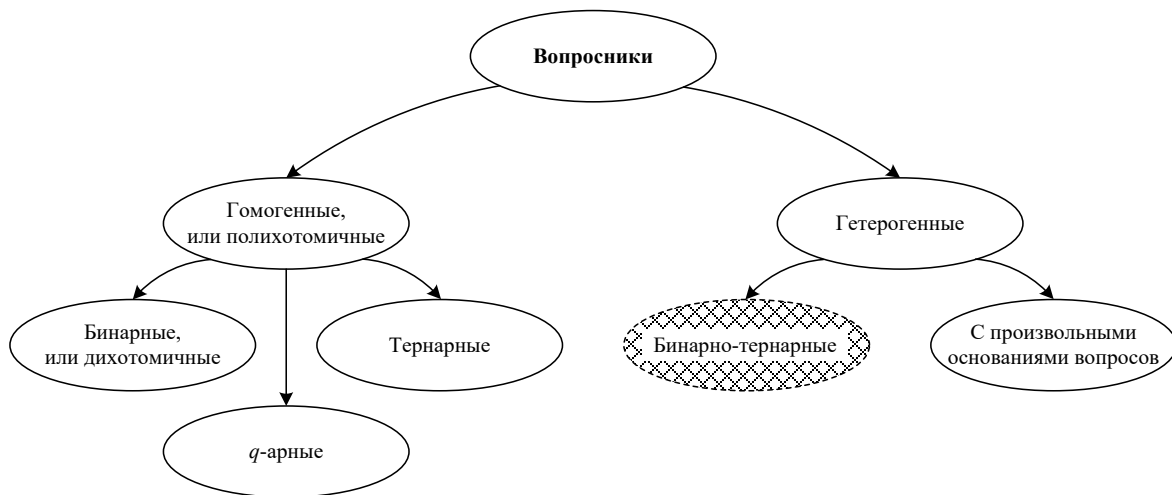


Рис. 2. Классификация вопросников

Рассмотрим подробнее особенности оптимизации бинарно-тернарных вопросников.

2. Оптимальные бинарно-тернарные вопросники

Построить оптимальный по цене обхода вопросник можно путем полного перебора всех вариантов постановки вопросов сначала на полном множестве идентифицируемых событий, затем на каждом из получаемых подмножеств. При этом среди всех полученных вопросников может быть выбран тот, который имеет минимальную цену обхода. С увеличением числа идентифицируемых событий число процедур по построению вопросников существенно увеличивается.

В [4, 10] доказано следующее важное в теории вопросников положение.

Теорема. Оптимальный вопросник состоит из оптимальных подвопросников.

Таким образом, оптимальный вопросник может быть построен путем выбора для каждого подмножества идентифицируемых событий на каждом шаге наилучшего варианта разбиения с помощью исходного множества вопросов. Алгоритмом, позволяющим строить оптимальные вопросники из оптимальных подвопросников, является алгоритм метода динамического программирования. Данный метод подразумевает первоначальный поиск всех возможных подмножеств разбиения исходного множества событий с числом элементов не менее двух (они называются ситуациями, а число событий в соответствующем подмножестве – порядком t ситуации) и определение для каждого полученного подмножества событий наилучшего с точки зрения цены обхода вопроса по уравнению оптимальности Р. Э. Беллмана:

$$C_{\min}(L_t, X_t) = \min_{y \in Y_t} \left\{ c(y) + \sum_{k=1}^{k=a(y)} p_k C_{\min}(L_t^k, X_{t,y}^k) \right\}, \quad (3)$$

где t – порядок ситуации (число событий в разделяемом подмножестве);
 (L_t, X_t) – ситуация L_t порядка t , включающая в себя подмножество идентифицируемых событий X_t , которые могут быть разделены вопросами из подмножества вопросов Y_t , имеющих смысл для идентифицируемого подмножества событий;

$c(y)$ – цена вопроса $y \in Y_t$;

$C_{\min}(L_t^k, X_{t,y}^k)$ – наименьшая цена разбиения ситуации $(L_t^k, X_{t,y}^k)$ на k подмножеств $X_{t,y}^k$ при постановке вопроса $y \in Y_t$;

$p_k = \frac{\sum_{x \in L_t^k} p(x)}{\sum_{x \in L_t} p(x)}$ – условная вероятность идентификации событий по каждому исходу.

Метод динамического программирования позволяет строить оптимальный вопросник, двигаясь от висячих вершин к корню. Альтернативой использованию метода динамического программирования является применение метода ветвей и границ, который позволяет строить оптимальный вопросник от корня к висячим вершинам [4].

Для построения оптимального вопросника по анкете, заданной таблицей 1, пользуясь методом динамического программирования, следует проделать определенные шаги.

Шаг 1. Проверяется логическая полнота анкеты.

На данном этапе анализируется сама анкета и выясняется, возможна ли идентификация всех событий по ней или нет, нет ли в анкете вопросов, не имеющих смысла. Возможность идентификации полного множества событий проверяется путем попарного сравнения всех столбцов анкеты. Если любые два столбца содержат отличия хотя бы в одной строке, то решается задача полной идентификации. В противном случае вопросник позволяет решить только задачу неполной идентификации. Вопросы, не имеющие смысла, – это те вопросы в анкете, строки которых заполнены одинаковыми цифрами номеров исходов.

Для рассматриваемого примера анкета является логически полной и позволяет решать задачу полной идентификации событий. При этом все вопросы имеют смысл для исходного множества событий и позволяют разделить его на два непустых подмножества.

Шаг 2. Осуществляется поиск всех ситуаций.

Данный шаг позволяет сократить число рассматриваемых подмножеств событий, которые нужно брать в расчет при оптимизации.

Приведем список всех пересечений подмножеств исходов вопросов.

$$y_1: \{x_1, x_2, x_3\} \cup \{x_4, x_5, x_6\} \cup \{x_7, x_8, x_9\};$$

$$y_2: \{x_1, x_4, x_7\} \cup \{x_2, x_5, x_8\} \cup \{x_3, x_6, x_9\};$$

$$y_3: \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_9\} \cup \{x_5, x_6, x_7, x_8\};$$

$$y_4: \{x_1, x_3, x_6, x_7\} \cup \{x_2, x_4, x_5, x_8, x_9\};$$

$$y_5: \{x_1, x_4, x_6, x_9\} \cup \{x_2, x_3, x_5, x_7, x_8\};$$

$$y_6: \{x_1, x_2, x_5, x_6, x_9\} \cup \{x_3, x_4, x_7, x_8\};$$

$$y_1 \cap y_2: \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_3\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\};$$

$$y_1 \cap y_3: \{x_1, x_2, x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5, x_6\} \cup \{x_7, x_8\} \cup \{x_9\};$$

$$y_1 \cap y_4: \{x_1, x_3\} \cup \{x_2\} \cup \{x_4, x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8, x_9\};$$

$$y_1 \cap y_5: \{x_1\} \cup \{x_2, x_3\} \cup \{x_4, x_6\} \cup \{x_5\} \cup \{x_7, x_8\} \cup \{x_9\};$$

$$y_1 \cap y_6: \{x_1, x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5, x_6\} \cup \{x_7, x_8\} \cup \{x_9\};$$

$$y_2 \cap y_3: \{x_1, x_4\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3, x_9\} \cup \{x_5, x_8\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\};$$

$$y_2 \cap y_4: \{x_1, x_7\} \cup \{x_2, x_5, x_8\} \cup \{x_3, x_6\} \cup \{x_4\} \cup \{x_9\};$$

