



Автоматика на транспорте

Automation on Transport

№4

Том 1

Декабрь 2015
December 2015

Учредитель

Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального
образования «Петербургский
государственный университет путей
сообщения Императора Александра I»
(ФГБОУ ВПО 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

ISSN 2412-9186

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 *О. В. Керханиди, А. А. Блюдова*
Литературное редактирование
и корректура *И. А. Шабранской*
Верстка *А. А. Стукановой*

© ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015

Founder

Federal Railway Transport Agency
Federal State Budget
Educational Institution
for Higher Professional Education
«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**

ПИ № ФС77-61375 dd. 10.04.2015 issued
by the Federal service for the monitoring
of communications, information technologies
and mass communications

ISSN 2412-9186

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
O. V. Kerkhanidi, A. A. Blyudov
Editing and proofreading
I. A. Shabranskaya
Layout *A. A. Stukanova*

© PSTU, 2015

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

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

Виктор Кустов
кандидат техн. наук,
профессор, Украинская
государственная академия
железнодорожного транспорта,
Харьков, Украина

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

Фуниан Ху
доктор наук, профессор,
Школа электротехники
педагогического университета Цзянсу,
Сюйчжоу, 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

Ефанов Дмитрий Викторович
кандидат техн. наук,
ответственный секретарь журнала
«Автоматика на транспорте»,
ПГУПС, Санкт-Петербург

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

Бестемьянов Петр Филимонович
доктор техн. наук, профессор,
МИИТ, 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

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

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

Марлей Владимир Евгеньевич
доктор техн. наук, профессор,
ГУМРФ, Санкт-Петербург

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

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

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

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

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

International editorial board

Valeriy Sapozhnikov
D. Sc., Professor, 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

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

Victor Kustov
Ph. D., Professor,
Ukrainian State Railway
Transport Academy, Kharkiv,
Ukraine

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

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

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

Editorial team

Aleksander B. Nikitin
D. Sc., Professor, deputy editor-in-chief
of «Automation on Transport», Petersburg
State Transport University, St. Petersburg

Dmitry V. Efanov
Ph. D., executive editor of
«Automation on Transport», Petersburg State
Transport University, St. Petersburg

Leonid A. Baranov
D. Sc., Professor, Moscow State University
of Railway Engineering (MIIT), Moscow

Petr F. Bestemiyarov
D. Sc., Professor, Moscow State
University of Railway Engineering
(MIIT), Moscow

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

Michael N. Vasilenko
D. Sc., Professor, Petersburg State Transport
University, St. Petersburg

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

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, Petersburg State
Transport University,
St. Petersburg

Vladimir E. Marley
D. Sc., Professor, Admiral Makarov State
University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg

Oleg A. Nasedkin
Ph. D., Associate Professor, Petersburg
State Transport University,
St. Petersburg

Sergey A. Nikischenkov
D. Sc., Professor, Samara State Transport
University, Samara

Vladimir Vl. Sapozhnikov
D. Sc., Professor, Petersburg State Transport
University, St. Petersburg

Victor I. Shamanov
D. Sc., Professor, Moscow State University
of Railway Engineering (MIIT), Moscow

Valentin A. Khodakovsky
D. Sc., Professor, Petersburg State Transport
University, St. Petersburg

СОДЕРЖАНИЕ

Системы и устройства автоматики и телемеханики

Попов П. А., Королев И. Н., Мыльников П. Д.

Основные принципы контроля корректности бортовой системы
позиционирования средствами железнодорожной автоматики. 355

Интеллектуальные системы управления

Кокурин И. М., Ковалев К. Е.

Распределение функций и зон управления между оперативным
персоналом участковых станций при проектировании
электрической централизации 367

Стандартизация и сертификация

Сивко Б. В.

Аксиоматико-базисный подход для разработки безопасных
и отказоустойчивых систем. 381

Теоретические вопросы автоматики и информатики

Ефанов Д. В., Дмитриев В. В.

Базисы двоичной логики 400

Электронное моделирование

Булавский П. Е., Марков Д. С., Соколов В. Б., Константинова Т. Ю.

Формализация алгоритмического описания систем обеспечения
жизненного цикла железнодорожной автоматики и телемеханики 418

Из истории автоматики

Никитин А. Б.

Научная школа кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»
Петербургского государственного университета путей сообщения
Императора Александра I 433

Лунал Н. В.

Развитие устройств СЦБ в период промышленного капитализма
(1861–1900 гг.). Часть 2: Развитие сигнализации 452

CONTENTS

Automation and remote control systems and devices

Popov P. A., Korolev I. N., Mylnikov P. D.

Basic principles of onboard positioning system correctness test by railway automation means 355

Intelligent control systems

Kokurin I. M., Kovalev E. K.

Functions and control zones distribution between operational personnel of the polling stations. 367

Standardization and certification

Sivko B. V.

Axiomatic-based approach for development of trustworthy and fault-tolerant systems 381

Theory of automation and informatics

Efanov D. V., Dmitriev V. V.

Binary logic bases 400

Electronic simulation

Bulavsky P. E., Markov D. S., Sokolov V. B., Konstantinova T. Yu.

Formalisation of algorithmic description of systems of railway automation and remote control life cycle provision 418

History of automation

Nikitin A. B.

Scientific school of «Automation and remote control on railways» department of Petersburg state transport university 433

Lupal N. V.

Development of signaling, centralization and blocking devices during the period of industrial capitalism (1861–1900). Part 2: Signaling development 452

Системы и устройства автоматики и телемеханики

УДК 004.052+656.25

**П. А. Попов, канд. техн. наук,
И. Н. Королев,
П. Д. Мыльников**

Центр систем управления и обеспечения безопасности движения
Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института информатизации,
автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (ОАО «НИИАС»)

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ КОНТРОЛЯ КОРРЕКТНОСТИ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ СРЕДСТВАМИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ

В статье исследуются особенности работы системы управления движением поездов по радиоканалу, связанные с обработкой информации от традиционных систем железнодорожной автоматики и телемеханики, и данных от бортового оборудования локомотивов. Существующие системы железнодорожной автоматики и телемеханики позволяют контролировать движение поезда дискретно, по занятию рельсовых цепей. Современные системы управления работают на принципах координатного регулирования с передачей информации с помощью цифрового радиоканала и используют более точную информацию о местоположении поезда, вычисленную бортовой навигационной системой. Однако вероятность ошибочного определения местоположения бортовым оборудованием локомотива не учитывается требованиями, предъявляемыми к системам железнодорожной автоматики и телемеханики. Поэтому в статье предлагается метод совместной обработки информации о состоянии рельсовых цепей от локомотивов и от традиционных систем автоматики. Сравнивается информация о реальном местоположении поезда и информация, поступающая в центр радиоблокировки о занятости и свободности рельсовых цепей с оценкой времени задержки поступления данных. Описан процесс вычисления координат бортовым оборудованием и передачи его в центр радиоблокировки. Сопоставление двух источников информации в центре радиоблокировки с учетом задержек передачи данных позволяет осуществлять контроль работы бортовой системы позиционирования при проходе границы рельсовых цепей, что в дальнейшем дает возможность гарантировать работоспособность средств навигации на борту. Кроме того, данный способ позволяет оценить длину состава, что необходимо для расчета времени срабатывания тормозной пневматической системы. Результаты данной работы позволяют на практике обеспечить реализацию и надежное функционирование координатной системы интервального регулирования движения поездов.

система интервального регулирования, центр радиоблокировки, рельсовая цепь, цифровой радиоканал, спутниковая навигация, координаты, бортовое оборудование локомотива, ERTMS/ETCS

Введение

Современные системы интервального регулирования в качестве основного средства для передачи данных между бортовым и стационарным оборудованием используют цифровой радиоканал. Наличие двунаправленного канала для обмена данными позволяет реализовать функции управления, недоступные ранее. Перспективным направлением развития является переход к координатному регулированию движения поездов, при котором расчет кривых торможения осуществляется на основе текущего положения поезда. Такой подход требует наличия надежной и достаточно точной бортовой системы позиционирования. В Европейской системе ERTMS/ETCS в качестве системы позиционирования используются одометры (датчики путевой скорости) и евробализы – точечные метки [1–2]. В документе [3] устанавливаются требования к точности работы системы навигации, где погрешность определения евробализы не должна превышать ± 5 м, а погрешность одометров не должна превышать $\pm 5\%$ от пройденного пути. Сообщение о местоположении содержит текущую координату и доверительный интервал, связанный с погрешностью вычисления позиции. В алгоритмах интервального регулирования используется координата с учетом максимального доверительного интервала.

Отечественные бортовые системы позиционирования устройств безопасности КЛУБ-У, БЛОК основаны на комплексировании спутниковой навигации и датчиков путевой скорости одометров. В настоящее время они демонстрируют точность в пределах нескольких метров. К сожалению, спутниковая навигация не обладает достаточной надежностью и безошибочностью, что не позволяет перейти к использованию координатной системы управления движением. Хорошо известен случай, произошедший 2 апреля 2014 г., когда все 24 спутника системы ГЛОНАСС выдавали некорректные данные. В мире проводится множество научно-исследовательских работ по реализации системы управления движением на основе спутниковой навигации. Наиболее известными проектами являются SATLOC [4], GRAIL [5], 3INSAT [6] и LOCOPROL [7]. К сожалению, сегодня ни один из этих проектов не получил дальнейшего развития и внедрения в эксплуатацию.

Данная работа посвящена комплексированию бортовых навигационных данных и информации о состоянии рельсовых цепей (РЦ) при их совместной обработке в центре радиоблокировки (ЦРБ).

1 Общие принципы поступления информации в центр радиоблокировки

Принципом работы системы интервального регулирования движения поездов на основе цифрового радиоканала [8] является получение информации

от устройств железнодорожной автоматики и телемеханики, прием данных от бортовых устройств, их обработка и формирование ответственных команд для подвижного состава. Основным объектом при такой схеме управления является ЦРБ, имеющий всю доступную и полную информацию. Схема информационных потоков данных показана на рис. 1.

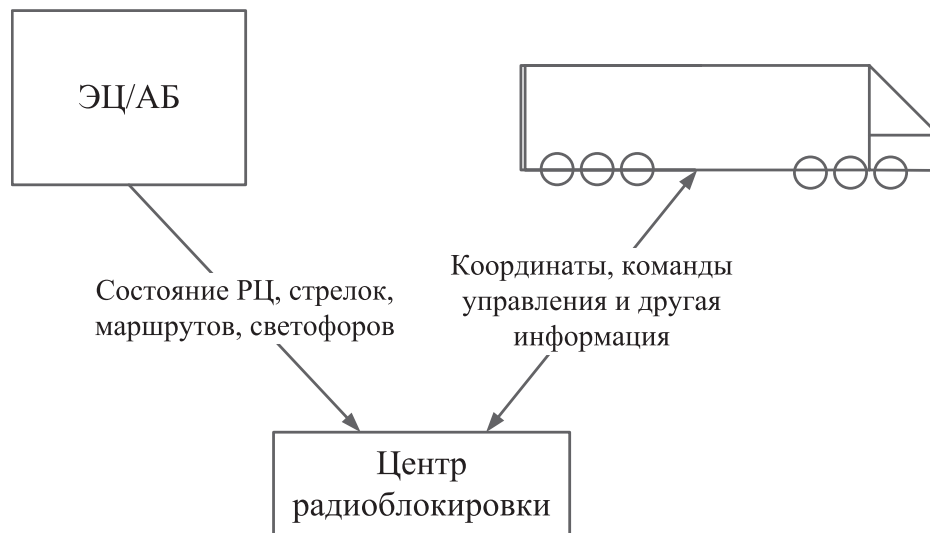


Рис. 1. Схема потоков данных

Задача ЦРБ – правильно обработать получаемые данные, часть из которых должна соответствовать друг другу. В общем случае координаты поезда с учетом его длины должны соответствовать занятости РЦ под ним. Информация в ЦРБ поступает дискретно и с задержкой относительно реальной ситуации. Эти особенности важно и необходимо учитывать при обработке поступающих данных. В статье [9] описаны ошибки, которые могут возникнуть в случае пренебрежения задержками поступления информации в ЦРБ.

2 Особенности поступления информации о состоянии рельсовых цепей в центр радиоблокировки

Информация о занятости РЦ поступает в ЦРБ с задержкой с момента прохождения головой поезда границы РЦ (рис. 2). Данная задержка обусловлена временем размыкания реле, временем обработки сигнала в аппаратуре ЭЦ или АБ, временем передачи в ЦРБ и (в зависимости от системы ЭЦ или АБ) составляет от 4 до 7 секунд.

Фактически ЦРБ получает информацию о занятости в точке A , которая находится на расстоянии $V_{п} \cdot T_3$ от границы РЦ ($T_{п}$ – скорость поезда). Освобождение рельсовой цепи происходит, когда хвост поезда находится в точке B на расстоянии $V_{п} \cdot T_0$ от границы РЦ.

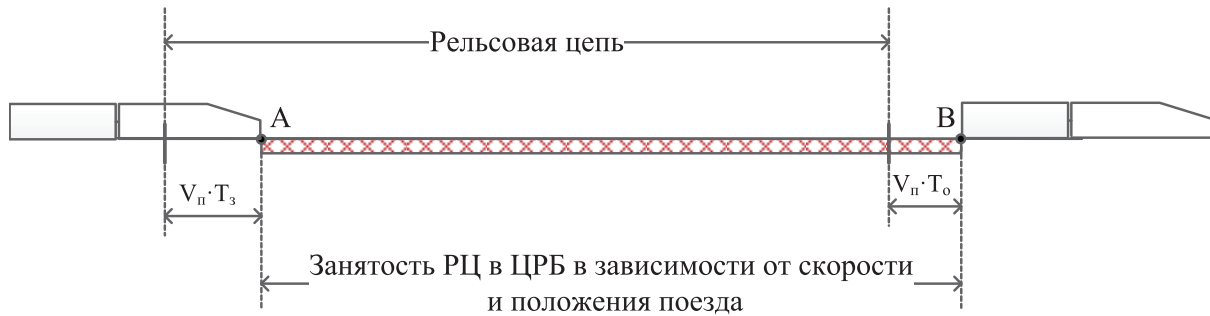


Рис. 2. Восприятие информации о состоянии рельсовой цепи

Время T_3 имеет как постоянную составляющую, так и случайную. Постоянная составляющая зависит от задержек срабатывания реле при размыкании контактов и времени передачи информации. Случайная составляющая основана на том, что цифровая аппаратура (УВК) работает циклически и опрашивает реле одновременно за цикл работы, который обычно составляет 500 или 1000 мс. Случайная составляющая в рамках одного устройства обработки распределена по равномерному закону и зависит от того, как близки мы к моменту опроса. При наличии в цепи передачи данных нескольких устройств можно грубо предположить, что время T_3 распределено по нормальному закону (в соответствии с теоремой Ляпунова). Практически время T_3 будет находиться в диапазоне 4–7 секунд в зависимости от используемого оборудования и количества звеньев в сети передачи данных. В дальнейшем в алгоритмах будет использоваться в качестве T_3 максимально возможное время задержки поступления информации о занятии РЦ, принимаемое за 7 секунд.