$$\begin{aligned}y_2 \cap y_5: & \{x_1, x_4\} \cup \{x_2, x_5, x_8\} \cup \{x_3\} \cup \{x_6, x_9\} \cup \{x_7\}; \\y_2 \cap y_6: & \{x_1\} \cup \{x_2, x_5\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4, x_7\} \cup \{x_6, x_9\} \cup \{x_8\}; \\y_3 \cap y_4: & \{x_1, x_2, x_9\} \cup \{x_3, x_4\} \cup \{x_5, x_6\} \cup \{x_7, x_8\}; \\y_3 \cap y_5: & \{x_1, x_4, x_9\} \cup \{x_2, x_3\} \cup \{x_5, x_7, x_8\} \cup \{x_6\}; \\y_3 \cap y_6: & \{x_1, x_2, x_9\} \cup \{x_3, x_4\} \cup \{x_5, x_6\} \cup \{x_7, x_8\}; \\y_4 \cap y_5: & \{x_1, x_6\} \cup \{x_2, x_5, x_8\} \cup \{x_3, x_7\} \cup \{x_4, x_9\}; \\y_4 \cap y_6: & \{x_1, x_6\} \cup \{x_3, x_7\} \cup \{x_2, x_5, x_9\} \cup \{x_4, x_8\}; \\y_5 \cap y_6: & \{x_2, x_5\} \cup \{x_3, x_7, x_8\} \cup \{x_1, x_6, x_9\} \cup \{x_4\}; \\y_1 \cap y_2 \cap y_3: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\y_1 \cap y_2 \cap y_4: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_3\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\y_1 \cap y_2 \cap y_5: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_3\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\y_1 \cap y_2 \cap y_6: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_3\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\y_1 \cap y_3 \cap y_4: & \{x_1, x_3\} \cup \{x_2\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\y_1 \cap y_3 \cap y_5: & \{x_1\} \cup \{x_2, x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7, x_8\} \cup \{x_9\}; \\y_1 \cap y_3 \cap y_6: & \{x_1, x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5, x_6\} \cup \{x_7, x_8\} \cup \{x_9\}; \\y_1 \cap y_4 \cap y_5: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_3\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\y_1 \cap y_4 \cap y_6: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_3\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\y_1 \cap y_5 \cap y_6: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5, x_8\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_9\}; \\y_2 \cap y_3 \cap y_4: & \{x_1, x_4\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_5, x_8\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_9\}; \\y_2 \cap y_3 \cap y_5: & \{x_2\} \cup \{x_1, x_4\} \cup \{x_3\} \cup \{x_5, x_7\} \cup \{x_6\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\y_2 \cap y_3 \cap y_6: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\y_2 \cap y_4 \cap y_5: & \{x_1\} \cup \{x_2, x_5, x_8\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_9\}; \\y_2 \cap y_4 \cap y_6: & \{x_1\} \cup \{x_2, x_5\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\y_2 \cap y_5 \cap y_6: & \{x_1\} \cup \{x_2, x_5\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\y_3 \cap y_4 \cap y_5: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4, x_9\} \cup \{x_5, x_8\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\}; \\y_3 \cap y_4 \cap y_6: & \{x_1\} \cup \{x_2, x_9\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
y_3 \cap y_5 \cap y_6: & \{x_1, x_9\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7, x_8\}; \\
y_4 \cap y_5 \cap y_6: & \{x_1, x_6\} \cup \{x_2, x_5\} \cup \{x_3, x_7\} \cup \{x_4\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\
y_1 \cap y_2 \cap y_3 \cap y_4: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\
y_1 \cap y_2 \cap y_3 \cap y_5: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\
y_1 \cap y_2 \cap y_3 \cap y_6: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\
y_1 \cap y_2 \cap y_4 \cap y_5: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\
y_1 \cap y_2 \cap y_4 \cap y_6: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\
y_1 \cap y_2 \cap y_5 \cap y_6: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\
y_1 \cap y_3 \cap y_4 \cap y_5: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\
y_1 \cap y_3 \cap y_4 \cap y_6: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\
y_1 \cap y_3 \cap y_5 \cap y_6: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7, x_8\} \cup \{x_9\}; \\
y_1 \cap y_4 \cap y_5 \cap y_6: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\
y_2 \cap y_3 \cap y_4 \cap y_5: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5, x_8\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_9\}; \\
y_2 \cap y_3 \cap y_4 \cap y_6: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\
y_2 \cap y_3 \cap y_5 \cap y_6: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\
y_2 \cap y_4 \cap y_5 \cap y_6: & \{x_1\} \cup \{x_2, x_5\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\
y_3 \cap y_4 \cap y_5 \cap y_6: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\
y_1 \cap y_2 \cap y_3 \cap y_4 \cap y_5: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\
y_1 \cap y_2 \cap y_3 \cap y_4 \cap y_6: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\
y_1 \cap y_2 \cap y_3 \cap y_5 \cap y_6: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\
y_1 \cap y_2 \cap y_4 \cap y_5 \cap y_6: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\
y_1 \cap y_3 \cap y_4 \cap y_5 \cap y_6: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\
y_2 \cap y_3 \cap y_4 \cap y_5 \cap y_6: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}; \\
y_1 \cap y_2 \cap y_3 \cap y_4 \cap y_5 \cap y_6: & \{x_1\} \cup \{x_2\} \cup \{x_3\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} \cup \{x_6\} \cup \{x_7\} \cup \{x_8\} \cup \{x_9\}.
\end{aligned}$$

После получения такого списка выбираются все неповторяющиеся ситуации порядков $t \geq 2$.

Шаг 3. Анализируются ситуации и осуществляется построение оптимальных подвопросников для разделения событий, находящихся в них.

Осуществляется процесс получения оптимальных подвопросников, позволяющих разделить все ситуации всех порядков. Результаты анализа приводятся в табл. 2–6. Результатом оптимизации является вопросник, приведенный на рис. 3. Цена обхода полученного оптимального вопросника определяется величиной $C = 4,5$. Полученная величина меньше, чем для произвольных вопросников, приведенных на рис. 2.

Если рассмотреть вопросник, включающий в себя только бинарные вопросы (исключив вопросы y_1 и y_2), то метод динамического программирования даст оптимальный бинарный вопросник с ценой обхода $C = 4,7$ (рис. 4). Данная величина меньше цен обхода произвольных вопросников, приведенных на рис. 1, но больше, чем вопросника с бинарными и тернарными вопросами. Таким образом, наличие тернарных вопросов в ряде случаев может оказаться выгодным при построении вопросника с наименьшей ценой обхода.

Приведем пример подсчета оптимальной цены подвопросника по формуле (3) для ситуации четвертого порядка $\{x_1, x_4, x_6, x_9\}$:

$$C_{\min}(x_1, x_4, x_6, x_9) = \min \left\{ \begin{array}{l} c(y_1) + \frac{p(x_4) + p(x_6)}{p(x_1) + p(x_4) + p(x_6) + p(x_9)} C_{\min}(x_4, x_6); \\ c(y_2) + \frac{p(x_1) + p(x_4)}{p(x_1) + p(x_4) + p(x_6) + p(x_9)} C_{\min}(x_1, x_4) + \\ + \frac{p(x_6) + p(x_9)}{p(x_1) + p(x_4) + p(x_6) + p(x_9)} C_{\min}(x_6, x_9); \\ c(y_3) + \frac{p(x_1) + p(x_4) + p(x_9)}{p(x_1) + p(x_4) + p(x_6) + p(x_9)} C_{\min}(x_1, x_4, x_9); \\ c(y_4) + \frac{p(x_1) + p(x_6)}{p(x_1) + p(x_4) + p(x_6) + p(x_9)} C_{\min}(x_1, x_6) + \\ + \frac{p(x_4) + p(x_9)}{p(x_1) + p(x_4) + p(x_6) + p(x_9)} C_{\min}(x_4, x_9); \\ c(y_6) + \frac{p(x_1) + p(x_6) + p(x_9)}{p(x_1) + p(x_4) + p(x_6) + p(x_9)} C_{\min}(x_1, x_6, x_9); \end{array} \right\} =$$

$$= \min\{3,50; 5,00; 4,40; 2,60; 2,50\} = 2,50.$$

Таблица 2

Результаты анализа ситуаций $t = 2$ порядка

L_2	y	L_t	C_{opt}	y_{opt}
$\{x_1, x_2\}$	y_2, y_4, y_5	$\{x_1\}, \{x_2\}$	1	y_4
$\{x_1, x_3\}$	y_2, y_5, y_6	$\{x_1\}, \{x_3\}$	1	y_6
$\{x_1, x_4\}$	y_1, y_4, y_6	$\{x_1\}, \{x_4\}$	1	y_4, y_6
$\{x_1, x_6\}$	y_1, y_2, y_3	$\{x_1\}, \{x_6\}$	3	y_1, y_3
$\{x_1, x_7\}$	y_1, y_3, y_5, y_6	$\{x_1\}, \{x_7\}$	1	y_6
$\{x_1, x_9\}$	y_1, y_2, y_4	$\{x_1\}, \{x_9\}$	1	y_4
$\{x_2, x_3\}$	y_2, y_4, y_6	$\{x_2\}, \{x_3\}$	1	y_4, y_6
$\{x_2, x_5\}$	y_1, y_3	$\{x_2\}, \{x_5\}$	3	y_1, y_3
$\{x_2, x_9\}$	y_1, y_2, y_5	$\{x_2\}, \{x_9\}$	2	y_5
$\{x_3, x_4\}$	y_1, y_2, y_4, y_5	$\{x_3\}, \{x_4\}$	1	y_4
$\{x_3, x_6\}$	y_1, y_3, y_5, y_6	$\{x_3\}, \{x_6\}$	1	y_6
$\{x_3, x_7\}$	y_1, y_2, y_3	$\{x_3\}, \{x_7\}$	3	y_1
$\{x_3, x_9\}$	y_1, y_4, y_5, y_6	$\{x_3\}, \{x_9\}$	1	y_4
$\{x_4, x_5\}$	y_2, y_3, y_5, y_6	$\{x_4\}, \{x_8\}$	1	y_6
$\{x_4, x_6\}$	y_2, y_3, y_4, y_6	$\{x_4\}, \{x_9\}$	1	y_4, y_6
$\{x_4, x_8\}$	y_1, y_2, y_3, y_5	$\{x_5\}, \{x_6\}$	2	y_5
$\{x_4, x_9\}$	y_1, y_2, y_6	$\{x_5\}, \{x_7\}$	1	y_6
$\{x_5, x_6\}$	y_2, y_4, y_5	$\{x_5\}, \{x_8\}$	1	y_4
$\{x_5, x_8\}$	y_1, y_6	$\{x_6\}, \{x_7\}$	1	y_6
$\{x_6, x_9\}$	y_1, y_3, y_4	$\{x_6\}, \{x_9\}$	1	y_4
$\{x_7, x_8\}$	y_2, y_4	$\{x_7\}, \{x_8\}$	1	y_4
$\{x_8, x_9\}$	y_2, y_3, y_5, y_6	$\{x_8\}, \{x_9\}$	1	y_6