Время T_0 сопоставимо со временем T_3 и отличается лишь тем, что при освождении РЦ учитывается время замыкания контактов реле. При использовании аппаратуры цифровых РЦ задержки T_0 , T_3 также будут отмечаться, поскольку обусловлены временем фильтрации и цифровой обработки сигналов.

При использовании РЦ с изостыками границей считаются координаты изостыка. При использовании тональных РЦ необходимо учитывать плавающую зону дополнительного шунтирования при определении границ РЦ, которая зависит от таких факторов, как частота сигнального тока, коэффициент перегрузки на входе путевого приемника, сопротивление изоляции балласта. Считается, что длина зоны дополнительного шунтирования составляет примерно 10% от длины самой РЦ [10]. При проектировании принято выносить точку подключения аппаратуры ТРЦ по направлению движения за светофор на 40 м во избежание влияния зоны дополнительного шунтирования и перекрытия светофора перед поездом. В [11] приводится зависимость длины зоны дополнительного шунтирования от частоты тональной РЦ и других параметров. В дальнейшем в алгоритмах зона дополнительного шунтирования учитывается в виде 10% от длины РЦ, но не более 40 м. Особенность плавающей зоны дополнительного шунтирования важно учитывать в алгоритмах контроля занятия РЦ.

Данные в ЦРБ от устройств ЭЦ/АБ передаются циклически по проводным каналам связи, что позволяет реализовать достаточно малый период в размере одной секунды. На рис. 2 и последующих состоянии занятости РЦ показывается сплошным заштрихованным прямоугольником.

3 Особенности поступления координат от бортового оборудования

Бортовая навигационная система вычисляет свое местоположение каждые 500 мс, основываясь на данных спутниковой навигационной системы и путевых датчиков скорости. Первоначально местоположение определяется на основе спутниковой навигации. В процессе движения координаты определяются на основе комплексирования данных. Получение данных и их обработка на борту занимают один цикл, что составляет 500 мс. В ЦРБ координаты с сообщением о местоположении поступают циклически, с периодом 5 секунд. В соответствии с требованиями к системе связи в документе [12] максимальная задержка при передаче данных не должна превышать 500 мс в 99% случаев. Около 500 мс требуется на получение и обработку данных в ЦРБ. В среднем задержка получения данных от реального положения локомотива составляет 1,5 секунды.



Рис. 3. Представление координат в центре радиоблокировки

На рис. 3 показано дискретное получение координат в ЦРБ, где незакрашенной точкой показано полученное местоположение, а закрашенной точкой – реальное положение локомотива в момент получения данных с учетом задержки передачи в размере $T_{\text{п}} = 1,5$ с. Скобками вокруг каждой незакрашенной точки показан доверительный интервал, где может находиться голова поезда. Доверительный интервал рассчитывается на основе информации о погрешностях (среднеквадратичном отклонении) спутниковой навигации и погрешностях датчиков путевой скорости. Доверительный интервал в процессе следования не статичен и может изменяться. К примеру, на рис. 3 для сообщения k показан больший доверительный интервал. Доверительный интервал будет увеличиваться при большом значении среднеквадратичного отклонения спутниковой навигации или при движении в тоннеле, когда положение вычисляется на основе датчиков путевой скорости.

4 Обработка данных в центре радиоблокировки

В ЦРБ ведется обработка данных от двух источников. Каждой координате, полученной от бортового устройства, ставится в соответствие РЦ, где находится голова поезда. После этого проверяется состояние РЦ. Большую часть времени она должна находиться в состоянии занятости. Однако после прохода границы РЦ возможна ситуация, когда координата поезда попадает на РЦ в состоянии свободности. При нормальной работе это происходит из-за задержки получения информации о состоянии РЦ в центре радиоблокировки.

Занятость РЦ при прохождении поездом ее границы отчасти позволяет контролировать местоположение поезда и соответственно корректность работы бортовой системы позиционирования. На рис. 4 показан один из возможных вариантов получения данных в ЦРБ.



Рис. 4. Представление координат в центре радиоблокировки с учетом скорости и положения поезда

Координата поезда находится между координатами границ новой РЦ. В этот момент в ЦРБ данная РЦ считается свободной из-за задержки поступления данных о занятии. В то же время известно, что информация о занятости РЦ должна поступить спустя время $T_з$, соответствующее нахождению головы поезда в точке А. На основании информации о скорости поезда, поступившей с сообщением 2, можно оценить момент времени поступления информации о занятии РЦ. Расстояние от границы РЦ до точки 2 обозначим L , тогда время, прошедшее с момента пересечения границы РЦ, $t = \frac{L}{v_п} + T_п$. С учетом максимально возможной задержки времени поступления информации о занятии РЦ $T_з$ с момента получения сообщения 2 занятость РЦ должна наступить спустя время $(T_з - t)$. Отсутствие занятия РЦ может свидетельствовать либо о проблемах с РЦ и возникновении ложной свободности, что маловероятно, либо об ошибке бортовой системы позиционирования.

Основными событиями, информация о которых обрабатывается в ЦРБ при проследовании поездом границы РЦ, являются занятие следующей по ходу

движения РЦ и получение координаты, находящейся на следующей РЦ. Ряд факторов, влияющих на указанные события, носит случайный характер и зависит:

- от задержки поступления информации о координате, соответствующей новой РЦ;
- положения координаты в границах доверительного интервала (фактически погрешности бортовой системы позиционирования);
- задержки поступления информации о занятии новой РЦ;
- плавающей границы тональной РЦ.

Пусть $t_{\text{борт}}$ – время поступления сообщения от бортового оборудования с координатой, находящейся на новой РЦ; $t_{\text{РЦ}}$ – время поступления информации о занятии новой РЦ по ходу движения поезда. Два эти события должен разделять небольшой промежуток времени, который можно оценить. Рассчитаем максимально возможное время между этими событиями в соответствии с рис. 5.



Рис. 5. Расчет времени $t_{\text{РЦ}} - t_{\text{борт}}$

При поступлении сообщения 2 координата находится на новой РЦ, однако доверительный интервал заходит на предыдущую РЦ и реальное положение головы поезда – на предыдущей РЦ, поэтому фактически занятия новой РЦ не произошло. Это означает, что оценку необходимо давать по координате поезда с учетом вычета доверительного интервала, т. е. как только левая оценка положения головы поезда пересечет границу РЦ. (Под левой оценкой подразумевается координата локомотива за вычетом доверительного интервала – погрешности определения координат.) Для тональных РЦ необходимо учитывать координату границ РЦ с учетом минимально возможной зоны дополнительного шунтирования. С этого момента, спустя время T_3 , должна поступить информация о занятии следующей РЦ. В случае отсутствия сведений о занятости ЦРБ должен рассматривать данную ситуацию как сбой бортовой системы позиционирования и перевести систему в защитное состояние, что в большинстве случаев будет означать переход на работу по каналу АЛС (при его наличии).

В ряде случаев, с учетом цикличности поступления координат с периодом 5–6 секунд, возможна ситуация, когда информация о занятии следующей РЦ

поступит раньше, чем бортовое оборудование пришлет сообщение о координате, соответствующей данной РЦ. Такая ситуация показана на рис. 6.

Координата в сообщении 2 совпадает с концом предыдущей РЦ, сообщение 3 о координате поступит через 5 секунд, а занятость следующей РЦ может наступить через 4–5 секунд. При такой ситуации в системе ERTMS/ETCS ЦРБ не знает, наступила занятость из-за движения контролируемого поезда или, к примеру, из-за излома РЦ, и посылает сообщение об условной экстренной остановке с координатой, соответствующей границам РЦ. Бортовое оборудование игнорирует данное сообщение, если поезд прошел границу РЦ, и применяет экстренное торможение в ином случае.

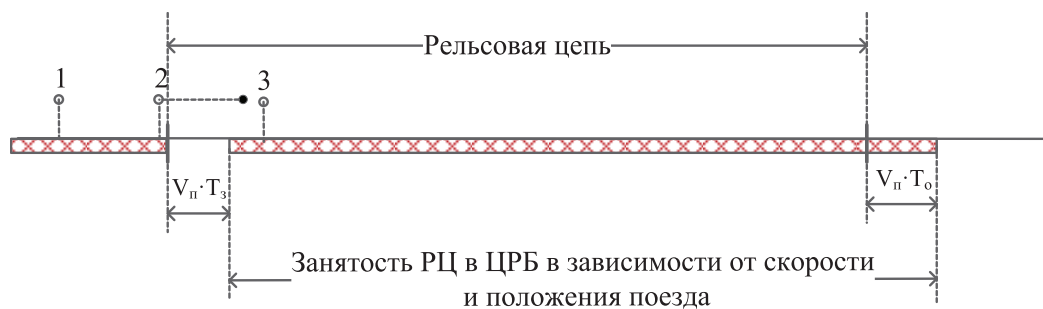


Рис. 6. Иллюстрация занятия РЦ при отсутствии сообщения о координате

Альтернативным вариантом работы является расчет в ЦРБ возможного положения поезда на момент прихода информации о занятии РЦ.

Пусть от момента поступления сообщения 2 до момента прихода информации о занятии РЦ прошло время t , скорость поезда $V_{п}$, доверительный интервал ΔS , тогда поезд может находиться на расстоянии $(V_{п}t + \Delta S)$ от координаты, полученной в сообщении 2. Если рассчитанная новая точка находится на новой РЦ, то работа продолжается в нормальном режиме.

5 Оценка длины поезда по состоянию РЦ

Длина поезда играет важную роль при расчете кривых торможения в европейской системе управления движением. В ERTMS/ETCS машинист перед поездкой должен ввести длину поезда, измеряемую в метрах, вручную. Эти данные влияют на безопасность движения, поэтому при вводе их машинистом крайне высока вероятность ошибки. В отечественных устройствах безопасности КЛУБ-У, БЛОК машинист вводит количество вагонов и количество осей, на основе которых вычисляется длина поезда. Однако полученные данные не используются для расчета кривой торможения из-за соображений безопасности и всегда берется поезд с наихудшими допустимыми тормозными характеристиками, движущийся под уклон и обладающий наибольшей длиной, выраженной в количестве осей.

Оценку длины поезда можно дать, сопоставив момент освобождения РЦ и координату головы поезда при получении информации об этом от бортового оборудования. Для компенсации разницы между моментом освобождения РЦ и получением координаты от бортового оборудования необходимо ввести поправку как разницу во времени между этими событиями с учетом времени задержек, умноженную на скорость поезда. Длина поезда оценивается как разность между координатой границы РЦ и уточненной координатой бортового оборудования.

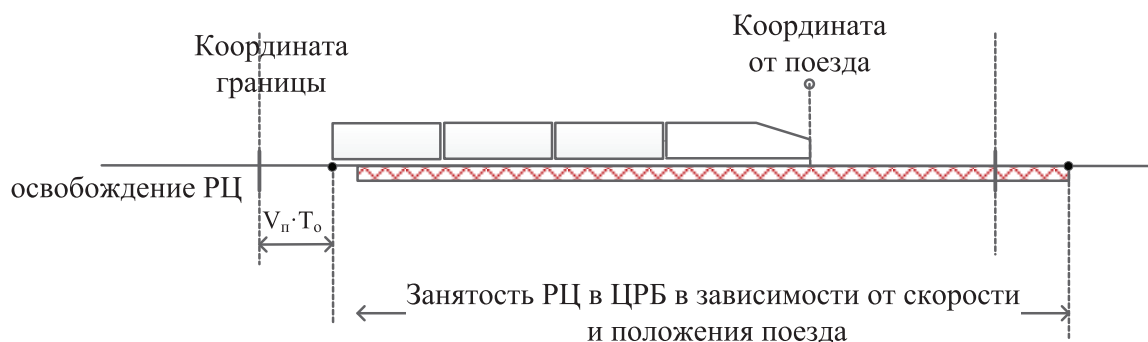


Рис. 7. Оценка длины поезда по освобождению РЦ

Данная оценка является весьма грубой, но ее можно уточнить, измерив длину поезда при освобождении каждой РЦ и выполнив статистическую обработку результатов измерений.

Заключение

Комплексирование данных от нескольких источников различной физической природы в ЦРБ позволяет реализовать функциональность систем ЖАТ, которая ранее была невозможна из-за ошибок бортовой системы позиционирования. Такое решение позволяет заблаговременно обнаружить ошибки координатной системы интервального регулирования, влияющие на безопасность движения поездов. В случае нахождения несоответствия между навигационными данными бортовой системы позиционирования и информации о занятии и освобождении РЦ предлагается перевести систему в защитное состояние, соответствующее движению по сигналам автоматической локомотивной сигнализации с уменьшенной скоростью. Следует отметить, что предложенный способ оценки ошибки позиционирования «работает» в пределах «окна», размер которого зависит от используемых аппаратных средств. Погрешность оценки местоположения поезда на основе прохода границ РЦ должна учитываться как одно из слагаемых длины защитного участка.

Предложенное в статье решение позволит обеспечить безошибочность работы системы координатного регулирования и управления движения поездов

по радиоканалу и в то же время избежать внедрения дорогостоящих евробализ [1], используемых в европейской системе управления ERTMS/ETCS для системы позиционирования.

Внедрение координатных систем интервального регулирования движения поездов позволяет получить преимущества по пропускной способности, по точности прицельного торможения.

Библиографический список

1. Попов П. А. Подсистема евробализов. Техническое описание / П. А. Попов, А. С. Адагуров // Автоматика, связь, информатика. – 2010. – № 9. – С. 14–15.
2. ERTMS, Subset-036//FFFIS for Eurobalise. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.era.europa.eu/Document-Register/Documents/Set-2-Index009-SUBSET-036%20v300.pdf>.
3. ERTMS, Subset-041 // Performance Requirements for Interoperability [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.era.europa.eu/Document-Register/Documents/Set-2-Index014-SUBSET-041%20v310.pdf>.
4. Barbu G. SATLOC – GNSS based train protection for low traffic lines / G. Barbu, G. Hanis, F. Kaiser, B. Stadlman // SIGNAL+DRAHT. – 2014. – Issue 4. – Pp. 49–53.
5. GRAIL project // GNSS-based railway application [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://grail2.ineco.es/Grail2/html/main.jsp>.
6. 3INSAT – Train integrated safety satellite system [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://artes-apps.esa.int/projects/3insat>.
7. Rousseau M. The LOCOPROL project (Low Cost satellite based train location system for signaling and train PROtection for low density railway Lines) / M. Rousseau, D. Cadet // Alstom Transport France Technical Directorate [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.uic.org/cdrom/2006/wcrr2006/pdf/799.pdf>.
8. Попов П. А. Системы управления движением по радиоканалу / П. А. Попов, И. Н. Королев // Автоматика, связь, информатика. – 2012. – № 5. – С. 17–18.
9. Kresse M. Systematic handling of transmission and computation delays at RBC interfaces / M. Kresse, D. Skutsch, K. Kmietsch // SIGNAL+DRAHT. – 2015. – Issue 3. – Pp. 24–28.
10. Воронин В. А. Техническое обслуживание тональных рельсовых цепей : учеб. пособие / В. А. Воронин, В. А. Коляда, Б. Г. Цукерман. – М. : ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2007. – 93 с.
11. Дмитриев В. С. Системы автоблокировки с рельсовыми цепями тональной частоты / В. С. Дмитриев, В. А. Минин. – М. : Транспорт, 1992. – 182 с.
12. ERTMS, Subset-093 // GSM-R Interfaces Class 1 Requirements [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.era.europa.eu/Document-Register/Pages/SUBSET-093.aspx>.

*Popov Pavel A.,
Korolev Ivan N.,
Mylnikov Pavel D.*

Center of traffic control and safety ensuring systems
Research and design institute for information technology,
signaling and telecommunications on railway transport

Basic principles of onboard positioning system correctness test by railway automation means

The article describes radio channel based train traffic control system features related to the processing of data from traditional signaling systems and cab equipment. Existing railway automation and remote control systems allow to check train position discretely by track circuit occupation. Modern control systems are based on coordinate regulation principles with data transmission by digital radio channel and use more accurate data about train position processed by onboard navigation system.

However the probability of wrong positioning exceeds the requirements to railway automation systems. Therefore the method of mutual processing of data from cab and traditional automation systems about track circuits condition is offered in the paper. The analysis of correspondence of real train position and data about track circuit occupation received in radio block system center with estimation of data receiving delays was conducted. The process of coordinates calculation and transmission to radio block system center by cab equipment is described. Comparison of two data sources in radio block system center considering data transmission delays allows to check onboard positioning system at the moments of track circuit borders passage and ensure onboard navigation system operability. Moreover this method allows to estimate train length that is necessary to calculate the time to pneumatic brake system operation. Results of this research allow to ensure the implementation and reliable operation of coordinate interval train traffic control system.

interval train traffic control system, radio block system center, track circuit, digital radio channel, satellite navigation, coordinates, onboard cab equipment, ERTMS/ETCS

Reference

1. Popov P.A., Adadurov A. S. Eurobalise subsystem. Technical description. Automatics, Communication, Informatics, 2010, № 9, pp. 14–15.
2. ERTMS, Subset-036. FFFIS for Eurobalise. Access mode : <http://www.era.europa.eu/Document-Register/Documents/Set-2-Index009-SUBSET-036%20v300.pdf>.
3. ERTMS, Subset-041. Performance Requirements for Interoperability. Access mode : <http://www.era.europa.eu/Document-Register/Documents/Set-2-Index014-SUBSET-041%20v310.pdf>.
4. Barbu G., Hanis G., Kaiser F., Stadlman B. SATLOC – GNSS based train protection for low traffic lines. SIGNAL+DRAHT, 2014, Issue 4, pp. 49–53.
5. GRAIL project // GNSS-based railway application. Access mode : <http://grail2.ineco.es/Grail2/html/main.jsp>.

6. 3INSAT – Train integrated safety satellite system. Access mode : <https://artes-apps.esa.int/projects/3insat>.
7. Rousseau M., Cadet D. The LOCOPROL project (Low Cost satellite based train location system for signaling and train PROtection for low density railway Lines). Alstom Transport France Technical Directorate. Access mode : <http://www.uic.org/cdrom/2006/wcrr2006/pdf/799.pdf>.
8. Popov P.A., Korolev I.N. Radio channel traffic control systems. Automatics, Communication, Informatics, 2012, № 5, pp.17–18.
9. Kresse M., Skutsch D., Kmietsch K. Systematic handling of transmission and computation delays at RBC interfaces. SIGNAL+DRAHT, 2015, Issue 3, pp. 24–28.
10. Voronin V.A., Kolyada V.A., Tsukerman B.G. Maintenance of audio frequency track circuits : Tutorial. Moscow, GOU «Training center for railway transport education», 2007, 93 p.
11. Dmitriev V.S., Minin V.A. Automatic line block systems based on audio frequency track circuits. Moscow, Transport, 1992, 182 p.
12. ERTMS, Subset-093. GSM-R Interfaces Class 1 Requirements. Access mode : <http://www.era.europa.eu/Document-Register/Pages/SUBSET-093.aspx>.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии А. Б. Никитиным.
Поступила в редакцию 10.09.2015, принята к публикации 28.09.2015.*

ПОПОВ Павел Александрович – кандидат технических наук, руководитель Центра систем управления и обеспечения безопасности движения Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (ОАО «НИИАС»).

e-mail: p.porov@vniias.ru

КОРОЛЕВ Иван Николаевич – начальник сектора Центра систем управления и обеспечения безопасности движения Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (ОАО «НИИАС»).

e-mail: i.korolev@vniias.ru

МЫЛЬНИКОВ Павел Дмитриевич – начальник сектора Центра систем управления и обеспечения безопасности движения Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (ОАО «НИИАС»).

e-mail: p.mylnikov@vniias.ru

© Попов П. А., Королев И. Н., Мыльников П. Д., 2015

Интеллектуальные системы управления

УДК 656.211:658

И. М. Кокурин, д-р техн. наук

ФГБУН «Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко
Российской академии наук»

К. Е. Ковалев

Кафедра «Управление эксплуатационной работой»,
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИЙ И ЗОН УПРАВЛЕНИЯ МЕЖДУ ОПЕРАТИВНЫМ ПЕРСОНАЛОМ УЧАСТКОВЫХ СТАНЦИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕНТРАЛИЗАЦИИ

Введение должности второго (третьего) дежурного по крупной участковой станции при проектировании ЭЦ вызывает необходимость обеспечения их средствами контроля и управления объектами централизации, для чего требуется определять границы управляемых зон. Отсутствие соответствующей методики приводит к принятию не лучших проектных решений по организации рабочих мест дежурных по станциям, которые практически не заменяют после реализации проекта ЭЦ. Это создает неравномерную загруженность и затруднения в работе дежурных по станциям, влечет за собой неправильные решения и ошибочные действия. В данной статье предлагается метод комплексной оценки вариантов распределения функций и зон управления между оперативным персоналом участковых станций по набору количественных критериев, «вес» которых определяется по величине разности максимальных и минимальных значений каждого из них.

участковые станции, электрическая централизация, функции и зоны управления, оперативный персонал, распределение зон и функций управления, критерии оценки вариантов распределения, количественный способ оценки «веса» критерия, комплексный критерий оценки вариантов

Введение

Нормы технологического проектирования [1] содержат расчет загрузки только одного дежурного по станции. Инструкция [2] позволяет рассчитать загрузку одного дежурного по станции и в случае превышения допустимой нормы реко-

мендует введение должности второго (третьего) дежурного, но не содержит методику определения затрат времени на согласование их действий, что исключает возможность распределения зон управления. В работах [3–5] распределять зоны управления между дежурными по сортировочным и крупным пассажирским станциям предлагалось только по условию неперевышения допустимой загрузки. В работах [6, 7] предложен количественный критерий оценки суммарной сложности деятельности железнодорожного оперативного персонала, уменьшение которого способствует сокращению не лучших и ошибочных решений по управлению движением. Этих двух критериев для оценки условий работы дежурных по станциям недостаточно. Кроме того, остается нерешенной задача комплексной оценки вариантов распределения функций и зон управления между оперативным персоналом по необходимому набору критериев в процессе проектирования ЭЦ.

Зарубежный опыт снижения загрузки и совершенствования работы оперативного персонала железнодорожных станций направлен на широкое внедрение автоматизированных систем управления с целью повышения эффективности работы станций и снижения ошибок, связанных с человеческим фактором.

Согласно японскому опыту, необходима автоматизация функций управления передвижениями, включая контроль положений стрелок, показаний светофоров, расположения подвижных единиц с указанием их номеров. Автоматизированные системы управления крупными станциями Centralized traffic control (CTC), Integrated services digital network (INS), ID-ATC system, Automatic Train Control (ATC) [8] обеспечивают: ускорение принятия решений и установку маршрутов; автоматизацию создания условий для восстановления движения поездов по расписанию. Испытания показали, что эффективность работы интеллектуальных систем на 30÷32 % ниже, чем у оперативного персонала, поскольку системы не в состоянии учесть все факторы, оказывающие влияние на движение поездов.

В США считают необходимым создание автоматизированных систем различного назначения: Automatic train protection (ATP), предназначенной для регулирования движения поездов на перегонах; Automatic train control 2 (ATC or ATO), предназначенной для обеспечения безопасности передвижений по станциям; Automatic train supervision (ATS) – системы диспетчерского управления на основе систем диспетчерской централизации.

Испытания указанных систем показали, что наработка на отказ составляет всего 109 часов, это потребовало дублирования рабочих мест оперативного персонала. Поэтому на железнодорожных станциях США оборудуются три рабочих места дежурного по станции (основное, дублирующее и резервное) и каждые 6 часов необходимо переходить на другое рабочее место [9, 10].

На железных дорогах Англии широкое распространение получила система Westinghouse Rail Systems, в которой на языке программирования записана релейная логика и булевы функции, что позволило отказаться от громоздкой

маршрутно-релейной централизации и перейти на программное управление работой станции [11].

Оперативно-диспетчерский персонал был и остается основным звеном управления. Попытки полностью автоматизировать перевозочный процесс доказали, что человек работает эффективнее. Поэтому автоматизация должна быть направлена на предоставление достоверной и своевременной оперативной информации о выполняемых операциях в удобной и легко воспринимаемой форме.

1 Метод алгоритмического описания функций управления

Решение задачи достигается на основе методики алгоритмического описания функций управления, с использованием модифицированного языка логической структуры алгоритмов (ЛСА) [12, 13], реализуемых дежурными по участковым станциям [14–17]. Методика позволяет рассчитывать загруженность персонала и общую сложность алгоритмов. В дополнение к известным предлагаются следующие критерии оценки вариантов распределения функций и зон управления: количество устанавливаемых маршрутов и дополнительных транзитных грузовых поездов за смену, доводящих загруженность дежурного до нормы, месячный фонд заработной платы операционного персонала смены.

На основе алгоритмического описания функций управления определяются затраты времени дежурного по станции на выполнение каждой r -й функции управления t_{ovr} по формуле:

$$t_{ovr} = \sum_{i=1}^m t_{oi} + \sum_{j=1}^n t_{oj} q_j + \sum_{k=1}^n t_{ok} (1 - q_j), \forall v, r,$$

где t_{oi} – затраты времени на безусловное выполнение i -го блока операторов алгоритма; m – количество безусловно выполняемых блоков операторов в алгоритме r -й функции управления; t_{oj} – затраты времени на выполнение j -го блока операторов при условии q_j в алгоритме r -й функции управления; n – количества j -х и k -х блоков операторов в алгоритме r -й функции управления; t_{ok} – затраты времени на выполнение k -го блока операторов при условии $1 - q_j$ в алгоритме r -й функции управления; v – наблюдение затрат времени на выполнение каждого оператора алгоритма r -й функции управления.

Оценка математического ожидания $\hat{E} t_{ovr}$ затрат рабочего времени на выполнение r -й функции управления определяется выражением:

$$\hat{E} t_{ovr} \approx \frac{1}{w} \sum_{v=1}^w t_{ovr}, \forall r,$$

где w – количество наблюдений затрат времени на выполнение каждого оператора алгоритма и соблюдения логического условия r -й функции управления.

В соответствии с законом больших чисел (теорема Чебышева) [18] при увеличении количества наблюдений случайной величины затрат времени на выполнение r -й функции управления их среднее арифметическое $\frac{1}{w} \sum_{w=1}^w t_{ovr}$ сходится по вероятности к математическому ожиданию Et_{ovr} :

$$P\left(\left|\frac{1}{w} \sum_{w=1}^w t_{ovr} - Et_{ovr}\right| < \varepsilon\right) > 1 - \delta \text{ при } w \rightarrow \infty,$$

где ε, δ – сколь угодно малые положительные числа.

Следовательно, оценку математического ожидания \hat{Et}_{ovr} следует использовать как детерминированную величину.

Результаты оценок математических ожиданий затрат рабочего времени на выполнение всех функций управления составляют основу для определения загрузки оперативного работника участковой станции за смену. Загрузку оперативного персонала, рассчитанную на основе алгоритмического описания функций управления, с целью сокращения описания, предлагается называть загруженностью и рассчитывать по формуле:

$$T_3 = \sum_{r=1}^s \hat{Et}_{ovr} n_r,$$

где \hat{Et}_{ovr} – оценка математического ожидания затрат рабочего времени на выполнение r -й функции управления; n_r – количество функций r -го типа, выполняемых за смену, $\forall r$; s – количество типов функций управления, выполняемых оперативным работником за смену.

Рекомендуемое значение загрузки составляет 576 мин, допустимое значение – 675 мин [2].

2 Оценка вариантов распределения функций и зон управления между оперативным персоналом участковых станций

Алгоритмическое описание функций управления позволяет рассчитывать и использовать в качестве критерия оценки вариантов распределения функций и зон управления показатель общей сложности алгоритма каждой функции S_0 [6]:

$$S_0 = \frac{V_a Z}{L},$$

где V_a – напряженность выполнения алгоритма; Z – стереотипность алгоритма; L – логическая сложность алгоритма.

Напряженность выполнения алгоритма рассчитывается по формуле:

$$V_a = \frac{K + m}{\tau},$$

где K , m – количества операторов K и логических условий m в алгоритме; τ – затраты времени на выполнение алгоритма.

Стереотипность рассчитывается по формуле:

$$Z = \sum_{i=1}^l P_i^{(0)} X_i^{(0)},$$

где $X_i^{(0)}$ – число последовательно выполняемых операторов в i -й группе без логических условий и переходов; $P_i^{(0)}$ – вероятность выполнения i -й группы; l – количество групп операторов в алгоритме.

Логическая сложность для рассматриваемых алгоритмов $L = m$.

Общая сложность деятельности работников смены S_{0k} равна сумме общих сложностей выполнения алгоритмов их функций управления:

$$S_{0ck} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m S_{0ijk}, \forall k,$$

где m – количество функций управления i -го оперативного работника смены; n – количество оперативных работников в смене; k – вариант распределения функций и зон управления.

Количество маршрутов, устанавливаемых за смену, определяется количеством передвижений по формуле:

$$n_{\text{общ}} = n_{\text{пас}} + n_{\text{приг}} + n_{\text{тр.гр}} + n_{\text{расф}} + n_{\text{форм}} + n_{\text{пв}} + n_{\text{пр}},$$

где $n_{\text{пас}}$, $n_{\text{приг}}$, $n_{\text{тр.гр}}$, $n_{\text{расф}}$, $n_{\text{форм}}$, $n_{\text{пв}}$, $n_{\text{пр}}$ – количество передвижений за смену соответственно пассажирских, пригородных, транзитных грузовых, расформировываемых и формируемых поездов, а также подач вагонов на пути необщего пользования и прочих передвижений.

При загруженности дежурного по станции $T_{3.ф}^{\text{max}}$ менее нормы $T_{3н}$ количество дополнительных поездов $N_{\text{д}}$, которое увеличит загруженность до нормы, определяется по формуле:

$$N_{\text{д}} = \frac{T_{3н} - T_{3.ф}^{\text{max}}}{\hat{E} t_{\text{овр}}},$$

где $\hat{E}t_{ovr}$ – оценка математического ожидания затрат времени дежурного по станции на организацию пропуска поезда; возможность увеличения количества которых за смену требуется определить.

Фонд повременно-премиальной тарифной оплаты труда оперативного персонала станции определяется по формуле:

$$\Phi ЗП = (З_{ст} + К_{пр} + К_{комп}) \cdot k_{соц.н} \text{ тыс. руб./мес.},$$

где $З_{ст}$ – почасовая тарифная ставка; $К_{пр}$ – премиальные выплаты; $К_{комп}$ – компенсационные выплаты; $k_{соц.н}$ – коэффициент отчислений на социальные нужды, равный 1,307.