Таблица 3

Результаты анализа ситуаций $t = 3$ порядка

L_3	y	L_t	C	C_{opt}	y_{opt}
1	2	3	4	5	6
$\{x_1, x_2, x_3\}$	y_2	$\{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3\}$	4,00	1,60	y_4
	y_4	$\{x_1, x_3\}, \{x_2\}$	1,60		
	y_5	$\{x_1\}, \{x_2, x_3\}$	2,60		
	y_6	$\{x_1, x_2\}, \{x_3\}$	1,80		
$\{x_1, x_2, x_9\}$	y_1	$\{x_1, x_2\}, \{x_9\}$	3,57	1,71	y_5
	y_2	$\{x_1\}, \{x_2\}, \{x_9\}$	4,00		
	y_4	$\{x_1\}, \{x_2, x_9\}$	3,42		
	y_5	$\{x_1, x_9\}, \{x_2\}$	1,71		
$\{x_1, x_4, x_7\}$	y_1	$\{x_1\}, \{x_4\}, \{x_7\}$	3,00	1,50	y_4
	y_3	$\{x_1, x_4\}, \{x_7\}$	3,75		
	y_4	$\{x_1, x_7\}, \{x_4\}$	1,50		
	y_5	$\{x_1, x_4\}, \{x_7\}$	2,75		

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6
$\{x_1, x_4, x_9\}$	y_1	$\{x_1, \{x_4, \{x_9\}\}$	3,00	1,56	y_6
	y_2	$\{x_1, x_4, \{x_9\}\}$	4,67		
	y_4	$\{x_1, \{x_4, x_9\}\}$	1,78		
	y_6	$\{x_1, x_9, \{x_4\}\}$	1,56		
$\{x_1, x_6, x_9\}$	y_1	$\{x_1, \{x_6, \{x_9\}\}$	3,00	2,50	y_4
	y_2	$\{x_1, \{x_6, x_9\}\}$	4,67		
	y_3	$\{x_1, x_9, \{x_6\}\}$	3,83		
	y_4	$\{x_1, x_6, \{x_9\}\}$	2,50		
$\{x_2, x_5, x_8\}$	y_1	$\{x_2, \{x_5, \{x_8\}\}$	3,00	2,71	y_6
	y_3	$\{x_2, \{x_5, x_8\}\}$	3,71		
	y_6	$\{x_2, x_5, \{x_8\}\}$	2,71		
$\{x_2, x_5, x_9\}$	y_1	$\{x_2, \{x_5, \{x_9\}\}$	3,00	3,00	y_1
	y_2	$\{x_2, x_5, \{x_9\}\}$	5,71		
	y_3	$\{x_2, x_9, \{x_5\}\}$	4,43		
	y_5	$\{x_2, x_5, \{x_9\}\}$	3,71		
$\{x_3, x_6, x_9\}$	y_1	$\{x_3, \{x_6, \{x_9\}\}$	3,00	1,40	y_4
	y_3	$\{x_3, x_9, \{x_6\}\}$	3,80		
	y_4	$\{x_3, x_6, \{x_9\}\}$	1,40		
	y_5	$\{x_3, \{x_6, x_9\}\}$	2,80		
	y_6	$\{x_3, \{x_6, x_9\}\}$	1,80		
$\{x_3, x_7, x_8\}$	y_1	$\{x_3, \{x_7, x_8\}\}$	3,83	2,50	y_4
	y_2	$\{x_3, \{x_7, \{x_8\}\}$	4,00		
	y_3	$\{x_3, \{x_7, x_8\}\}$	3,83		
	y_4	$\{x_3, x_7, \{x_8\}\}$	2,50		
$\{x_4, x_5, x_6\}$	y_2	$\{x_4, \{x_5, \{x_6\}\}$	4,00	1,43	y_6
	y_3	$\{x_4, \{x_5, x_6\}\}$	3,43		
	y_4	$\{x_4, x_5, \{x_6\}\}$	1,86		
	y_5	$\{x_4, x_6, \{x_5\}\}$	2,71		
	y_6	$\{x_4, \{x_5, x_6\}\}$	1,43		
$\{x_5, x_7, x_8\}$	y_1	$\{x_5, \{x_7, x_8\}\}$	3,71	1,71	y_6
	y_2	$\{x_5, x_8, \{x_7\}\}$	4,71		
	y_4	$\{x_5, x_8, \{x_7\}\}$	1,71		
	y_6	$\{x_5, \{x_7, x_8\}\}$	1,71		
$\{x_7, x_8, x_9\}$	y_2	$\{x_7, \{x_8, \{x_9\}\}$	4,00	1,63	y_6
	y_3	$\{x_7, x_8, \{x_9\}\}$	3,63		
	y_4	$\{x_7, \{x_8, x_9\}\}$	1,75		
	y_5	$\{x_7, x_8, \{x_9\}\}$	2,63		
	y_6	$\{x_7, x_8, \{x_9\}\}$	1,63		

Таблица 4

Результаты анализа ситуаций $t = 4$ порядка

L_4	y	L_t	C	C_{opt}	y_{opt}
$\{x_1, x_3, x_6, x_7\}$	y_1	$\{x_1, x_3\}, \{x_6\}, \{x_7\}$	3,50	3,50	y_1
	y_2	$\{x_1, x_7\}, \{x_3, x_6\}$	5,00		
	y_5	$\{x_1, x_6\}, \{x_3, x_7\}$	5,00		
	y_6	$\{x_1, x_6\}, \{x_3, x_7\}$	4,00		
$\{x_1, x_4, x_6, x_9\}$	y_1	$\{x_1\}, \{x_4, x_6\}, \{x_9\}$	3,50	2,50	y_6
	y_2	$\{x_1, x_4\}, \{x_6, x_9\}$	5,00		
	y_3	$\{x_1, x_4, x_9\}, \{x_6\}$	4,40		
	y_4	$\{x_1, x_6\}, \{x_4, x_9\}$	2,60		
	y_6	$\{x_1, x_6, x_9\}, \{x_4\}$	2,50		
$\{x_3, x_4, x_7, x_8\}$	y_1	$\{x_3\}, \{x_4\}, \{x_7, x_8\}$	3,50	3,30	y_4
	y_3	$\{x_3, x_4\}, \{x_7, x_8\}$	4,00		
	y_4	$\{x_3, x_7\}, \{x_4, x_8\}$	3,30		
	y_5	$\{x_3, x_7, x_8\}, \{x_4\}$	3,95		
$\{x_5, x_6, x_7, x_8\}$	y_1	$\{x_5, x_6\}, \{x_7, x_8\}$	4,00	2,00	y_6
	y_2	$\{x_5, x_8\}, \{x_6\}, \{x_7\}$	4,63		
	y_5	$\{x_5, x_7, x_8\}, \{x_6\}$	3,50		
	y_6	$\{x_5, x_6\}, \{x_7, x_8\}$	2,00		

Таблица 5

Результаты анализа ситуаций $t = 5$ порядка

L_5	y	L_t	C	C_{opt}	y_{opt}
$\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_9\}$	y_1	$\{x_1, x_2, x_3\}, \{x_4\}, \{x_9\}$	3,67	2,41	y_6
	y_2	$\{x_1, x_4\}, \{x_2\}, \{x_3, x_9\}$	4,83		
	y_5	$\{x_1, x_4, x_9\}, \{x_2, x_3\}$	3,42		
	y_6	$\{x_1, x_2, x_9\}, \{x_3, x_4\}$	2,41		
$\{x_1, x_2, x_5, x_6, x_9\}$	y_1	$\{x_1, x_2\}, \{x_5, x_6\}, \{x_9\}$	3,70	3,70	y_1
	y_2	$\{x_1\}, \{x_2, x_5\}, \{x_6, x_9\}$	5,60		
	y_3	$\{x_1, x_2, x_9\}, \{x_5, x_6\}$	4,50		
	y_4	$\{x_1, x_6\}, \{x_2, x_5, x_9\}$	4,00		
	y_5	$\{x_1, x_6, x_9\}, \{x_2, x_5\}$	4,70		
$\{x_2, x_3, x_5, x_7, x_8\}$	y_1	$\{x_2, x_3\}, \{x_5\}, \{x_7, x_8\}$	3,80	3,20	y_4
	y_2	$\{x_2, x_5, x_8\}, \{x_3\}, \{x_7\}$	5,90		
	y_3	$\{x_2, x_3\}, \{x_5, x_7, x_8\}$	4,50		
	y_4	$\{x_2, x_5, x_8\}, \{x_3, x_7\}$	3,20		
	y_6	$\{x_2, x_5\}, \{x_3, x_7, x_8\}$	3,70		
$\{x_2, x_4, x_5, x_8, x_9\}$	y_1	$\{x_2\}, \{x_4, x_5\}, \{x_8, x_9\}$	3,86	3,50	y_6
	y_2	$\{x_4\}, \{x_2, x_5, x_8\}, \{x_9\}$	5,36		
	y_5	$\{x_2, x_5, x_8\}, \{x_4, x_9\}$	3,86		
	y_6	$\{x_2, x_5, x_9\}, \{x_4, x_8\}$	3,50		