Количественные значения критериев для сравнения вариантов распределения функций и зон управления, выражаемые в различных единицах измерения, необходимо представить в виде относительных величин, которые для максимизируемых критериев принимаются положительными (α_{maxij}), а для минимизируемых – отрицательными ($-\alpha_{minij}$) и определяются по формулам:

$$\alpha_{maxij} = \frac{\alpha_{ij}}{\sum_{i=1}^m \alpha_{ij}}, i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, k; \quad -\alpha_{minij} = -\frac{\alpha_{ij}}{\sum_{i=1}^m \alpha_{ij}}, i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n - k,$$

где α_{ij} – величина j -го критерия для i -го варианта распределения функций и зон управления; m – количество оцениваемых вариантов; n – количество критериев оценки вариантов; k – количество максимизируемых критериев оценки вариантов; $n - k$ – количество минимизируемых критериев оценки вариантов.

Вес относительных критериев, оценки вариантов распределения функций и зон управления, обычно определяемый на основе экспертных оценок, предлагается рассчитывать по степени его влияния на комплексную оценку по формуле:

$$\Delta_{mmij} = |\alpha_{maxij}| - |\alpha_{minij}|, \forall i, j,$$

где Δ_{mmij} – разности абсолютных значений максимальной α_{maxij} и минимальной α_{minij} величин j -го критерия для каждого i -го варианта.

Относительная величина веса критерия w_j :

$$w_j = \frac{\Delta_{mmij}}{\sum_{j=1}^n \Delta_{mmij}}.$$

Комплексные взвешенные оценки вариантов распределения функций и зон управления по всем критериям C_{wij} определяются по выражению:

$$C_{wij} = \sum_{j=1}^k w_j \alpha_{\max ij} - \sum_{j=1}^{n-k} |w_j \alpha_{\min ij}|, \forall i,$$

где k – количество максимизируемых критериев; $n - k$ – количество минимизируемых критериев.

Лучший вариант распределения функций и зон управления между дежурными по участковой станции определяется по максимальному значению комплексного критерия.

Использование комплексного критерия для оценки вариантов распределения функций и зон управления (табл. 1–4), рассматривается на примере крупной участковой станции поперечного типа при следующих размерах движения в дневную/ночную смены: пассажирских поездов 20/50; пригородных поездов 7/5; транзитных грузовых поездов без переработки 106/71; транзитных грузовых поездов с переработкой 9/9; отправляемых поездов своего формирования 7/8; принимаемых на станцию прочих подвижных единиц 6/6; пропускаемых

Таблица 1. Количественные значения критериев оценки вариантов распределения функций и зон управления между оперативным персоналом смены

Критерии оценки вариантов	Варианты распределения функций и зон управления					
	Направлен- ные улуч- шения критерия	Дежур- ный и опера- тор	Дежур- ный и по- мощник	Два де- журных при рас- преде- нии зон управ- ления по паркам станции	Два де- журных при рас- преде- нии зон управ- ления по райо- нам стан- ции	Сумма
1. Затраты рабочего времени смены, мин	min	1033,6	1083,0	1082,7	1169,3	4368,6
2. Общая сложность деятельности работников смены	min	359,7	362,6	269,4	322,8	1314,5
3. Количество маршрутов за смену	min	185	185	185	318	873
4. Количество дополнительных транзитных грузовых поездов в смену	max	25	28	19	35	107
5. Месячный фонд оплаты труда оперативного персонала смены, руб.	min	33 134,4	33 382,8	38 656,8	38 686,8	143 860,8

Таблица 2. Значения относительных критериев оценки вариантов распределения функций и зон управления

Критерии оценки вариантов	Варианты распределения функций и зон управления			
	Дежурный и оператор $\alpha_{\max i} - \alpha_{\min i}$	Дежурный и помощник $\alpha_{\max i} - \alpha_{\min i}$	Два дежурных при распределении зон управления по паркам станции $\alpha_{\max i} - \alpha_{\min i}$	Два дежурных при распределении зон управления по районам станции $\alpha_{\max i} - \alpha_{\min i}$
1. Затраты рабочего времени смены, мин	-0,24	-0,25	-0,25	-0,27
2. Общая сложность деятельности работников смены	-0,27	-0,28	-0,20	-0,25
3. Количество маршрутов за смену	-0,21	-0,21	-0,21	-0,36
4. Количество дополнительных транзитных грузовых поездов в смену	0,23	0,26	0,18	0,33
5. Месячный фонд оплаты труда оперативного персонала смены, руб.	-0,23	-0,23	-0,27	-0,27

Таблица 3. Оценки веса каждого относительного критерия

Критерии	Максимум критерия $\alpha_{\max ij}$	Минимум критерия $\alpha_{\min ij}$	Разность максимума и минимума критерия Δ_{mnj}	Вес критерия w_j
1. Затраты рабочего времени смены, мин	0,27	0,24	0,03	0,071
2. Общая сложность деятельности работников смены	0,28	0,20	0,07	0,161
3. Количество маршрутов за смену	0,36	0,21	0,15	0,346
4. Количество дополнительных транзитных грузовых поездов в смену	0,33	0,18	0,15	0,339
5. Месячный фонд оплаты труда оперативного персонала смены, руб.	0,27	0,23	0,04	0,083
Сумма величин			0,44	1,0

Таблица 4. Значения комплексного критерия оценки вариантов распределения функций и зон управления

Взвешенные критерии оценки вариантов	Варианты распределения функций и зон управления			
	Дежурный и оператор	Дежурный и помощник	Два дежурных при распределении зон управления по паркам станции	Два дежурных при распределении зон управления по районам станции
1. Затраты рабочего времени смены, мин	-0,017	-0,017	-0,017	-0,019
2. Общая сложность деятельности работников смены	-0,044	-0,044	-0,033	-0,040
3. Количество маршрутов за смену	-0,073	-0,073	-0,073	-0,126
4. Количество дополнительных транзитных грузовых поездов в смену	0,079	0,089	0,060	0,111
5. Месячный фонд оплаты труда оперативного персонала смены, руб.	-0,019	-0,019	-0,022	-0,022
Комплексный критерий C_{wij}	-0,074	-0,066	-0,086	-0,096

по станции прочих подвижных единиц 4/4; передвижения составов при обслуживании путей необщего пользования 9/9.

В результате оценки по комплексному критерию лучшим вариантом распределения функций и зон управления является работа дежурного по станции с помощником ($C_{wij} = -0,066$). Поэтому при заданных объемах поездной и местной работы на рассматриваемой участковой станции рекомендуется распределять функции управления между дежурным по станции и помощником, сохранив одну зону управления. При этом работа в должности помощника создаст условия для подготовки его к работе дежурным по станции.

Оборудование рабочих мест дежурного по станции и помощника, в части взаимодействия с электрической централизацией, должно быть одинаковым. Это создаст возможность дежурному по станции управлять маршрутами со своего рабочего места в случае кратковременного отсутствия помощника на его рабочем месте. Для каждого дежурного по станции должна быть обеспечена возможность управлять маршрутами в пределах своей зоны. Элементы путевого развития станции, которые используются для передвижений, управляемых обоими дежурными (вытяжные тупики, ходовые пути и т. п.), должны включаться в зону управления дежурного по станции, управляющего движением более высоких категорий поездов (пассажирских, пригородных, транзитных грузовых и т. д.).

Расчеты показывают, что при увеличении загруженности одного из дежурных до нормы, за счет пропуска дополнительного количества транзитных грузовых поездов, максимальное значение комплексного критерия достигается при распределении зон управления по паркам станции $(-0,231; -0,235; -0,218; -0,317)$. В условиях увеличения расформирования/формирования до 27 составов в дневную смену, подач/уборок вагонов до 15 и уменьшения количества транзитных грузовых поездов до 75 лучшим вариантом становится распределение зон управления по районам станции $(-0,086; -0,081; -0,071; -0,064)$.

Таким образом, предлагаемый метод распределения функций и зон управления между оперативным персоналом участковых станций позволяет улучшить условия труда дежурных по участковым станциям и результаты их работы посредством выбора на основе количественной оценки лучших вариантов организации рабочих мест в процессе проектирования электрической централизации.

Заключение

Формализация алгоритмического описания функций управления, выполняемых железнодорожным оперативно-диспетчерским персоналом, создала возможность алгоритмизации всех функций управления, включая согласование действий персонала; определение затрат рабочего времени на выполнение всех операторов алгоритмов, в том числе скрытых от наблюдения и выполняемых в предлагаемых условиях автоматизации; оценку вероятности возникновения логических условий; определение числа функций управления, выполняемых персоналом за смену, в зависимости от количеств поездных и маневровых передвижений. Предложен набор операторов и логических условий, достаточный для записи на модифицированном языке ЛСА алгоритмов функций управления, выполняемых оперативным персоналом участковых станций. Разработана методика расчета загруженности оперативного персонала участковых станций, основанная на алгоритмическом описании функций управления, сборе и математической обработке статистических данных о длительностях выполнения операторов алгоритмов, и оценках вероятностей возникновения логических условий.

Предложения доведены до практических рекомендаций и методик расчета загруженности оперативного персонала участковых станций в зависимости от объемов поездной и местной работы, что позволяет количественно оценивать варианты распределения функций и зон управления между оперативным персоналом на основе комплексной количественной оценки.

Предложен комплексный метод количественной оценки вариантов распределения функций и зон управления между оперативным персоналом участковых станций, основанный на алгоритмическом описании функций управления, сборе и математической обработке статистических данных о затратах времени

на выполнение операторов алгоритмов и оценке вероятностей соблюдения логических условий в алгоритмах, методике расчета загруженности персонала в зависимости от количеств поездных и маневровых передвижений за смену. Предложен набор критериев оценки вариантов распределения функций и зон управления. Разработан математически аппарат определения комплексного критерия оценки вариантов, основанного на количественных оценках веса максимизируемых и минимизируемых критериев. На основе комплексного критерия предложена методика количественной оценки вариантов распределения функций и зон управления в зависимости от объемов поездной и местной работы на участковых станциях, используемая при обосновании проектных решений по организации рабочих мест оперативного персонала при проектировании электрической централизации.

Библиографический список

1. Нормы технологического проектирования устройств автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте / НТП-СЦБ, ОАО «РЖД», ГТСС. – СПб., 2004. – 106 с.
2. Нормативы затрат труда и нормативны численности оперативных работников железнодорожных станций по управлению процессами перевозок ОАО «РЖД» : утв. 02.12.2005. – М. : ОАО «РЖД». – 48 с.
3. Кокурин И. М. Теория и методы обоснования уровня автоматизации управления процессами перевозок на основе систем железнодорожной автоматики и телемеханики : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.08. – Л., 1986. – 322 с.
4. Кокурин И. М. Формализация расчета загрузки железнодорожных операторов / И. М. Кокурин // Железнодорожный транспорт. – 1983. – № 5. – С. 51–54.
5. Никитин А. Б. Методы и технические средства концентрации и централизации оперативного управления движением поездов (развитие теории и практические приложения) : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.08. – СПб., 2005. – 249 с.
6. Грошев Г. М. Оптимизация диспетчерского управления процессами перевозок на основе систем железнодорожной автоматики : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.08. – СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2007. – 221 с.
7. Грошев Г. М. Выбор способа доставки контейнеров между тыловым логистическим терминалом и морским торговым портом / Г. М. Грошев, В. Л. Белозеров, Н. В. Климова // Известия Петербургского гос. ун-та путей сообщения. – 2015. – № 2. – С. 117–122.
8. Masaki K. Recent Train Traffic Control Systems / K. Masaki, Y. Shigenobu, U. Toshihide, N. Takuya // Hitachi Review. – 1999. – № 3. – Pp. 153–160.
9. Rogers V. R. Algebraic, Mathematical Programming, and Network Models of the Deterministic Job-shop Scheduling Problem / V. R. Rogers, R. P. White // IEEE Trans. On Systems, Man, and Cybernetics. – 1991. – № 3. – Pp. 693–697.
10. Kanso K. Formal Verification of Ladder Logic, Master's thesis / Swansea University. UK. Swansea. – 2008. – № SA2. – Pp. 8–10.

11. Kullmann O. Present and future of practical SAT solving / O. Kullmann // Complexity of Constraints, Lecture Notes in Computer Science / O. Kullmann, N. Creignou, P. Kolaitis, H. Vollmer. – 2008. – № 5250. – Pp. 283–319.
12. Ляпунов А. А. Об алгоритмическом описании процессов управления / А. А. Ляпунов, Г. А. Шестопап // Математическое просвещение : сб. – М. : Физматгиз, 1957. – Вып. 2. – С. 81–95.
13. Ляпунов А. А. О логических схемах программ / А. А. Ляпунов // Проблемы кибернетики. – 1958. – Вып. 1. – С. 46–74.
14. Кокурин И. М. Распределение зон и функций управления на технических станциях методом алгоритмического описания функций оперативного персонала / И. М. Кокурин, К. Е. Ковалев // Вестник транспорта Поволжья. – 2014. – № 4 (46). – С. 97–104.
15. Катцын Д. В. Распределение зон управления и функций оперативного персонала / Д. В. Катцын, И. М. Кокурин, К. Е. Ковалев // Мир транспорта. – 2014. – № 3 (52). – С. 210–219.
16. Кокурин И. М. Метод расчета загруженности оперативно-диспетчерского персонала технических станций, основанный на алгоритмическом описании содержания труда / И. М. Кокурин, К. Е. Ковалев // Известия Петербургского гос. ун-та путей сообщения. – 2013. – № 3. – С. 18–23.
17. Кокурин И. М. Выбор варианта распределения функций и зон управления между оперативным персоналом технических станций на основе оценки по разнонаправленным критериям / И. М. Кокурин, К. Е. Ковалев // Вестник транспорта Поволжья. – 2015. – № 2 (50). – С. 55–64.
18. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М. : Наука, 1964. – 576 с.

Kokurin Iosif M.

Institute for Transportation Problems N. S. Solomenko
Russian Academy of Sciences

Kovalev Konstantin E.

Petersburg State Transport University
«Railway Operation» department

Functions and control zones distribution between operational personnel of the polling stations

Appointment of the second (third) of a large polling station of master-on-duty due to the interlocking modernization that needs to provide them with means of information and interlocking control for objects which means necessity to determine the boundaries of controlled zones. Lack of appropriate guides makes taking wrong project decisions concerning the operator's workplace that remains unchanged after the project has been implemented. These create uneven workload for masters-on-duty and cause the wrong decisions making

and mistakes. The paper deals with a method for integrated assessment of the functions and control zones distribution between the operational staff of the polling stations based on a set of quantitative criteria; theirs «weight» being determined by the difference between maximum and minimum values for each criterion.

polling stations, electric interlocking, functions and control zones, operational staff, functions and control zones distribution, criteria for distribution evaluation, quantitative way to determine the criteria «weights», integrated criterion for variants evaluation

Reference

1. Norms of technological projecting for automation and remote control devices on railway transport. STP-SCB, OAO «Russian Railways», GTSS. St. Petersburg, 2004, 106 p.
2. Norms for labor and operational staff of railway stations for management traffic control on JSC «Russian Railways». Approved. 02.12.2005g. Moscow, JSC «Russian Railways», 48 p.
3. Kokurin I. M. Theory and methods for level of automation foundation of transportations processes based on railway automation and remote control systems : dis. dr. tech. sciences : 05.22.08. Leningrad, 1986, 322 p.
4. Kokurin I. M. Formalization for railway operators workload calculation. Railway transport, 1983, № 5, pp. 51–54.
5. Nikitin A. B. Methods and technical mtans for concentration and centralization of operational trains traffic management (development of theory and applications) : dis. dr. tech. sciences : 05.22.08. St. Petersburg, 2005, 249 p.
6. Groshev G. M. Train dispatchers control optimization on the basis of railway automation systems : dis. dr. tehn. Sciences : 05.22.08. SPb., PGUPS, 2007, 221 p.
7. Groshev G. M., Belozеров V. L., Klimova N. V. Choice for containers shipping between the rear logistics terminal and maritime port. Proceedings of PGUPS, 2015, № 2, pp. 117–122.
8. Masaki K., Shigenobu Y., Toshihide U., Takuya N. Recent Train Traffic Control Systems. Hitachi Review, 1999, № 3, pp. 153–160.
9. Rogers V. R., White R. P. Algebraic, Mathematical Programming, and Network Models of the Deterministic Job-shop Scheduling Problem. IEEE Trans. On Sistems, Man, and Cybernetics, 1991, № 3, pp. 693–697.
10. Kanso K. Formal Verification of Ladder Logic, Master's thesis. Swansea University. UK. Swansea, 2008, № SA2, pp. 8–10.
11. Kullmann O., Creignou N., Kolaitis P., Vollmer H. Present and future of practical SAT solving. Complexity of Constraints, Lecture Notes in Computer Science, 2008, № 5250, pp. 283–319.
12. Lyapunov A. A., Shestopal G. A. On the algorithmic description for the control processes. Mathematical education. Moscow, Fizmatgiz, 1957, vol. 2, pp. 81–95.
13. Lyapunov A. A. About program logic charts. Problems of Cybernetics, 1958, vol. 1, pp. 46–74.

14. Kokurin I. M., Kovalev K. E. Functions and control zones distribution for polling stations based on algorithmic description method for the of operational staff functions. Bulletin of Volga region, 2014, № 4 (46), pp. 97–104.
15. Kattsyn D. V., Kokurin I. M., Kovalev K. E. The distribution areas of management and operational staff functions. World of transport, 2014, № 3 (52), pp. 210–219.
16. Kokurin I. M., Kovalev K. E. Method for the workload calculation of the polling stations operational staff, based on the labor content algorithmically description. Proceedings of PSTU, 2013, № 3, pp. 18–23.
17. Kokurin I. M., Kovalev K. E. Variants selection of the functions and control zones distribution between operational staff of polling stations based on the different criterion assessment. Bulletin of the Volga region, 2015, № 2 (50), pp. 55–64.
18. Ventzel E. S. Probability theory. Moscow, Science, 1964, 576 p.

*Представлена к публикации членом редколлегии Вал. В. Сапожниковым
Поступила в редакцию 22.08.2015, принята к публикации 14.09.2015*

КОКУРИН Иосиф Михайлович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории проблем развития транспортных систем и технологий ФГБУН «Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук».

e-mail: kokyrinim@mail.ru

КОВАЛЕВ Константин Евгеньевич – аспирант, ассистент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

e-mail: kovalev_kostia@mail.ru

© Кокурин И. М., Ковалев К. Е., 2015

Стандартизация и сертификация

УДК 004.052.2

Б. В. Сивко

Научно-исследовательская лаборатория «Безопасность и ЭМС технических средств»,
Белорусский государственный университет транспорта

АКСИОМАТИКО-БАЗИСНЫЙ ПОДХОД ДЛЯ РАЗРАБОТКИ БЕЗОПАСНЫХ И ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫХ СИСТЕМ

Предложен подход на основе аксиоматических базисов, позволяющий формализовать решение ряда проблем разработки и верификации отказоустойчивых и безопасных систем. Сформулированы положения и задачи аксиоматико-базисного подхода. Показано, что подход согласуется с опытом инженерии безопасных и отказоустойчивых систем; позволяет повышать их отказоустойчивость и безопасность; сравнивать отказоустойчивость систем; сохранять баланс между отказоустойчивостью и сложностью разработки и верификации; применять формальные методы для доказательства; формализовать интеграцию систем; повышать и оценивать уровень диверситета без привлечения независимых групп разработчиков и экспертов; формализованно проектировать и верифицировать системы, обнаруживающие собственные отказы. Вместе с тем подход позволяет решать актуальные проблемы отказоустойчивых и безопасных систем, такие как формализация методов внутривидеопроцессорного контроля и разработка условий его проведения, а также доказательство достаточности диверситета разрабатываемых и верифицируемых систем.

отказоустойчивость, доказательство безопасности, формальные методы, формализация, диверситет, обнаружение отказов

Введение

Одной из актуальных задач для современных систем, связанных с безопасностью, является создание эффективных методов и средств, позволяющих выполнять их разработку и верификацию. Данные системы используются в таких отраслях промышленности, как железнодорожный и морской транспорт, гражданская авиация, атомная энергетика, медицина, космос, телекоммуникации, опасное химическое производство и др. [1]. Они относятся к системам, критичным к безопасности, к которым предъявляются повышенные требования, так как они отвечают за управление ответственными технологически-

ми процессами. Концепции построения систем данного типа имеют общую основу, закрепленную в стандарте ГОСТ Р МЭК 61508:2012 (IEC 61508) [2].

В настоящее время считается, что для обеспечения надлежащего уровня безопасности и надежности функционирования на всех этапах жизненного цикла систем требуется комплексно применять известные методы и средства для обеспечения этих свойств [3]. Практикуются функциональный, структурный и другие подходы, применяются программные и аппаратные средства защиты, используются различные концепции и стратегии обеспечения безопасности и т. д. [3–5].

Одной из проблем при решении ряда задач по разработке и верификации систем, критичных к безопасности, является отсутствие формализованных подходов. По этой причине используются экспертные методы. В качестве примера можно рассмотреть влияние фактора отказа по общей причине (common cause failure, CCF), из-за которого происходит большое количество катастроф [6–8]. Для решения возможно создание диверситетного аппаратного и программного обеспечения с помощью N-версионного программирования, привлечение независимых экспертов, выбор различных компиляторов и др. Для оценки уровня диверситета могут быть использованы ВЕТА-метод и модель ВЕТАPLUS, которые рекомендованы стандартом IEC 61508 [2]. Однако все существующие в настоящее время диверситетные методы являются экспертными, что ограничивает их эффективность и глубину решения, поэтому существует необходимость их формализации.

В статье предлагается подход на основе аксиоматических базисов (аксиоматико-базисный подход, АБП), который позволяет рассмотреть вопросы разработки и верификации безопасных и отказоустойчивых систем в формализованном виде. Он сформулирован на основе обобщения диверситетных аксиоматических базисов, позволяющих решить проблему формализации диверситета и CCF, что в настоящее время представляется его актуальным применением [9]. Подход базируется на общих свойствах дедуктивной логики и поэтому претендует на высокую степень обобщения. Разработка и апробация АБП проводились на микропроцессорных системах автоматики и телемеханики.

Опыт разработки и верификации в лаборатории показывает, что АБП имеет особенности применения, зависящие от проекта, поставленной задачи и рассматриваемой функциональности. В статье рассматриваются положения АБП, опирающиеся на общую основу построения систем, критичных к безопасности и надежности функционирования.

1 Аксиоматико-базисный подход

Аксиоматическим базисом (далее базис) будем считать некоторое множество утверждений (условий). Если они выполняются для системы в рассматриваемом состоянии, то будем считать, что базис истинен (выполняется) для состояния данной системы. Пример условий базиса:

- все инструкции микропроцессора выполняются согласно его спецификации;
- тактовая частота генератора находится в заданных конкретных пределах;
- отказы элементов из-за агрессивной электромагнитной обстановки происходят не чаще заданного предела по времени.

С точки зрения формализации данные условия можно рассмотреть как некоторое утверждение (логическую функцию от системы или ее состояния), которое как для рассматриваемого примера, так и в общем случае на практике удобно представить в виде конъюнкции (логического «И») более простых утверждений. Другими словами, если рассматривается некоторая система в состоянии x и при этом имеется множество утверждений $A_1(x), A_2(x), \dots, A_n(x)$, которые являются истинными, то базисом будет являться $A(x)$, определенное по формуле

$$A(x) \equiv A_1(x) \wedge A_2(x) \wedge \dots \wedge A_n(x), \quad (1)$$

а система в данном состоянии будет считаться удовлетворяющей данному базису.

В качестве утверждений (условий) базиса могут рассматриваться изначальные базовые положения, на которые опирается разработчик или верификатор, и те возможности, которые ему предоставлены. Это могут быть условия функционирования, а для существующих систем, с которыми происходит взаимодействие, – их свойства.

Условия базиса должны быть формализуемыми, т. е. каждое из них можно однозначно записать в виде математического условия $A_i(x)$. Сами же условия могут быть любыми, но они задают уровень абстракции таким образом, чтобы в рамках данной аксиоматики можно было бы верифицировать свойства системы.

АБП предполагает, что утверждения $A_i(x)$ обладают некоторой степенью независимости с точки зрения отказоустойчивости. Поэтому рассмотрение базиса в виде множества утверждений, логически объединенных через конъюнкцию, удобно тем, что в случае отказа или нарушения некоторых условий оставшиеся будут выполняться и система сохранит некоторое свое свойство. Важной задачей для повышения отказоустойчивости является также уменьшение количества условий и увеличение области их определения.

Любое формализованное доказательство свойств системы, в том числе доказательство безопасности, можно представить так, как показано на рис. 1.

Доказательство базируется на утверждениях аксиоматического базиса и представляет собой цепь дедуктивных умозаключений, результатом которых должен быть вывод о целевом качестве рассматриваемой системы. Изначально принимается, что утверждения аксиоматического базиса истинны. Далее с помощью правил вывода (логики) делается попытка установить истинность верифицируемых свойств системы. В случае успеха система считается удовлетворяющей проверяемым свойствам.

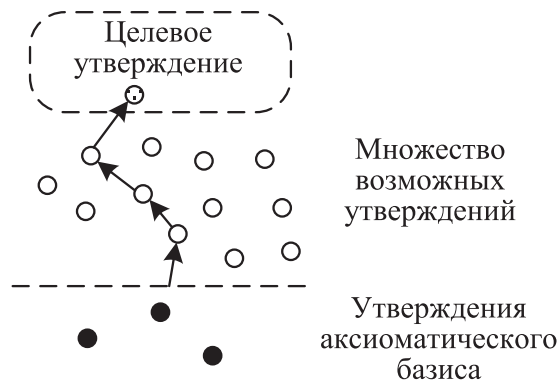


Рис. 1. Доказательство целевого утверждения

Аналогичным образом строится разработка, при которой изначально предполагается, что будущая система будет работать на основании того, что выполняются некоторые определенные утверждения. Например, при разработке безопасных схем на базе реле первого класса считается, что фронтные контакты не могут быть замкнуты ни при каких обстоятельствах в случае, если обесточена обмотка. Данное свойство реле обеспечивается конструкционно, а в системе ответственные команды выполняются через фронтные контакты. Или для программных средств может предполагаться, что спецификации языка программирования выполняются. Это обеспечивается безошибочностью работы аппаратуры и корректностью компиляции. Таким образом, разработка основана на истинности условий базиса и подразумевает ряд шагов, посредством которых разрабатываемая система должна перейти в такое состояние, при котором целевое утверждение становится истинным.

В рамках АБП важны оба аспекта – как доказательство свойств системы, так и процесс ее разработки.

Следует отметить, что логические правила определяются той теорией, в рамках которой выполняется доказательство или разработка. Другими словами, в процессе доказательства или проектирования разработчик или верификатор могут использовать различные математические аппараты, и АБП не налагает никаких ограничений на методы дедукции, которые могут быть применены.

АБП строится на следующих положениях:

- безопасность и отказоустойчивость системы является функцией от аксиоматического базиса;
- отказ в системе рассматривается как нарушение одного из утверждений аксиоматического базиса.

Основным понятием при анализе является аксиоматический базис, на который опираются функции системы. Соответственно в случае отказа та часть системы, разработка или доказательство которой основывались на истинности нарушенных утверждений, может перейти в состояние отказа. Но работоспособность тех функций системы, которые не зависят от нарушенных утверждений, не будет нарушена.

Как правило, базис формируется на основе экспериментальных данных или рассматривается в рамках другой теории, которая предоставляет готовые к применению условия базиса. Например, при построении безопасных схем на основе реле первого класса их можно сформулировать в терминах дискретной логики, уровень абстракции которой скрывает конкретную реализацию. Вместе с тем можно сформулировать условия базиса таким образом, чтобы оперировать вероятностными характеристиками конкретных устройств, о которых имеются экспериментальные данные.

Следует отметить, что любая функция системы выполняется тогда, когда являются истинными определенные утверждения (т. е. базис). В данном случае аксиоматический базис показывает свою двойную природу, когда, с одной стороны, налагаемые условия позволяют реализовывать требуемую функциональность, а с другой стороны, их нарушение из-за отказов приводит систему в опасное или неработоспособное состояние.

Отличительной особенностью АБП является его формализованность. Например, если нарушается базис, то можно определить условия его нарушения и целенаправленно искать решение проблемы. Или если базис усиливается, то можно определить, для каких случаев система становится более отказоустойчивой и безопасной и т. д.

Основными задачами АБП являются:

- защита аксиом – выбор таких аксиоматических базисов, которые наименее подвержены отказам, а также мероприятия по защите выполнимости утверждений базисов;

- проверка аксиоматических базисов – процедуры, позволяющие определить, выполняется базис или нет, что предоставляет возможность как доказывать безопасность и отказоустойчивость существующих систем, так и проверять их работоспособность в реальном времени;

- разработка методов и средств на основе аксиоматических базисов – поиск эффективных решений, позволяющих оперировать аксиоматическими базисами таким образом, чтобы улучшать показатели безопасности и отказоустойчивости.

2 Отказоустойчивость и безопасность систем

Система в процессе работы может изменять свое состояние и соответственно может измениться выполнимость базиса. Например, в состоянии x базис A выполняется, а в состоянии y базис A не выполняется. Тогда, если система спроектирована или верифицировалась на основании базиса A , в результате перехода из состояния x в состояние y система может перестать выполнять свою функцию. Исходя из этого можно сделать вывод о том, что одной из задач при разработке отказоустойчивых и безопасных систем является выбор

такого базиса, который является наиболее устойчивым (при котором множество $A(x)$ является как можно большим), а переход из $A(x)$ в $A(y)$ как можно менее вероятным.

Таким образом, выбирать нужно такие утверждения для базиса, которые сложно нарушить, а разработку систем вести таким образом, чтобы заданная функция выполнялась как можно в большем количестве состояний и при этом переход в некорректное состояние был бы как можно менее вероятным.