Таблица 6
Результаты анализа ситуаций $t = 9$ порядка

L_9	y	L_t	C	C_{opt}	y_{opt}
$\{x_1 \div x_9\}$	y_1	$\{x_1, x_2, x_3\}, \{x_4, x_5, x_6\}, \{x_7, x_8, x_9\}$	4,55	4,50	y_4, y_6
	y_2	$\{x_1, x_4, x_7\}, \{x_2, x_5, x_8\}, \{x_3, x_6, x_9\}$	5,89		
	y_3	$\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_9\}, \{x_5, x_6, x_7, x_8\}$	5,25		
	y_4	$\{x_1, x_3, x_6, x_7\}, \{x_2, x_4, x_5, x_8, x_9\}$	4,50		
	y_5	$\{x_1, x_4, x_6, x_9\}, \{x_2, x_3, x_5, x_7, x_8\}$	4,85		
	y_6	$\{x_1, x_2, x_5, x_6, x_9\}, \{x_3, x_4, x_7, x_8\}$	4,50		

Сложность метода динамического программирования является экспоненциальной [14], что с увеличением числа идентифицируемых событий приводит к существенному усложнению решаемой задачи (в том числе даже при использовании современных вычислительных систем). Поэтому на практике могут применяться приближенные методы, дающие квазиоптимальные вопросники.

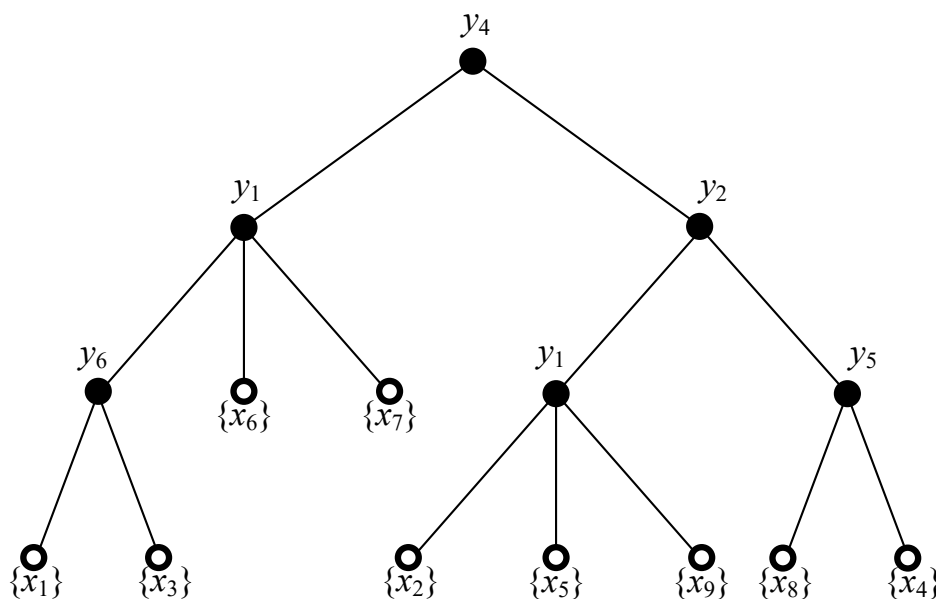


Рис. 3. Оптимальный вопросник с бинарными и тернарными вопросами

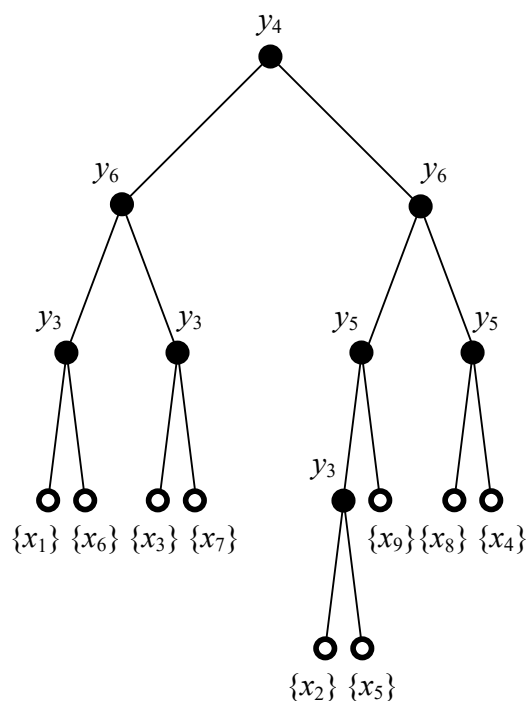


Рис. 4. Оптимальный бинарный вопросник

3. Некоторые свойства бинарно-тернарных вопросников

Сравнивая между собой бинарные и бинарно-тернарные вопросники, отметим несколько особенностей последних, позволяющих говорить о некотором их преимуществе перед первыми.

Свойство 1. Бинарно-тернарный вопросник требует меньшего числа постановок вопросов, чем бинарный, позволяющий идентифицировать то же множество событий.

Данное свойство следует из того факта, что один тернарный вопрос идентифицирует три события, а бинарный – только два, т. е. процесс идентификации закончится «быстрее», если используются не только бинарные вопросы, но еще и тернарные. Для примера сравним вопросники на рис. 3 и 4. Бинарно-тернарный вопросник состоит из шести вопросов, тогда как бинарный – из восьми.

Свойство 2. Максимальная длина маршрута в бинарно-тернарном вопроснике может оказаться такой же или меньшей, чем в бинарном вопроснике.

Под маршрутом понимается последовательность вершин и ребер, ведущая от корневой вершины графа к какой-либо из висячих вершин. Число ребер в маршруте является его длиной.

Свойство 2 связано также с процессом идентификации событий из заданного множества и «быстротой» его завершения. Чем меньше длина маршрута, тем меньшее количество вопросов требуется для идентификации любых событий по вопроснику. Вновь сравним для примера вопросники, приведенные на рис. 3 и 4: максимальная длина маршрута в первом равна трем, во втором – четырем.

Представленные особенности бинарно-тернарных вопросников следует учитывать при синтезе алгоритмов идентификации событий с ограничениями на время проведения данной процедуры или на максимальное число вопросов, требующихся для решения поставленной задачи.

4. Приложение вопросников в технической диагностике систем автоматики и управления

Техническое диагностирование устройств и систем автоматики производится на различных уровнях их реализации и на всех этапах их жизненного цикла [30]. Процедуры по техническому диагностированию могут выполняться как автоматически, так и с привлечением сервисного персонала.

Так как технически оборудовать устройства и системы автоматики развитыми средствами встроенного и внешнего диагностирования не всегда возможно, во всех областях промышленности и транспорта требуется использовать техническое диагностирование с привлечением сервисного персонала, а также проводить процедуры по техническому обслуживанию. С целью снижения влияния человеческого фактора на процесс диагностирования, а также повышения уровня автоматизации внедряются средства внешнего технического диагностирования и мониторинга [31]. В состав систем технического диагностирования и мониторинга входят датчики физических величин и специализированные диагностические приборы (датчики могут быть интегрированы в приборы, а могут быть внешними, например датчики получения данных от искусственных сооружений и организации систем структурированного мониторинга [32, 33]), сети передачи первичной или предобработанной диагностической информации, устройства концентрации, аналитики и вывода данных конечному пользователю. Сконцентрируем внимание на системах технического диагностирования и мониторинга устройств железнодорожной автоматики [34].

Системы мониторинга устройств железнодорожной автоматики включают в себя все обозначенные выше уровни. Основными объектами мониторинга являются устройства автоматики, расположенные в непосредственной близости к железнодорожному полотну, – напольное технологическое оборудование. По статистике именно на напольное оборудование приходится подавляющее число отказов устройств железнодорожной автоматики [35]. К напольному оборудованию относятся рельсовые цепи, средства управления железнодорожными стрелками, светофоры, объекты децентрализованных систем автоблокировки и переездной автоматики и т. п. Наиболее уязвимыми являются средства управления железнодорожными стрелками и оборудование рельсовых цепей. Данные объекты железнодорожной автоматики особенно восприимчивы к изменению климатических условий эксплуатации, состоянию верхнего строения пути, воздействиям со стороны подвижного состава.

На рис. 5 представлен схематический план произвольной промежуточной станции в однониточном исполнении (такие станции широко распространены на железных дорогах). Для позиционирования подвижных единиц используется 18 рельсовых цепей (8 разветвленных и 10 неразветвленных). Для перемещения поездов с одного пути на другой на станции уложено 15 стрелочных переводов, оборудованных устройствами автоматического управления. Движение регулируется с помощью 14 поездных и 5 маневровых светофоров. Это основные объекты мониторинга. В современных системах мониторинга они контролируются только косвенно по состоянию централизованных объектов автоматики (постовых устройств) [36].