Примером сильного базиса может служить реле первого класса, для которого свариваемость фронтовых контактов маловероятна, и на этом можно строить высоконадежные системы. Примером уменьшения количества состояний, при которых не выполняются условия безопасности системы, является расчет контрольной суммы кода выполняемой программы, изменение которой приводит к переходу в безопасное состояние.

АБП обращает внимание на защиту утверждений базиса. Если функционирование реле первого класса зависит от необходимости отпадания якоря под действием силы притяжения и соответственно от его геометрического расположения, требуется обеспечивать соответствующие условия и проверять их. Если производится расчет контрольной суммы памяти, требуется обосновать утверждение о том, что произвольный отказ приводит к равновероятному изменению контрольной суммы.

3 Сравнение аксиоматических базисов

Рассмотрим два аксиоматических базиса – A и B относительно друг друга. Если выполняются нижеприведенные условия, будем считать, что базис A сильнее базиса B (соответственно B является более слабым, чем A):

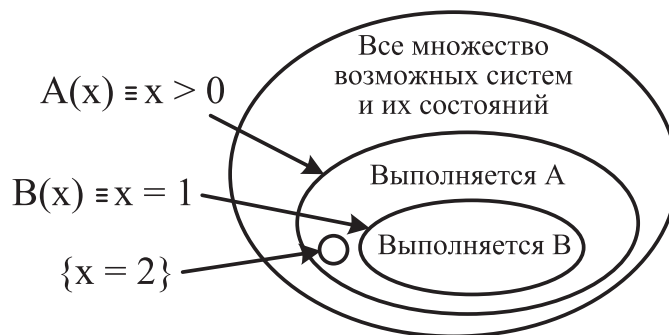
$$\forall x \quad B(x) \rightarrow A(x); \quad (2)$$

$$\exists x \quad A(x) \wedge \overline{B(x)}. \quad (3)$$

Другими словами, всегда, когда выполняется базис B , выполняется базис A , но существует хотя бы одно состояние, при котором выполняется базис A , но не выполняется базис B . Например, если принять, что $A(x) \equiv x > 0, B(x) \equiv x = 1$, то выполнимость базисов и факт того, что A сильнее B , можно продемонстрировать так, как показано на рис. 2.

Во время усиления базиса относительно составляющих утверждений всегда можно выразить более слабый базис B через более сильный A следующим образом:

$$B(x) \equiv A(x) \wedge C(x). \quad (4)$$

Рис. 2. Базис A сильнее базиса B

Здесь $C(x)$ включает в себя как минимум одно состояние исходя из (3) и описывает утверждения, которые являются разностью между базисами A и B .

При работе с базисами удобно рассматривать их не только с точки зрения систем, которые им удовлетворяют, но и относительно аксиоматических утверждений (см. рис. 1), которые базисы включают в себя согласно (1). Данная разница и связь между способами рассмотрения показана на рис. 3.

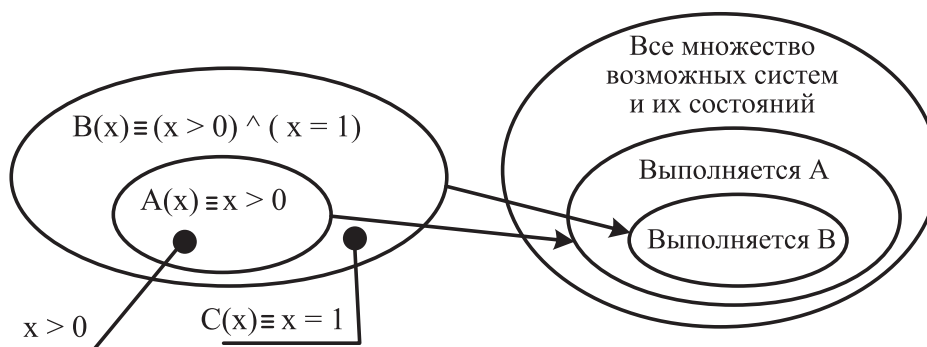


Рис. 3. Относительность усиления базиса

4 Сравнение систем на безопасность и отказоустойчивость

Рассмотрим две системы – p и q относительно некоторых базисов A и B . Если выполняется $A(p)$ (т. е. система выполняет свою функцию при выполнимости базиса A), выполняется $B(p)$ и $A(q)$, но не выполняется $B(q)$, то из этого можно сделать заключение о том, что система p более отказоустойчива, чем система q . Это проиллюстрировано на рис. 4. Отсюда следует вывод о том, что можно таким образом сравнивать системы на безопасность или отказоустойчивость. Однако, по ситуации, показанной на рис. 4, нельзя однозначно сказать, какой из базисов более сильный, A или B , даже несмотря на то, что есть пример системы q , которая может не работать на основании базиса B и работает на основании базиса A . Это происходит потому, что безопасность и отказоустойчи-

вость зависят не только от системы, но и от базиса. И с точки зрения базисов может получиться так, что имеется условие, которое выполняется в базисе B , но не выполняется в A , и соответственно существует другая пара систем p и q или их состояний, для которых ситуация противоположна (выполняется $A(p)$, $B(p)$ и $B(q)$, но не выполняется $A(q)$). Поэтому для сравнения систем на безопасность и отказоустойчивость необходимо доказательство того, что базис A сильнее базиса B .

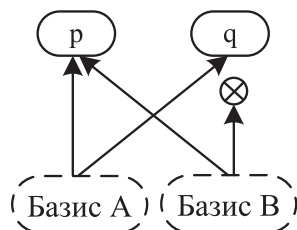


Рис. 4. Относительность усиления базиса

На основании вышеизложенного делается вывод о том, что любое формализованное сравнение на отказоустойчивость всегда относительно тех базисов, на которые оно опирается, т. е. если система выполняет свою функцию как в условиях A , так и в условиях B , то она устойчива относительно этих условий, но в других условиях ситуация может быть иной. Поэтому важной задачей является разработка и верификация отказоустойчивых и безопасных систем, которые наиболее близки в предметной области и предполагаемым условиям функционирования [10]. Второй задачей является поиск наиболее вероятных отказов и целенаправленная защита от них, что согласуется с общей практикой инженерии безопасных систем [11].

Следует отметить, что изменение свойств безопасности и отказоустойчивости систем является одним из основных факторов, приводящих к авариям и катастрофам [1, 8].

Таким образом, АБП объясняет, почему отказоустойчивость и безопасность не являются абсолютными понятиями, а должны рассматриваться относительно тех условий, в которых эксплуатируется система. АБП также показывает, почему при переносе системы в другие условия характеристики ее безопасности и отказоустойчивости изменяются.

5 Повышение безопасности и отказоустойчивости систем

АБП дает возможность повышения устойчивости систем с помощью усиления аксиоматического базиса: если в нашем распоряжении находится система, разработанная на основании некоторого базиса (B), то можно повысить отказы-

устойчивость системы таким образом, чтобы она выполняла свои функции при более сильном базисе (А). Верификация такой системы показана на рис. 5.

Аналогично, если рассматривается уже верифицированная система, можно доказать ее безопасность или надежность на более строгом уровне, приведя доказательство для более сильного базиса. Данная операция может быть полезна для адаптации эксплуатируемой системы к новым условиям.

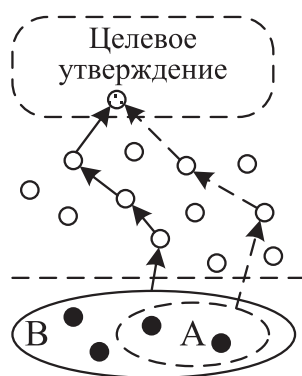


Рис. 5. Доказательство на основании более сильного базиса

Важно отметить, что вышеприведенные рассуждения применимы не только для системы в целом, но и для ее текущего состояния, которое в процессе работы может изменяться. Поэтому доказательства безопасности и отказоустойчивости на основании АБП могут приводиться для переходов системы между ее состояниями. Это может иметь место, в том числе, и с необходимым усилением базиса, например, переход в безопасное состояние может осуществляться при сопутствующем усилении базиса.

Описанный способ не обязательно применять для всей системы. Усиление базиса возможно только для отдельной ответственной функции, работоспособность которой определяет отказоустойчивость или безопасность системы.

Следует отметить, что рассмотрение двух систем относительно некоторых базисов позволяет сравнивать системы на отказоустойчивость, т. е. если одна из систем выполняет свою функцию на более сильном базисе, то она более отказоустойчива.

Таким образом, АБП дает возможность улучшать показатели отказоустойчивости формализованно и целенаправленно, а также сравнивать системы на отказоустойчивость.

6 Пример повышения отказоустойчивости с помощью усиления базиса

Допустим, требуется разработать систему, выполняющую следующую логическую функцию:

$$F(a, b, c) \equiv (a \wedge b) \vee \bar{c}. \quad (5)$$

Функция (5) является требованием к системе как ее свойству, т. е. формирует целевое утверждение, показанное на рис. 5.

Рассмотрим первый базис D , представляющий собой корректность проведения логических операций:

$$D \equiv A_{and} \wedge A_{or} \wedge A_{not}, \quad (6)$$

где A_{and} – безошибочность выполнения операции AND («И») и соответственно A_{or} для OR («ИЛИ») и A_{not} для NOT («НЕ»).

Здесь с точки зрения отказоустойчивости предполагается, что логические операции одного и того же типа более подвержены отказу, а разного типа происходят более независимо. Это может происходить, например, в случае повторного использования одних и тех же элементов (что является общей характеристикой микропроцессорных систем [3]), или тогда, когда имеется ССФ для аппаратных средств одного и того же типа.

В случае, когда разработчику предоставлены возможности A_{and} , A_{or} и A_{not} для проведения логических операций, то можно получить результат, показанный на рис. 6, а.

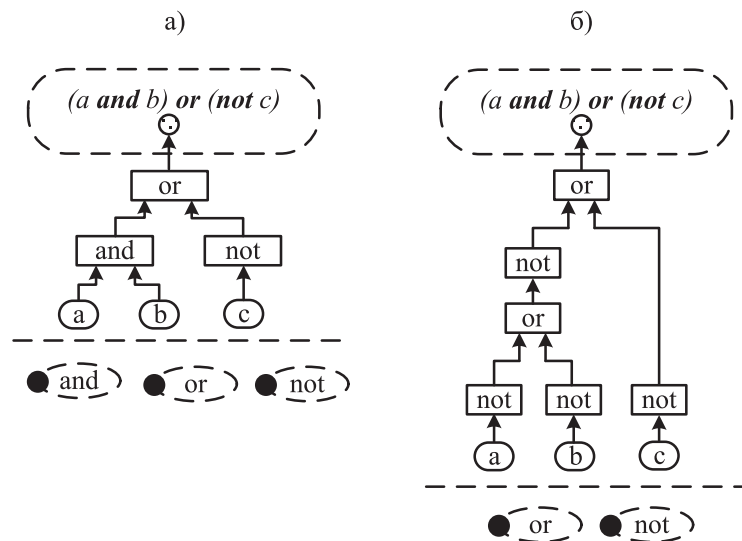


Рис. 6. Разработка (а) и усиление (б) аксиоматического базиса

Но с точки зрения АБП можно ограничить выбор действий таким образом, чтобы не использовать логическую операцию AND, т. е. исключить условие A_{and} . В этом случае будет получен более сильный базис E :

$$E \equiv A_{or} \wedge A_{not}. \quad (7)$$

Реализация системы, при которой использован более сильный базис E , может выглядеть так, как показано на рис. 6, б.

Таким образом, из базиса было удалено условие A_{and} и теперь, в случае его нарушения, система продолжит выполнять свою функцию. Можно также сказать, что исключен фактор CCF для операции AND.

7 Аксиоматический базис как степень свободы

Изменение базиса отражается на сложности разработки системы или доказательства ее безопасности и надежности таким образом, что при усилении базиса сложность либо не изменяется, либо увеличивается. Как можно видеть в предыдущем примере, базис был усилен, а реализация функции усложнилась. Соответственно является верным и обратный процесс – при ослаблении базиса систему проще разрабатывать или доказывать ее свойства. С точки зрения АБП изменение базиса как степень свободы показана на рис. 7.



Рис. 7. Изменение базиса как степень свободы

Примером разности базисов может служить разность подходов для RISC- и CISC-процессоров, первые из которых имеют небольшой набор команд, а вторые спроектированы так, чтобы выполнять задачу с минимальным количеством строк кода [12, 13]. В качестве второго примера можно рассмотреть разницу в решении некоторой задачи на языке высокого уровня с применением готовых библиотек (предоставляющих разработчику множество удобных абстракций) и решение той же задачи на языке Ассемблер. В случае, когда задача более близка к предоставляемым абстракциям, разработка является более простой. Но при этом отказоустойчивость для первых зависит не только от аппаратных средств, но и от библиотек и компилятора.

Для создания безопасных и надежных систем усиление базиса не является целью. Важно понимание того, что усиление базиса позволяет уменьшать зависимость от внешних условий. Однако при большой сложности системы это усложняет ее разработку и верификацию, что выражается в увеличении затрат и в том, что система становится более подверженной ошибкам. Поэтому с практической точки зрения необходим поиск баланса.

Одним из способов улучшения показателей отказоустойчивости может являться поиск таких условий базиса, соблюдение которых несущественно влияет на разработку. Например, в случае, когда в системе присутствует функциональ-

ность, которая основана на условиях базиса A_m , но может быть с минимальными затратами реализована на других условиях базиса (для всех A_i при $i \neq m$), как следствие, A_m из базиса можно исключить.

С точки зрения АБП рассмотрение базиса как отдельного понятия позволяет отделить предоставляемые разработчику или верификатору отказоустойчивые абстракции от непосредственного процесса разработки или верификации и тем самым влиять на их сложность.

8 Дедуктивный анализ с помощью аксиоматических базисов

Поскольку АБП формализует поведение и разработку систем, можно проводить их дедуктивный анализ, т. е. логически доказывать целевые свойства. Например, если известно, что для базисов A и B и систем p и q выполняется $A(p)$ и $B(q)$, а также что базис A сильнее базиса B , то можно утверждать, что выполняется $B(q)$.

Дедуктивный анализ не исключает широкого применения логики как математического аппарата для доказательства. Рассмотрим в качестве примера систему в состоянии x , построенную на базисе A , и некоторое утверждение $g(x)$. Если теория непротиворечива, любое утверждение, как $g(x)$, может являться истинным (всегда выполняться), ложным (никогда не выполняться) или невыводимым (не являться истинным либо ложным в рассматриваемом базисе). Если воспользоваться доказательством от противного, то для некоторого $g(x)$ можно доказать, что оно ложно. Это означает: если условия базиса выполняются (надежно защищены) и в логике не было ошибок, то $g(x)$ никогда не может быть истинным. Другими словами, система никогда не будет находиться в состоянии, при котором $g(x)$ истинно.

Если на практике требуется выполнение $g(x)$, но мы доказываем, что оно ложно, то, скорее всего, имеется проблема в базисе A и его нужно изменить. Но возможна и обратная ситуация, когда требуется, чтобы в базисе A утверждение $g(x)$ никогда не выполнялось, что может быть полезно в случае, когда $g(x)$ описывает опасное или неработоспособное состояние.

Таким образом, АБП предоставляет возможность широкого использования формальных подходов, позволяющих доказывать безопасность и надежность систем с помощью математических средств.

9 Интеграция систем

Во время интеграции двух систем, построенных на базисах A и B соответственно, может быть логически определен базис результирующей системы. Рассмотрим два различных варианта интеграции.

Если интеграция происходит для совместного выполнения некоторой задачи, то базис определяется объединением базисов A и B через конъюнкцию. При этом получаемый в результате объединения базис либо ослабляется, либо остается прежним (в случае, если базисы A и B равны). Например, если базисы определяются как

$$A \equiv (x > 0) \wedge (x < 20) \quad (6)$$

и

$$B \equiv (x > 10) \wedge (x < 30), \quad (7)$$

то результирующий базис считается их конъюнкцией:

$$A \wedge B \equiv (x > 10) \wedge (x < 20). \quad (8)$$

Вывод на основе АБП заключается в том, что подсистемы, работающие в комплексе для выполнения общей задачи, нужно разрабатывать таким образом, чтобы они имели как можно больший общий базис. В этом случае преобразование (8) приведет к минимальному ослаблению базиса и соответственно сохранению свойств отказоустойчивости и безопасности. Если базис не согласован, то для таких систем доказательство безопасности будет затруднено, а показатели надежности могут ухудшиться.

Вторым вариантом интеграции является построение диверситетных систем, когда каждая из подсистем полноценно выполняет заданную функцию. В данном случае базис получается из A и B через дизъюнкцию

$$A \vee B \equiv (x > 0) \wedge (x < 30). \quad (9)$$

При таком объединении базис либо не изменяется (если базисы равны), либо усиливается.

Как результат, система становится защищенной от одиночных отказов в состояниях, когда один из базисов, A или B , перестает выполняться, а второй сохраняет свою истинность.

Разработка и верификация систем в данном варианте интеграции в АБП рассматриваются относительно диверситетных аксиоматических базисов [9]. Здесь вводятся функции *Indep* и *Common*:

$$\text{Indep}(A, B) \equiv A \wedge \bar{B}; \quad (10)$$

$$\text{Common}(A, B) \equiv A \wedge B. \quad (11)$$

Первая функция (10) показывает множество условий базиса A , которые независимы от базиса B . Вторая функция (11) показывает множество условий, нарушение любого из которых приводит к нарушению как базиса A , так и базиса B , т. е. того, что является общим базисом A и B .

При таких определениях диверситетная система будет защищена от одиночных отказов в состояниях, определенных по формуле

$$\text{Indep}(A, B) \vee \text{Indep}(B, A) \equiv ((x > 0) \wedge (x < 10)) \vee ((x > 20) \wedge (x < 30)) \quad (12)$$

и будет уязвимой для отказов, определенных по формуле (11).

Выражения (11) и (12) можно считать формализацией отказоустойчивости диверситетных систем.

АБП формализует задачи диверситета для повышения отказоустойчивости и безопасности, к которым относятся [9]:

- определение базисов с наибольшей степенью диверситета (увеличение области действия $\text{Indep}(A, B)$ и $\text{Indep}(B, A)$);
- определение базисов с минимальным влиянием CCF (уменьшение $\text{Common}(A, B)$);
- удержание внимания на решаемых задачах, т. е. помещение в $\text{Indep}(A, B)$ и $\text{Indep}(B, A)$ таких условий, которые наиболее важны для функционирования;
- реализация на рассматриваемых базисах функций, непосредственно влияющих на безопасность или надежность (например, ключевые действия для самодиагностики или восстановления системы после сбоев).

Более подробно диверситетные аксиоматические базисы рассмотрены в работе [9].

Важно отметить, что АБП позволяет усиливать диверситет без привлечения независимых групп во время разработки. При этом факт повышения уровня диверситета доказывается формальными методами и согласуется с условиями функционирования, позволяя выполнять задачу целенаправленно и адаптировать решение к конкретной ситуации. Конечно, АБП не отменяет необходимости привлечения независимых разработчиков для создания систем, критичных к безопасности, но вместе с тем предоставляет инструмент для выхода на уровень более высокого качества.

Таким образом, АБП формализует интеграцию систем и показывает, как можно целенаправленно улучшать показатели безопасности и отказоустойчивости.

10 Обнаружение отказов и проверка аксиоматического базиса

Важной задачей для безопасных и отказоустойчивых систем является обнаружение отказов с последующей реакцией, позволяющей перевести систему в безопасное состояние или запустить процесс ее восстановления. Данная проблема в АБП решается относительно базисов.

Для системы, выполняющей функцию f , для обнаружения отказов вводится функция корректности работы s , которая принимает истинное значение в случае, когда система находится в безопасном и работоспособном состоянии.

Рассмотрим систему, которая разрабатывается или верифицирована на базисе A_f , состоящем из трех утверждений A_1, A_2 и A_3 , и ситуацию, когда может произойти отказ, в результате которого нарушится базис A_3 . Ключевой идеей АБП для обнаружения отказа является то, что в результате нарушения базиса утверждение A_3 станет истинным, а на этом основании можно построить функциональность так, что отказ будет обнаружен. Проверка базиса с обнаружением отказа показана на рис. 8.

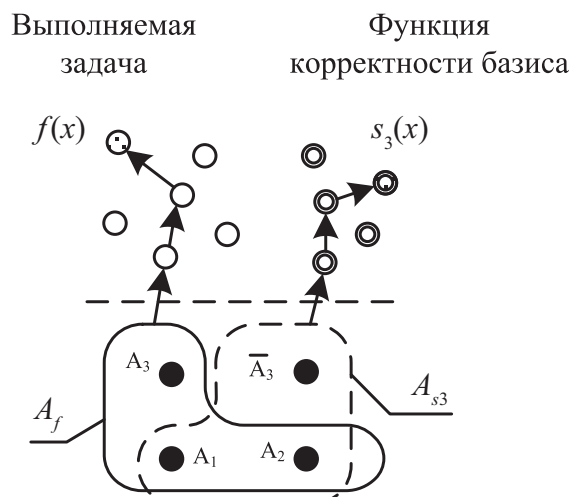


Рис. 8. Проверка базиса

Таким образом, могут быть сформированы функции s_i , проверяющие соответствующий базис A_i .

АБП вводит понятие полноты проверки. Рассмотрим систему, работающую на основании n базисов A_i , а также функции s_i , проверяющие соответствующий базис A_i , и базисы A_{si} , на основании которых реализованы соответствующие функции s_i . Для полноты проверки необходимо, чтобы выполнялись два условия:

1. Если перестал быть истинным базис A_i , то должен выполняться проверяющий его базис A_{si} .
2. Каждая функция $s_i(x)$ должна быть реализуема в предоставляемом базисе A_{si} .

В случае выполнения полной проверки система реализует свойство самопроверяемости в рамках рассматриваемой теории. Другими словами, если аксиоматические допущения надежно защищены, а разработка и верификация прошли без ошибок, то система всегда обнаружит отказ.

Следует отметить, что выполнение условия полной проверки является идеальным конечным результатом, который говорит о факте полной самопроверяемости системы в рамках рассматриваемых допущений. Иными словами, данное условие можно использовать как целевое утверждение, подлежащее выполнению.

Доказательство полноты проверки в статье не рассматривается. В настоящее время, исходя из опыта работы с конкретными устройствами, предполагается, что возможно получение инструментария доказательства полноты и корректности базиса для устройств с определенными свойствами.

Более подробно обнаружение отказов и проверка аксиоматического базиса рассмотрены в работе.

Таким образом, АБП позволяет формализованно создавать и верифицировать системы, которые способны обнаруживать факт отказа и, как следствие, переходить в безопасное состояние или самовосстанавливаться.

Заключение

АБП согласуется с опытом разработки и эксплуатации безопасных и отказоустойчивых систем – он объясняет, почему показатели системы зависят от условий эксплуатации и предоставленных для разработки средств, а также обосновывает сложность создания универсальных методов. Вместе с тем АБП формализует понятия предметной области, требующие согласования, и подтверждает необходимость внимания к характерным отказам для условий эксплуатации и аппаратных средств.

В статье показано, что с помощью АБП можно:

- повышать отказоустойчивость систем;
- сравнивать системы на отказоустойчивость;
- усиливать и ослаблять базис системы, тем самым сохранять баланс между отказоустойчивостью и сложностью разработки и верификации;
- применять формальные методы и доказывать свойства безопасности и отказоустойчивости систем математически;
- формализовать интеграцию систем и улучшать ее с точки зрения отказоустойчивости;
- улучшать диверситет без привлечения независимых групп разработчиков;
- формализованно проектировать и верифицировать системы, позволяющие обнаруживать отказы, переходить в безопасное состояние и самовосстановление.

АБП может быть применен для решения ряда актуальных проблем. Одной из них является отсутствие формальных методов внутривидеопроцессорного контроля, а АБП позволяет выполнить для него разработку соответствующих условий. Другой проблемой является отсутствие формальных средств доказательства достаточности диверситета разрабатываемых и верифицируемых систем. Для этой проблемы существуют только экспертные рекомендации, но отсутствует проверка как обратная связь по оценке уровня диверситета. АБП позволяет как оценить диверситет, так и сформировать достаточный его уровень во время разработки.

Таким образом, АБП позволяет выйти на новый уровень формализации разработки и верификации безопасных и отказоустойчивых систем, что дает возможность улучшать их показатели формализованно и целенаправленно.

Библиографический список

1. Levenson N. Safeware: System Safety and Computers / N. Levenson. – N. Y. : Addison-Wesley, 1995. – 680 p.
2. Smith D. J. Safety Critical Systems Handbook. A Straightforward Guide to Functional Safety, IEC 61508 and Related Standards, Including Process IEC 61511 and Machinery IEC 62061 and ISO 13849 / D. J. Smith, Simpson Kenneth G. L. – Oxford, UK, Elsevier Ltd, 2010. – 270 p.
3. Бочков К. А. Микропроцессорные системы автоматики на железнодорожном транспорте : учеб. пособие / К. А. Бочков, А. Н. Коврига, С. Н. Харлап. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 254 с.
4. Шубинский И. Б. Функциональная надежность информационных систем. Методы анализа / И. Б. Шубинский. – Ульяновск : Изд-во журнала «Надежность», 2012. – 216 с.
5. Шубинский И. Б. Структурная надежность информационных систем. Методы анализа / И. Б. Шубинский. – Ульяновск : Типография «Печатный двор», 2012. – 216 с.
6. Weil V. Professional Responsibility for Harmful Actions / V. Weil, B. Ferry. – Kendall Hunt, Dubuque, Iowa, 1984. – Pp. 402–411.
7. Sagan S. D. The Limits of Safety: Organizations, Accidents, and Nuclear Weapons / S. D. Sagan. – N. Y.: Princeton University Press, Princeton, 1993. – 302 p.
8. Neumann P. G. Computer-Related Risks / P. G. Neumann. – N. Y. : Addison-Wesley Professional, 1995. – 384 p.
9. Сивко Б. В. Диверситетные аксиоматические базисы для разработки безопасных и отказоустойчивых систем / Б. В. Сивко // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2014. – № 1 (28). – С. 19–23.
10. Smith D. J. Developments in the Use of Failure Rate Data and Reliability Prediction Methods for Hardware / D. J. Smith. – Delft : Delft University of Technology, Aerospace Engineering, Dissertation, 2000. – 175 p.
11. Parry G. W. Common Cause Failure Analysis: A Critique and Some Suggestions / G. W. Parry. – Gaithersburg, Maryland, USA, Reliability Engineering and System Safety. – 1991. – Vol. 34. – Issue 3. – Pp. 309–326.
12. Касперски К. RISK vs. CISC / К. Касперски [Электронный ресурс]. – Компьютерра, 1999. – № 36 (314). – Режим доступа : <http://old.computerra.ru/1999/314/3211/>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 17.07.2015).
13. Орлов С. А. Организация ЭВМ и систем / С. А. Орлов, Б. Я. Цилькер. – СПб. : Питер, 2011. – 688 с.

Boris V. Sivko
Research laboratory
«Safety and Electromagnetic Compatibility of Technical Facilities»,
Belorussian State University of Transport, Gomel

Axiomatic-based approach for development of trustworthy and fault-tolerant systems

The article proposes an approach on the ground of axiomatic bases, that allows to formalize a solution of number of problems of development and verification of fault-tolerant and trustworthy systems. The article states the provisions and objectives of this axiomatic-based approach. It is shown that the approach is consistent with the experience of fault-tolerant and trustworthy systems engineering, and allows to improve its fault tolerance and safety, to carry out a comparison of system fault tolerance, to maintain the balance between the fault tolerance and the complexity of development and verification, to apply formal methods of prove, to formalize the integration of systems, to improve and to evaluate the level of diversity without the involvement of independent groups of developers and experts, and to formalized develop and verify system, detecting its own failures. Moreover, the approach makes it possible to solve the current problems of fault-tolerant and trustworthy systems, such as the formalization of methods for intraprocessor control, and of development of its realization conditions, as well as the proof of sufficiency of the diversity of developed and verifiable systems.

fault tolerance, safety proof, formal methods, formalization, diversity, failure detection

References

1. Leveson N. Safeware: System Safety and Computers. N. Y., Addison-Wesley, 1995, 680 p.
2. Smith D. J., Simpson Kenneth G. L. Safety Critical Systems Handbook. A Straightforward Guide to Functional Safety, IEC 61508 and Related Standards, Including Process IEC 61511 and Machinery IEC 62061 and ISO 13849. Oxford, UK, Elsevier Ltd, 2010, 270 p.
3. Bochkov K. A., Kovriga A. N., Kharlap S. N. Railway transport microprocessor automation systems : textbook. Gomel, BelGUT, 2013, 254 p.
4. Shubinsky I. B. Functional reliability of data systems. Methods of analysis. Ul'yanovsk, Publishing house «Nadezhnost'», 2012, 216 p.
5. Shubinsky I. B. Structural reliability of data systems. Methods of analysis. Ul'yanovsk, Printing office «Pechatny dvor», 2012, 216 p.
6. Weil V., Ferry B. Professional Responsibility for Harmful Actions. Kendall Hunt, Dubuque, Iowa, 1984, pp. 402–411.
7. Sagan S. D. The Limits of Safety : Organizations, Accidents, and Nuclear Weapons. N. Y., Princeton University Press, Princeton, 1993, 302 p.
8. Neumann P. G. Computer-Related Risks. N. Y., Addison-Wesley Professional, 1995, 384 p.