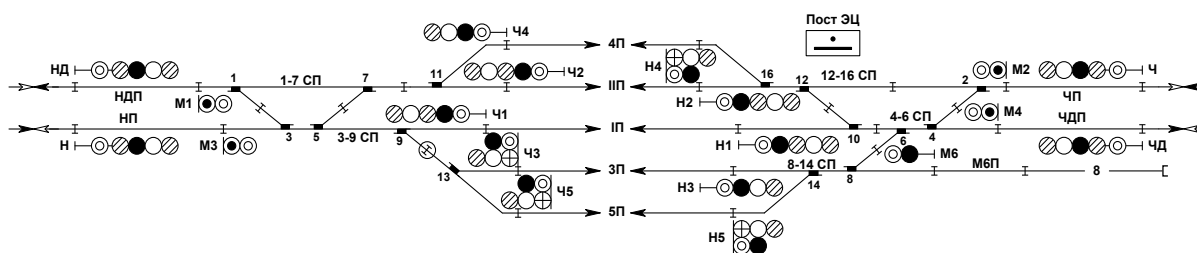


Рис. 5. Схематический план промежуточной станции

По причине того, что мониторинг устройств автоматики производится по средствам управления, располагаемым на посту централизации, качество диагностирования является низким. Глубина диагностирования является недостаточной (зачастую – до фиксации дефекта объекта диагностирования,

но не до конкретной его структурной единицы). Полнота диагностирования также является низкой. Требуется дополнительный анализ диагностической информации и привлечение сервисного персонала для идентификации диагностических событий [37].

Рассмотрим, к примеру, рельсовую цепь тональной частоты. В современных системах мониторинга устройств железнодорожной автоматики для мониторинга рельсовой цепи используют несколько параметров: дискретные состояния и напряжения на выходах генератора частот, путевого приемника, путевого реле, а также сопротивление изоляции кабеля, ведущего от постовых устройств автоматики к напольному оборудованию [38]. Изменяя эти параметры с малым периодом диагностирования (несколько секунд опроса датчиков), система технического диагностирования и мониторинга формирует массив диагностических признаков. Методы их распознавания подробно описаны, например, в [39]. Диагностические признаки соответствуют конкретным диагностическим ситуациям. Часть диагностических ситуаций может быть интерпретирована системой мониторинга автоматически, остальные требуют дополнительного ручного анализа.

Приведем простой пример. Системой мониторинга зафиксирован отказ рельсовой цепи, при котором наблюдаются такие значения диагностических параметров: требуемое значение напряжения на выходе генератора, отсутствие напряжения на путевом фильтре, отсутствие напряжения на путевом реле, сопротивление изоляции кабеля в норме. Отсюда следует сделать несколько выводов: дефект может быть связан с отказом путевого приемника, оборудования подключения приборов к рельсам, нарушением целостности рельсовой нити и т. д. Каждое из этих событий может возникать с какой-то вероятностью.

Имея в программном обеспечении системы технического диагностирования и мониторинга подсистему записи истории функционирования объектов диагностирования (архив), фиксируя изначально условия и исходные исторические данные об объектах диагностирования, а также анализируя статистические данные о состояниях объектов диагностирования, можно строить самообучающиеся системы мониторинга. Такие системы «настраиваются» на работу с конкретными объектами диагностирования, учитывают климатические условия эксплуатации объектов диагностирования, а также включают в себя развитые подсистемы поддержки принятия решений. Такие подсистемы целесообразно реализовывать на основе теории вопросников. В

подсистеме поддержки принятия решения строится вопросник, который учитывает все возможные диагностические события, специфику самого объекта диагностирования и выдает рекомендуемые для сервисного персонала действия, которые с определенной вероятностью приведут к результату – идентификации события дефекта. Такой вопросник может иметь произвольную форму и перестраиваться во времени с учетом как вероятностей возникновения различных диагностических событий, так и критичности их влияния на перевозочный процесс (влияния на готовность устройств автоматики к выполнению своих функций). Например, в [38] описывается процесс диагностирования рельсовых цепей тональной частоты и дан пример идентификации состояния рельсовой цепи при измерениях напряжений системой мониторинга. Данный процесс может быть представлен в виде вопросника.

На рис. 6 приведены вопросники, которые позволяют на основе анализа данных от рельсовой цепи автоматизировать идентификацию ряда диагностических событий в системах технического диагностирования и мониторинга. Данные вопросники позволяют реализовать процесс идентификации события по алгоритму, предложенному в [38]. Для примера представлено два варианта вопросников, которые могут быть реализованы в программном обеспечении системы. Они отличаются постановкой первого вопроса y_1 . В бинарном вопроснике этот вопрос звучит следующим образом: «Напряжение на путевом приемнике находится в пределах $0 \leq U_{\text{пп}} \leq U_{\text{ост}}?$ » В бинарно-тернарном так: «Напряжение на путевом приемнике находится в пределах $U_{\text{пп}} \leq U_{\text{мин}}$ и $U_{\text{пп}} \geq 0$ или $U_{\text{пп}} \leq U_{\text{мин}}$ и $U_{\text{пп}} \geq U_{\text{ост}}?$ ». Данные вопросы позволяют идентифицировать два диагностических события – x_1 («наличие логической занятости») и x_2 («напряжение $U_{\text{ост}}$ выше нормы»). Следующий вопрос в бинарном вопроснике (y_2) формулируется так: «Напряжение на путевом приемнике находится в пределах $U_{\text{ост}} \leq U_{\text{пп}} \leq U_{\text{мин}}?$ ». Вопрос y_3 в бинарном вопроснике (y_2 в бинарно-тернарном вопроснике): « $U_{\text{мин}} \leq U_{\text{пп}} \leq U_{\text{крит}}?$ ». Данные вопросы различают событие x_3 («предотказное состояние рельсовой цепи»). Вопрос y_4 в бинарном вопроснике (y_3 в бинарно-тернарном вопроснике): « $U_{\text{крит}} \leq U_{\text{пп}} \leq U_{\text{макс}}?$ ». Данные вопросы различают событие x_4 («параметры рельсовой цепи в норме»). Вопрос y_5 в бинарном вопроснике (y_4 в бинарно-тернарном вопроснике): « $U_{\text{макс}} \leq U_{\text{пп}} \leq \infty?$ ». Если «да», то фиксируется событие x_5 («логическая свобода рельсовой цепи»), иначе – фиксируется событие x_6 («дефект в другом устройстве рельсовой цепи»). Форма вопросника определяется на этапе разработки подсистемы поддержки принятия решений и влияет на среднее время идентификации событий по вопроснику. Такие вопросники

могут «наращиваться», а также «объединяться» в «систему вопросников» для повышения полноты и глубины диагностирования.

Можно повысить информативность системы мониторинга за счет добавления диагностических параметров, например включения датчиков целостности устройств подключения аппаратуры к рельсам, дополнительных датчиков зондирования рельсов, получения данных от средств самодиагностирования генераторов, фильтров и реле и т. д. Например, в работе [40] рассмотрено влияние различных параметров на асимметрию тягового тока. Измеряется падение напряжения на секциях основных обмоток дроссель-трансформаторов, установленных в начале и в конце рельсовой цепи. Способ измерения предполагает участие человека в данном процессе, однако он может быть автоматизирован с помощью специализированных датчиков получения необходимой диагностической информации с автоматической передачей результатов мониторинга в концентратор информации.

По результатам измерений вычисляются коэффициенты асимметрии тягового тока в начале и в конце рельсовой цепи, а также степень ослабления тягового тока в каждой рельсовой нити. Это позволяет анализировать причины возникновения повышенной асимметрии тягового тока.

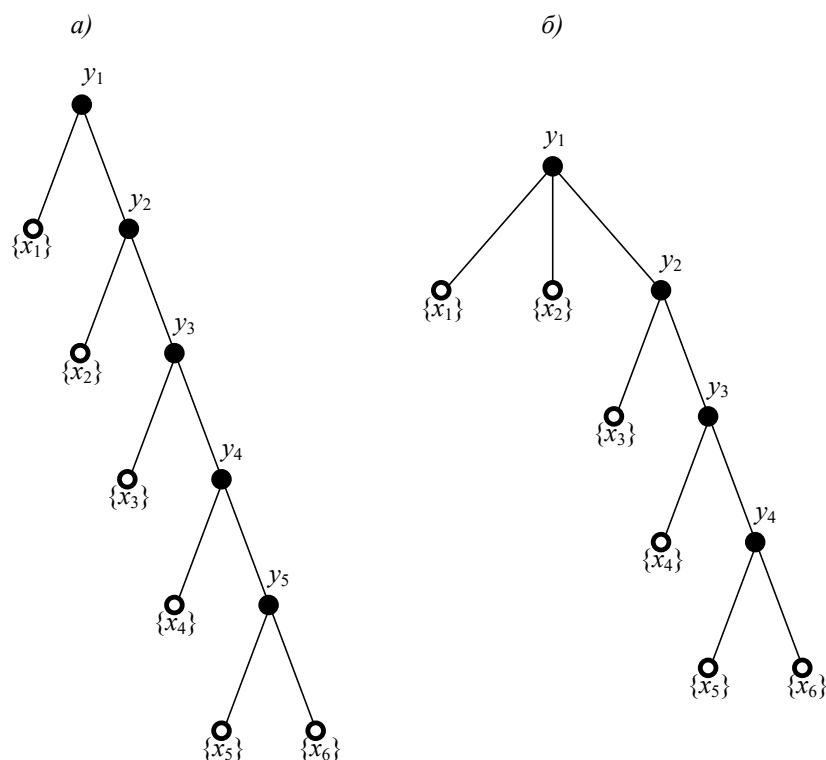


Рис. 6. Вопросник для идентификации состояния рельсовой цепи тональной частоты:
а – бинарная форма; б – бинарно-тернарная форма

Построим вопросник для данного «расширения» возможностей системы мониторинга. Вопросы формулируются следующим образом: y_1 – «Степень уменьшения тягового тока в рельсовых нитях примерно одинакова, а тяговый ток больше в начале и в конце одной из рельсовой нити?»; y_2 – «Тяговый ток больше втекает в рельсовую нить, к которой подключены цепи заземления, и быстрее в ней уменьшается?»; y_3 – «Степень уменьшения тягового тока такова, что в конце рельсовой нити, к которой подключены цепи заземления, оказывается меньше, чем в другой нити?»; y_4 – «Тяговый ток меньше и в начале, и в конце рельсовой нити, к которой подключены цепи заземления, при более высокой степени уменьшения тягового тока в ней?». Ответами на вопросы и идентифицируемыми ими событиями при положительном исходе соответственно будут события: x_1 – «Причиной асимметрии тягового тока является повышенное сопротивление рельсовых стыковых соединителей в другой рельсовой нити»; x_2 – «Причиной асимметрии является пониженное сопротивление цепей заземления»; x_3 – «Асимметрия вызывается дополнительно и повышенным сопротивлением рельсовых стыковых соединителей в другой рельсовой нити»; x_4 – «Причиной асимметрии тягового тока является совместное повышенное сопротивление рельсовых стыковых соединителей и пониженное сопротивление цепей заземления в этой рельсовой нити». Если вопросы не дают результата, то фиксируется событие x_5 – «Причина в других устройствах рельсовой цепи».

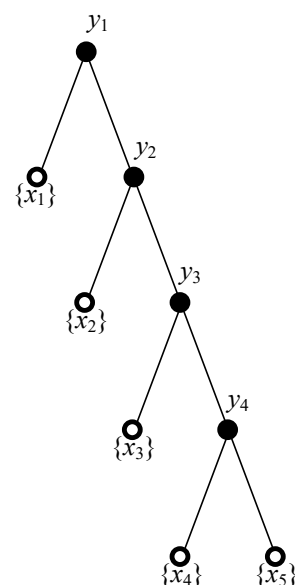


Рис. 7. Вопросник для идентификации причин асимметрии тягового тока

Фиксация рассмотренных событий позволяет идентифицировать последующие варианты проведения ручных измерений сервисным персоналом – конкретную рельсовую нить и структурные единицы (токопроводящие или изолирующие) для проведения измерений.

Исторические и статистические данные позволят в системе поддержки принятия решений выбирать последовательности постановки вопросов для решения задачи идентификации.

Внедрение подсистем поддержки принятия решений в программное обеспечение систем технического диагностирования и мониторинга позволяет усовершенствовать технологию их функционирования.

Заключение

Бинарно-тернарные вопросники – это тот класс гетерогенных вопросников, который может эффективно использоваться в практических задачах разделения и идентификации событий. При этом бинарно-тернарный вопросник по сравнению с бинарным вопросником, построенным для того же множества идентифицируемых событий, при одинаковых ценах вопросов будет иметь меньше вопросов и, соответственно, меньшую цену обхода. Отмеченное преимущество может оказаться востребованным при ограничениях на максимальное время идентификации событий.

Использование вопросников при диагностировании устройств и систем автоматики и управления может быть востребовано на всех этапах их жизненного цикла. Их использование целесообразно прежде всего при разработке подсистем поддержки принятия решений в современных системах технического диагностирования и мониторинга. Их внедрение позволяет усовершенствовать технологии мониторинга и повысить эффективность в плане повышения информативности в процессе расследования причин возникновения неисправностей сервисным персоналом эксплуатационных предприятий.

Еще одним приложением бинарно-тернарных вопросников могут оказаться системы технического обучения, строящиеся на основе моделей древовидных графов и подразумевающие различные сценарии обучения при различных вариантах исходов, выбираемых пользователями [41].

Следует отметить, что вопросники в области железнодорожного транспорта могут быть использованы не только в решении задач технической диагностики и обучения. Например, они могут оказаться эффективным реше-

нием и для интеллектуальных систем оперативного диспетчерского управления (*train management systems, TMS*) и систем автоведения, подразумевающим формирование именно «подсказки» или «рекомендации» техническому персоналу по выполнению каких-либо действий [42, 43].

Библиографический список

1. Аржененко А. Ю. Дискретный поиск. Теория вопросников / А. Ю. Аржененко, В. А. Вестяк. – М. : Изд-во МАИ, 2012. – 159 с.
2. Микони С. В. Теория принятия управленческих решений. – СПб. : Лань, 2015. – 448 с.
3. Hahanov V. Cyber Physical Computing for IoT-driven Services. – New York: Springer International Publishing AG, 2018. – 279 p. – DOI: 10.1007/978-3-319-54825-8.
4. Пархоменко П. П. Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратурные средства) / П. П. Пархоменко, Е. С. Согомоян. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 320 с.
5. Picard C. F. Théorie des Questionnaires. – Paris: Gauthier-Villars, 1965. – 127 p.
6. Dubail F. Algorithmes de Questionnaires Réalisable, Optimaux au Sens de Différents Critères. – These présentée à l'Université de Lyon. 1967. – 56 p.
7. Chesari Y. Questionnaire, Codage et tris. – Institut Blasé Pascal, Paris, 1968. – 164 p.
8. Retolla S. Extension de l'algorithme d'Huffman à une classe de Questionnaires à Savoirs Counts. – These présentée à l'Université de Lyon, 1969. – 64 p.
9. Пархоменко П. П. Оптимальные вопросники с неравными ценами вопросов / П. П. Пархоменко // Доклады АН СССР. – 1969. – Том 184. – № 1. – С. 51–54.
10. Пархоменко П. П. Теория вопросников (обзор) / П. П. Пархоменко // Автоматика и телемеханика. – 1970. – № 4. – С. 140–159.
11. Picard C. F. Graphs and Questionnaires. – Netherlands: North-Holland Publishing Company, 1980. – 431 p.
12. Land A. H., Doig A. G. An Automatic Method of Solving Discrete Programming Problems // *Econometrica*. – 1960. – Vol. 28. – No. 3. – Pp. 497–520.
13. Bellman R. E. Dynamic Programming. – Princeton University Press, Princeton NJ, 1957. – 392 p.
14. Аржененко А. Ю. Оптимальные бинарные вопросники / А. Ю. Аржененко, Б. Н. Чугаев. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 128 с.
15. Ярмолик В. Н. Контроль и диагностика цифровых узлов ЭВМ / В. Н. Ярмолик. – Минск: «Наука и техника», 1988. – 240 с.
16. Яблонский С. В. Некоторые вопросы надежности и контроля управляющих систем // Математические вопросы кибернетики / под ред. С. В. Яблонского. – Вып. 1. – М. : Главная редакция физико-математической литературы, 1988. – С. 5–25.
17. Аржененко А. Ю. Оптимизация компактных вопросников / А. Ю. Аржененко, Б. Н. Чугаев // Электронное моделирование. – 1984. – № 4. – С. 59–64.
18. Аржененко А. Ю. Оптимизация транзитивных бинарных вопросников / А. Ю. Аржененко, Б. Н. Чугаев // Автоматика и телемеханика. – 1985. – № 2. – С. 159–164.
19. Аржененко А. Ю. Оптимизация бинарных вопросников / А. Ю. Аржененко, О. Г. Казакова, Б. Н. Чугаев // Автоматика и телемеханика. – 1985. – № 11. – С. 138–144.
20. Аржененко А. Ю. Оптимизация бинарных вопросников, содержащих вопросы с переменной ценой / А. Ю. Аржененко, О. Г. Казакова, В. А. Неясов // Автоматика и телемеханика. – 1989. – № 6. – С. 139–149.

21. Аржененко А. Ю. Оптимизация бинарных вопросников методом толерантной замены / А. Ю. Аржененко, А. В. Бондаренко // Электронное моделирование. – 1990. – № 3. – С. 53–57.
22. Аржененко А. Ю. Алгоритм выбора оптимальной структуры избыточного компактного вопросника / А. Ю. Аржененко, А. В. Бондаренко // Автоматика и телемеханика. – 1991. – № 5. – С. 163–169.
23. Аржененко А. Ю. Модификация метода толерантных перестановок в почти равномерных компактных анкетах / А. Ю. Аржененко, В. А. Вестяк // Автоматика и телемеханика. – 2012. – № 7. – С. 109–118.
24. Чугаев Б. Н. Оптимальная идентификация случайных событий / Б. Н. Чугаев, А. Ю. Аржененко // Экономика, статистика и информатика. Вестник УМО. – 2013. – № 2. – С. 188–190.
25. Пархоменко П. П. Вопросники и организационные иерархии / П. П. Пархоменко // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 6. – С. 163–174.
26. Efanov D. V., Khoroshev V. V., Osadchy G. V., Belyi A. A. Optimization of Conditional Diagnostics Algorithms for Railway Electric Switch Mechanism Using the Theory of Questionnaires with Failure Statistics // Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018), Kazan, Russia, September 14-17, 2018. – Pp. 237–245. – DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524620.
27. Duncan G. Heterogeneous Questionnaire Theory // SIAM Journal on Applied Mathematics. – 1974. – Vol. 27. – Issue 1. – Pp. 59–71. – DOI: 10.1137/0127005.
28. Ефанов Д. В. Оптимизация полихотомичных вопросников методом корневого вопроса / Д. В. Ефанов, А. Н. Павлов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2012. – № 4. – С. 125–134.
29. Сапожников Вл. В. Классификация вопросников / Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, А. Н. Павлов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2011. – № 4. – С. 128–137.
30. Гавзов Д. В. Методы обеспечения безопасности дискретных систем / Д. В. Гавзов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 1994. – № 8. – С. 3–50.
31. Ефанов Д. В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : монография. – СПб. : ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. – 171 с.
32. Belyi A. A., Karapetov E. S., Efimenko Yu. I. Structural health and geotechnical monitoring during transport objects construction and maintenance (Saint-Petersburg example) // Procedia Engineering. Vol. 189, 2017. – Pp. 145–151. – DOI:10.1016/j.proeng.2017.05.024.
33. Белый А. А. Проектирование и организация системы мониторинга мостовых сооружений на высокоскоростных железнодорожных магистралях / А. А. Белый, А. А. Барановский, Д. Е. Воробьев, К. Ю. Долинский, Л. К. Дьяченко, Г. В. Осадчий // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2017. – Т. 14. – № 2. – С. 211–222.
34. Efanov D. V. New Architecture of Monitoring Systems of Train Traffic Control Devices at Wayside Stations // Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018), Kazan, Russia, September 14-17, 2018. – Pp. 276–280. – DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524788.
35. Сапожников В. В. Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи: учеб. Пособие / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, В. И. Шаманов // под ред. Вл. В. Сапожникова. – М. : ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2017. – 318 с.

36. Heidmann L. Smart Point Machines: Paving the Way for Predictive Maintenance // Signal+Draht, 2018, issue 9. – Pp. 70–75.
37. Ефанов Д. В. Особенности функционирования систем технического диагностирования и мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры / Д. В. Ефанов // Автоматика на транспорте. – 2018. – Том 4. – № 3. – С. 333–354.
38. Ефанов Д. В. Мониторинг параметров рельсовых цепей тональной частоты / Д. В. Ефанов, Н. А. Богданов // Транспорт Урала. – 2013. – № 1. – С. 36–42.
39. Биргер И. А. Техническая диагностика. – М. : Машиностроение, 1978. – 240 с.
40. Шаманов В. И. Формирование информации о состоянии рельсовых линий для систем автоматического контроля и удаленного мониторинга // Региональная информатика и информационная безопасность : сб. трудов. – Вып. 5. – СПб. : СПОИСУ, 2018. – С. 290–293.
41. Ефанов Д. В. Техническое обучение как сервис / Д. В. Ефанов, Д. Г. Плотников, Г. В. Осадчий, В. В. Хорошев // Транспорт Российской Федерации. – 2018. – № 5. – С. 46–49.
42. Pan D., Zheng Y., Zhang C. On Intelligent Automatic Train Control of Railway Moving Automatic Block Systems Based on Multi-Agent Systems // Proceedings of the 29th Chinese Control Conference, Beijing, China, 29-31 July 2010. Pp. 4471–4476.
43. Кокурин И. М. Технологические основы инновационной системы автоматического управления движением поездов / И. М. Кокурин, Д. В. Ефанов // Автоматика, связь, информатика. – 2019. – № 5. – С. 19–23. – DOI: 10.34649/AT.2019.5.5.003.

Dmitrii V. Efanov,

Valerii V. Khoroshev

“LocoTech-Signal” LLC,

«Automation, Remote Control and Communication on Railway Transport»,

Russian University of Transport, Moscow

BINARY-TERNARY QUESTIONNAIRES

The questionnaires theory allows solving various problems of discrete search and identification, including its effective application is the automation and control systems technical diagnostics. The questionnaire is a set of events and questions that must be asked for identifying events. Interpreting into technical diagnostics, events are a set of technical object states, questions are a set of checks that allow identifying states. The questionnaires theory can contribute to technical diagnostics and monitoring tools development. Such testing tools will increase the level of automation and control. The authors of the article conduct research on specific types of questionnaires: that contain questions with two outcomes (binary questions) and questions with three outcomes (ternary questions). The research of such a questions combination is important for the constructing of a fixed questionnaire events. This questionnaire will require a smaller number of questions than in a binary questionnaire. At the same time, ternary questions are much more common in practice than questions with a widerange of outcomes. In addition, the use of such questionnaires in practice may have an impact on the average value of the costs for implementation and prove to be more efficient than using only binary questionnaires. This is especially important with restrictions on the average time of event identification. The paper

describes the main binary-ternary questionnaires features, describes the dynamic programming method for optimizing this class of questionnaires, and also provides examples of the questionnaires implementation in automation and remote control systems in railway transport.

detection and identification, discrete search, questionnaire, form, questionnaire optimization, discrete system technical diagnostics.

References

1. Arzhenenko A. Yu., Vestyak V. A. (2012) Discrete search. Theory of questionnaires. [Diskretnyj poisk. Teoriya voprosnikov], Moscow: Publishing House of Moscow Aviation Institute [Izdatel'stvo MAI], 2012. – 159 p.
2. Mikoni S. V. (2015) Theory of management decision making [Teoriya prinyatiya upravlencheskih reshenij], St. Petersburg: Publishing House «Lan» [Izdatel'stvo «Lan'»], 2015. – 448 p.
3. Hahanov V. Cyber Physical Computing for IoT-driven Services. – New York: Springer International Publishing AG, 2018. – 279 p. – doi: 10.1007/978-3-319-54825-8.
4. Parkhomenko P. P., Sogomonyan E. S. (1981) Fundamentals of technical diagnostics (optimization of diagnostic algorithms, hardware tools) [Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki (optimizaciya algoritmov diagnostirovaniya, apparaturnye sredstva)], Moscow: Energoatomizdat, 1981. – 320 p.
5. Picard C. F. Théorie des Questionnaires. – Paris: Gauthier-Villars, 1965. – 127 p.
6. Dubail F. Algorithmes de Questionnaires Réalisable, Optimaux an Sens se Different Criteres. – These presentee a l'Universite de Lyon. 1967. – 56 p.
7. Chesari Y. Questionnaire, Codageettris. – Institute Blasé Pascal, Paris, 1968. – 164 p.
8. Retolla S. Extension de l'algorithme d'Huffman à Uneclasse de Questionnaire Saves Counts. – These présentée à l'Universite de Lyon, 1969. – 64 p.
9. Parkhomenko P. P. (1969) Optimal questionnaires with unequal prices of questions [Optimal'nye voprosniki s neravnymi cenami voprosov], Reports of the USSR Academy of Sciences [Doklady AN SSSR]. – 1969. – Vol. 184. – Issue 1. – Pp. 51–54.
10. Parkhomenko P. P. (1970) Theory of questionnaires (review) [Teoriya voprosnikov (obzor)], Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika]. – 1970. – Issue 4. – Pp. 140–159.
11. Picard C. F. Graphs and Questionnaires. – Netherlands: North-Holland Publishing Company, 1980. – 431 p.
12. Land A. H., Doig A. G. An Automatic Method of Solving Discrete Programming Problems, Econometrica. – 1960. – Vol. 28. – No. 3. – Pp. 497–520.
13. Bellman R. E. Dynamic Programming. – Princeton University Press, Princeton NJ, 1957. – 392 p.
14. Arzhenenko A. Yu., Chugaev B. N. (1989) Optimal binary questionnaires [Optimal'nye binarnye voprosniki], Moscow: Energoatomizdat [Energoatomizdat], 1989. – 128 p.
15. Yarmolik V. N. (1988) Testing and diagnostics of digital computer nodes [Kontrol' i diagnostika cifrovyyh uzlov EHVM], Minsk: "Science and technology" [«Nauka i tekhnika»], 1988. – 240 p.
16. Yablonskij S. V. (1988) Some questions of reliability and control of control systems [Nekotorye voprosy nadezhnosti i kontrolya upravlyayushchih sistem], Mathematical problems of cybernetics: Vol. 1 [Matematicheskie voprosy kibernetiki: Vyp. 1] – Edition S.V. Yablonskij, Moscow: Main editors of physical and mathematical literature [Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoy literatury], 1988. – Pp. 5–25.

17. Arzhenenko A. Yu., Chugaev B. N. (1984) Compact Questionnaire Optimization [Optimizaciya kompaktnyh voprosnikov], *Electronic Modeling [Elektronnoe Modelirovaniye]*. 1984. Issue 4. – Pp. 59–64.
18. Arzhenenko A. Yu., Chugaev B. N. (1985) Optimization of transitive binary questionnaires [Optimizaciya tranzitivnyh binarnyh voprosnikov], *Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika]*. 1985. Issue 2. – Pp. 159–164.
19. Arzhenenko A. Yu., Kazakova O. G., Chugaev B. N. (1985) Optimization of binary questionnaires [Optimizaciya binarnyh voprosnikov], *Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika]*. 1985. Issue 11. – Pp. 138–144.
20. Arzhenenko A. Yu., Kazakova O. G., Neyasov V. A. (1989) Optimization of binary questionnaires containing variable price questions [Optimizaciya binarnyh voprosnikov, sodержashchih voprosy s peremennoj cenoy], *Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika]*. 1989. Issue 6. – Pp. 139–149.
21. Arzhenenko A. Yu., Bondarenko A. V. (1990) Optimization of binary questionnaires using the method of tolerant replacement [Optimizaciya binarnyh voprosnikov metodom tolerantnoj zameny], *Electronic Modeling [Elektronnoe Modelirovaniye]*. 1990. Issue 3. – Pp. 53–57.
22. Arzhenenko A. Yu., Bondarenko A. V. (1991) Algorithm for choosing the optimal structure of an inexact compact questionnaire [Algoritm vybora optimal'noj struktury neizbytochnogo kompaktnogo voprosnika], *Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika]*. 1991. Issue 5. – Pp. 163–169.
23. Arzhenenko A. Yu., Vestyak V. A. (2012) Modification of the method of tolerant rearrangements in almost uniform compact questionnaires [Modifikaciya metoda tolerantnyh perestanovok v pochti ravnomernyh kompaktnyh anketah], *Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika]*. 2012. Issue 7. – Pp. 109–118.
24. Chugaev B. N., Arzhenenko A. Yu. (2013) Optimal Identification of Random Events [Optimal'naya identifikaciya sluchajnyh sobytij], *Economics, Statistics and Informatics [Ekonomika, statistika i informatika. Vestnik UMO]*. 2013. Issue 2. – Pp. 188–190.
25. Parkhomenko P. P. (2010) Questionnaires and Organizational Hierarchies [Voprosniki i organizacionnye ierarhii], *Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika]*. 2010. Issue 6. – Pp. 163–174.
26. Efanov D. V., Khoroshev V. V., Osadchy G. V., Belyi A. A. Optimization of Conditional Diagnostics Algorithms for Railway Electric Switch Mechanism Using the Theory of Questionnaires with Failure Statistics, *Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018), Kazan, Russia, September 14-17, 2018.* – Pp. 237–245, doi: 10.1109/EWDTS.2018.8524620.
27. Duncan G. Heterogeneous Questionnaire Theory, *SIAM Journal on Applied Mathematics*. 1974. Vol. 27. Issue 1. – Pp. 59–71. DOI: 10.1137/0127005.
28. Efanov D. V., Pavlov A. N. (2012) Optimization of polyphotomous questionnaires using the root question method [Optimizaciya polihotomichnyh voprosnikov metodom korneвого voprosa], *Proceedings of Petersburg Transport University [Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya]*. 2012. Issue 4. – Pp. 125–134.
29. Sapozhnikov V. V., Efanov D. V., Pavlov A. N. (2011) Questionnaire classification [Klassifikaciya voprosnikov], *Proceedings of Rostov State Transport University [Vestnik rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya]*. 2011. Issue 4. – Pp. 128–137.
30. Gavzov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. (1994) Methods for ensuring the safety of discrete systems [Metody obespecheniya bezopasnosti diskretnyh sistem], *Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika]*. 1994. Issue 8. – Pp. 3–50.

31. Efanov D. V. (2016) Concurrent checking and monitoring of railway automation and remote control devices [Funkcional'nyj kontrol' i monitoring ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki], St.Petersburg: Publishing house of Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university [FGBOU VO PGUPS], 2016. – 171 p.
32. Belyi A. A., Karapetov E. S., Efimenko Yu. I. (2017) Structural health and geotechnical monitoring during transport objects construction and maintenance (Saint-Petersburg example), *Procedia Engineering*. Vol. 189, 2017. – Pp. 145–151. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.024.
33. Belyj A. A., Baranovskij A. A., Vorob'ev D. E., Dolinskij K. Yu., D'yachenko L. K., Osadchij G. V. (2017) Design and organisation of structural health monitoring system on high-speed railway bridge constructions [Proektirovanie i organizaciya sistemy monitoringa mostovyh sooruzhenij na vysokoskorostnyh zheleznodorozhnyh magistralyah], *Proceedings of Petersburg Transport University [Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya]*. 2017. Vol. 14. Issue2. – Pp. 211–222.
34. Efanov D. V. New Architecture of Monitoring Systems of Train Traffic Control Devices at Wayside Stations, *Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTs'2018)*, Kazan, Russia, September 14-17, 2018. – Pp. 276–280. doi: 10.1109/EWDTs.2018.8524788.
35. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Efanov D. V., Shamanov V. I. (2017) Reliability of railway automation systems, remote control and communications: Textbook [Nadezhnost' sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki, telemekhaniki i svyazi: ucheb. Posobie], Edition V. Sapozhnikova. – Moscow: «Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport» [FGBU DPO «Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte»], 2017. – 318 p.
36. Heidmann L. (2018) Smart Point Machines: Paving the Way for Predictive Maintenance, *Signal+Draht*, 2018, issue 9. – Pp. 70–75.
37. Efanov D. V. (2018) Features of the functioning of technical diagnosis and monitoring systems of railway infrastructure objects [Osobennosti funkcionirovaniya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya i monitoringa ob"ektov zheleznodorozhnoj infrastruktury], *Automation on Transport [Avtomatika na transporte]*, 2018, Vol. 4, Issue 3. – Pp. 333–354.
38. Efanov D. V., Bogdanov N. A. (2013) Monitoring of audio frequency track circuit parameters [Monitoring parametrov rel'sovyh cepej tonal'noj chastity], *Transport of the Ural [Transport Urala]*. 2013. Issue 1. – Pp. 36–42.
39. Birger I. A. (1978) Technical diagnostics [Tekhnicheskaya diagnostika]. – Moscow: Engineering [Mashinostroenie], 1978. – 240 p.
40. Shamanov V. I. (2018) Formation of information on the situation of rail lines for systems of automatic control and remote monitoring [Formirovanie informacii o sostoyanii rel'sovyh linij dlya sistem avtomaticheskogo kontrolya i udalennogo monitoringa], *Regional informatics and information security [Regional'naya informatika i informacionnaya bezopasnost']*, *Proceedings*, Issue 5. St. Petersburg: SPOISU, 2018. – Pp. 290–293.
41. Efanov D. V., Plotnikov D. G., Osadchij G. V., Horoshev V. V. (2018) Technical training as a service [Tekhnicheskoe obuchenie kak servis], *Transport of the RF [Transport Rossijskoj Federacii]*, 2018, Issue 5. – Pp. 46–49.
42. Pan D., Zheng Y., Zhang C. (2010) On Intelligent Automatic Train Control of Railway Moving Automatic Block Systems Based on Multi-Agent Systems, *Proceedings of the 29th Chinese Control Conference*, Beijing, China, 29-31 July 2010. – Pp. 4471–4476.

43. Kokurin I. M., Efanov D. V. (2019) [Tekhnologicheskie osnovy innovacionnoj sistemy avto-maticheskogo upravleniya dvizheniem poezdov], Automation, Remote Control and Communication [Avtomatika, svyaz', informatika], 2019. – № 5. – Pp. 19–23. – DOI: 10.34649/AT.2019.5.5.003.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Вл. В. Сапожниковым.
Поступила в редакцию 21.03.2019, принята к публикации 16.05.2019.*

ЕФАНОВ Дмитрий Викторович – доктор технических наук, доцент, руководитель направления систем мониторинга и диагностики ООО «ЛокоТехСигнал», профессор кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Российского университета транспорта.

e-mail: TrES-4b@yandex.ru

ХОРОШЕВ Валерий Вячеславович – аспирант, ассистент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Российского университета транспорта.

e-mail: hvv91@icloud.com

© Ефанов Д. В., Хорошев В. В., 2019

Подписано в печать с оригинал-макета 17.09.2019.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. Уч.-изд. л. 9,125.
Установочный тираж 500 экз. Заказ
Отпечатано в типографии ФГБОУ ВО ПГУПС,
190031, СПб., Московский пр., 9.