9. Sivko B. V. Diversity axiomatic bases for development of trustworthy and fault-tolerant systems. Bulletin of BelGUT, Science and transport (Nauka i transport), 2014, № 1 (28), pp. 19–23.
10. Smith D. J. Developments in the Use of Failure Rate Data and Reliability Prediction Methods for Hardware. Delft, Delft University of Technology, Aerospace Engineering, Dissertation, 2000, 175 p.
11. Parry G. W. Common Cause Failure Analysis: A Critique and Some Suggestions. Gaithersburg, Maryland, USA, Reliability Engineering and System Safety, 1991, vol. 34, Issue 3, pp. 309–326.
12. Kaspersky K. RISK vs. CISC [digital resource] : Komp'yuterra. 1999, № 36 (314). Electronic version of printed publication. Access mode : <http://old.computerra.ru/1999/314/3211/>, free. Title (accessed date : 17.07.2015).
13. Orlov S. A., Cil'ker B. Ya. Computer and system organization. St. Petersburg, Piter, 2011, 688 p.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Д. С. Марковым
Поступила в редакцию 08.04.2015, принята к публикации 23.06.2015*

СИВКО Борис Витальевич – инженер-программист, магистр технических наук, сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и ЭМС технических средств» Белорусского государственного университета транспорта.
e-mail: bsivko@gmail.com

© Сивко Б. В., 2015

Теоретические вопросы автоматики и информатики

УДК 681.518.5:004.052.32

**Д. В. Ефанов, канд. техн. наук,
В. В. Дмитриев**

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

БАЗИСЫ ДВОИЧНОЙ ЛОГИКИ

Дискретные устройства, синтезированные с использованием различных базисов двоичной логики, могут иметь различную сложность технической реализации в зависимости от технологии изготовления элементной базы. Какие из элементарных функций алгебры логики образуют базис, определяет теорема Поста – Яблонского. Однако возникает задача определения общего количества избыточных базисов, т. е. таких базисов, удаление из которых хотя бы одной функции нарушает их функциональную полноту. Эта задача интересна не только с математической точки зрения, но и с точки зрения разработчика – он может выбрать наиболее приемлемый способ технической реализации дискретного устройства из существующих способов. В данной работе рассматривается задача перечисления избыточных базисов классической двоичной логики. Приводятся формулы, определяющие соответствие между функциями основного базиса {И; ИЛИ; НЕ} и функциями избыточных базисов. Дается пример практического использования избыточных базисов для построения логических устройств автоматики.

булева функция; функционально полная система; базис; особый класс функций

Введение

При построении дискретных устройств автоматики и вычислительной техники часто используются различные функционально полные системы (базисы). Применение разнообразных базисов позволяет синтезировать различные по сложности логические схемы, реализующие одинаковые функции. Параметр сложности, в свою очередь, непосредственно связан с такими важными характеристиками дискретного устройства, как энергопотребление, быстродействие, тестопригодность и др. [1–8].

В данной работе определяются все избыточные базисы и устанавливается соответствие между функциями основного базиса {И; ИЛИ; НЕ} и функциями, входящими в каждый избыточный базис. Статья может быть полезной проектировщикам дискретных систем, знакомых с различными технологиями изготовления тех или иных логических элементов. Например, логические элементы основного базиса, реализованные по КМОП-технологии, имеют большее количество транзисторов, чем логические элементы {И-НЕ} и {ИЛИ-НЕ}, сами по себе являющиеся базисами [9]. Дискретное устройство может описываться даже более сложным логическим выражением, чем выражение, записанное в базисе {И; ИЛИ; НЕ}, но при этом иметь более простую техническую реализацию. Выбор базиса для синтеза дискретного устройства остается за разработчиком. Важно при этом знать зависимости для преобразования логических выражений, записанных в общеизвестном базисе {И; ИЛИ; НЕ}, в выражения, записанные в выбранном базисе. Результаты исследования, отраженные в статье, позволяют сделать это для любого избыточного базиса.

1 Базисы двоичной логики

1.1 Функции алгебры логики

Набор функций {И; ИЛИ; НЕ} является функционально полным, или базисом. Этот факт вытекает из наличия у любой функции стандартной формы записи: дизъюнктивной совершенной нормальной формы (ДСНФ) и конъюнктивной совершенной нормальной формы (КСНФ). Кроме того, этот факт также следует из теоремы Поста – Яблонского [10–12].

На практике для построения логических схем автоматики и вычислительной техники могут использоваться также другие базисы [13]. Возникает задача поиска наиболее оптимального базиса для построения конкретной логической схемы. При этом интересным представляется рассмотрение всех избыточных базисов.

В табл. 1 перечислены все элементарные функции алгебры логики (ФАЛ) от двух переменных. Используются следующие обозначения функций:

- 0 – константа нуля;
- & – логическое умножение (конъюнкция);
- Δ – запрет переменной;
- x_i – повторение переменной;
- \oplus – сложение по модулю два (неравнозначность, исключающее ИЛИ);
- \vee – логическое сложение (дизъюнкция);
- \downarrow – функция ИЛИ-НЕ (стрелка Пирса);
- \sim – эквивалентность (равнозначность);
- \neg – логическое отрицание (инверсия);

- \rightarrow – импликация;
 $|$ – функция И-НЕ (штрих Шеффера);
 1 – константа единицы.

Таблица 1. Таблицы истинности элементарных ФАЛ

x_1	x_2	f_0	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9	f_{10}	f_{11}	f_{12}	f_{13}	f_{14}	f_{15}
		0	&	Δ	x_1	Δ	x_2	\oplus	\vee	\downarrow	\sim	\neg	\rightarrow	\neg	\rightarrow	$ $	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1

Все ФАЛ можно разделить на три группы:

- 1) функции, не зависящие от переменных, – это функции f_0 и f_{15} ;
- 2) функции, зависящие от одной переменной, – это функции f_3, f_5, f_{10} и f_{12} ;
- 3) функции, зависящие от обеих переменных, – это функции $f_1, f_2, f_4, f_6, f_7, f_8, f_9, f_{11}, f_{13}$ и f_{14} .

Записывая ДСНФ или КСНФ для каждой элементарной ФАЛ, можно получить ее выражение через функции основного базиса. Если логическая схема реализована в базисе {И; ИЛИ; НЕ}, то при переходе к технической реализации ее в каком-либо другом базисе требуется выражение функций этого базиса через функции И, ИЛИ и НЕ. Решение этой задачи не является столь очевидным, как кажется на первый взгляд [14].

1.2 Особенности классов функций алгебры логики

Определим, сколько существует избыточных базисов. Для этого обратимся к особым классам ФАЛ.

Существует 5 особых классов ФАЛ:

1. Функции, сохраняющие ноль ($K0$), – к таким функциям относятся те функции, которые на нулевом наборе аргументов принимают значение, равное нулю: $f(0, 0, \dots, 0) = 0$.

2. Функции, сохраняющие единицу ($K1$), – к таким функциям относятся те функции, которые на единичном наборе аргументов принимают значение, равное единице: $f(1, 1, \dots, 1) = 1$.

3. Линейные функции (L) – те функции, которые могут быть представлены в виде $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = C_0 \oplus C_1 x_1 \oplus C_2 x_2 \oplus \dots \oplus C_n x_n$, где C_i – постоянные, принимающие значения 0 либо 1.

4. Монотонные функции (M) – функции, у которых для любых пар входных наборов $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ и $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$, таких, что $a_i \leq b_i$, имеет место неравенство: $f(A) \leq f(B)$.

5. Самодвойственные функции (S) – это функции, для которых выполняется равенство: $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(\overline{x_1}, \overline{x_2}, \dots, \overline{x_n})$.

Особенные классы ФАЛ эффективно используются при построении надежных систем автоматики и вычислительной техники [15–31].

В табл. 2 сведены все элементарные ФАЛ, знаком «×» отмечены те особенные классы, в которые входят соответствующие функции.

Таблица 2. Принадлежность элементарных функций к особым классам

Особенный класс функций алгебры логики	f_0 0	f_1 &	f_2 Δ	f_3 x_1	f_4 Δ	f_5 x_2	f_6 \oplus	f_7 \vee	f_8 \downarrow	f_9 \sim	f_{10} \neg	f_{11} \rightarrow	f_{12} \neg	f_{13} \rightarrow	f_{14} $ $	f_{15} 1
Сохраняющие 0	×	×	×	×	×	×	×	×								
Сохраняющие 1		×		×		×		×		×		×		×		×
Линейные	×			×		×	×			×	×		×			×
Монотонные	×	×		×		×		×								×
Самодвойственные				×		×					×		×			

На пяти особенных классах ФАЛ базируется теорема о функциональной полноте [10–12, 32].

Теорема Поста – Яблонского. Для того чтобы система функций $\{f_1, f_2, \dots, f_m\}$ была функционально полной, необходимо и достаточно, чтобы она содержала хотя бы одну функцию, не принадлежащую каждому из особенных классов ФАЛ, т. е. хотя бы одну функцию:

- не сохраняющую константу нуля;
- не сохраняющую константу единицы;
- нелинейную;
- немонотонную;
- несамодвойственную.

Будем рассматривать последовательно все неизбыточные базисы – от тех, которые содержат минимум ФАЛ, до содержащих максимальное их количество. Известно, что максимум ограничен четырьмя функциями [12].

1.3 Неизбыточные базисы

Используя табл. 2 и теорему Поста – Яблонского, получим все не избыточные базисы (табл. 3).

Таблица 3. Функционально полные избыточные наборы ФАЛ

№	Набор функций	Принадлежность к особому классу функций
1	\downarrow	$\downarrow \notin K0, K1, L, M, S$
2	$ $	$ \notin K0, K1, L, M, S$
3	$\rightarrow, 0$	$\rightarrow \notin K0, L, M, S;$ $0 \notin K1$
4	\rightarrow, Δ	$\rightarrow \notin K0, L, M, S;$ $\Delta \notin K1$
5	\rightarrow, \oplus	$\rightarrow \notin K0, L, M, S;$ $\oplus \notin K1$
6	\rightarrow, \neg	$\rightarrow \notin K0, L, M, S;$ $\neg \notin K1$
7	Δ, \sim	$\Delta \notin K1, L, M, S;$ $\sim \notin K0$
8	Δ, \neg	$\Delta \notin K1, L, M, S;$ $\neg \notin K0$
9	$\Delta, 1$	$\Delta \notin K1, L, M, S;$ $1 \notin K0$
10	\neg, \vee	$\& \notin S, L;$ $\neg \notin K0, K1, M$
11	$\neg, \&$	$\& \notin S, L;$ $\neg \notin K0, K1, M$
12	$\oplus, \&, \sim$	$\oplus \notin K1, M, S;$ $\& \notin L;$ $0 \notin K0$
13	$\oplus, \&, 1$	$\oplus \notin K1, M, S;$ $\& \notin L;$ $0 \notin K0$
14	\oplus, \vee, \sim	$\oplus \notin K1, M, S;$ $\vee \notin L;$ $0 \notin K0$
15	$\oplus, \vee, 1$	$\oplus \notin K1, M, S;$ $\vee \notin L;$ $0 \notin K0$
16	$\sim, \&, 0$	$\sim \notin K0, M, S;$ $\& \notin L;$ $0 \notin K1$
17	$\sim, \vee, 0$	$\sim \notin K0, M, S;$ $\vee \notin L;$ $0 \notin K1$

Для получения неизбыточных базисов удобно последовательно перебирать те наборы элементарных ФАЛ, которые входят как можно в меньшее количество особенных классов.

1. Функции-базисы.

Существует две функции, которые не входят ни в один особенный класс ФАЛ, – это функции И-НЕ и ИЛИ-НЕ. Каждая из них в отдельности образует базис. Добавление хотя бы одной из функций к этим базисам приведет к тому, что набор станет избыточным.

2. Функции, входящие только в один особенный класс ФАЛ.

Таких функций, так же как и функций-базисов, всего две – это запрет и импликация. Если предположить, что первой функцией базиса является импликация, то достаточно добавить к ней всего одну ФАЛ из перечисленных в табл. 2 функций, чтобы обе функции образовали базис. Вторая функция не должна входить в особенный класс, в который входит импликация. Таких функций (исключая И-НЕ и ИЛИ-НЕ) четыре: константа нуля, запрет, сложение по модулю два и инверсия.

Аналогично для функции запрета имеем следующие функции, с которыми она образует функционально полные наборы: эквивалентность, инверсия, импликация и константа единицы.

3. Функции, входящие в два особенных класса ФАЛ.

Функций, входящих в два класса ФАЛ, три: сложение по модулю два, эквивалентность и инверсия. Поиск функций, дополняющих их до базиса, более затруднен. Анализируя таблицу 2, мы убеждаемся, что добавление к функциям сложения по модулю два, эквивалентности и инверсии по одной функции не дает базиса, так как любые из не рассмотренных нами функций принадлежат хотя бы одному классу из тех, в которые входит рассматриваемая функция. Исключение составляет только инверсия, которая вместе с дизъюнкцией и конъюнкцией образует два базиса: $\{\neg, \vee\}$ и $\{\neg, \&\}$.

Инверсия – самодвойственная ФАЛ. Не входящими в этот класс из нерассмотренных являются только константа нуля, константа единицы, сложение по модулю два и эквивалентность. Анализ показывает, что нет новых неизбыточных базисов с функцией инверсии и четырьмя функциями, приведенными выше.

Рассмотрим функцию сложения по модулю два. Данная функция является линейной. Возьмем из не рассмотренных ранее все нелинейные функции. Это только логическое сложение и логическое умножение. Пусть вторая функция базиса – это логическое умножение, тогда имеем следующие неизбыточные базисы: $\{\oplus, \&, \sim\}$ и $\{\oplus, \&, 1\}$. Если вторая функция к функции сложения по модулю два – это функция логического сложения, тогда имеем базисы: $\{\oplus, \vee, \sim\}$ и $\{\oplus, \vee, 1\}$.

Аналогично рассмотренной выше функции сложения по модулю два рассмотрим двойственную к ней функцию эквивалентности. Она также линейна. Выберем из нерассмотренных ФАЛ все нелинейные – это также логическое сложение

и логическое умножение. К каждой из них для получения базиса необходимо прибавить функцию, не сохраняющую единицу, – это функции константы нуля и сложения по модулю два. Функция сложения по модулю два рассмотрена выше. Имеем еще два избыточных набора функций: $\{\sim, \&, 0\}$ и $\{\sim, \vee, 0\}$.

1.4 Выражения функций основного базиса через функции избыточных базисов

Приведем формулы, устанавливающие соответствие между функциями стандартного базиса и другими известными избыточными базисами.

При установлении соответствий часто будут использованы формулы де Моргана:

$$\begin{aligned} \overline{x_1 \vee x_2} &= \overline{x_1} \overline{x_2}; \\ \overline{x_1 x_2} &= \overline{x_1} \vee \overline{x_2}, \end{aligned} \quad (1)$$

а также закон двойного отрицания:

$$\overline{\overline{x}} = x. \quad (2)$$

1. Функции-базисы.

К данным функциям, как отмечено ранее, относятся функции И-НЕ и ИЛИ-НЕ. Выразим функции основного базиса в данных базисах:

$$\begin{cases} \overline{x} = x | x; \\ x_1 \vee x_2 = \overline{\overline{x_1} \cdot \overline{x_2}} = \overline{\overline{(x_1 | x_1)}(x_2 | x_2)}} = (x_1 | x_1) | (x_2 | x_2); \\ x_1 x_2 = \overline{\overline{x_1} | \overline{x_2}} = \overline{\overline{(x_1 | x_2)} | (x_1 | x_2)}}. \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \overline{x} = x \downarrow x; \\ x_1 \vee x_2 = \overline{\overline{x_1} \downarrow \overline{x_2}} = \overline{\overline{(x_1 \downarrow x_2)} \downarrow (x_1 \downarrow x_2)}}; \\ x_1 x_2 = \overline{\overline{x_1} \downarrow \overline{x_2}} = \overline{\overline{(x_1 \downarrow x_1)} \downarrow (x_2 \downarrow x_2)}} = (x_1 \downarrow x_1) \downarrow (x_2 \downarrow x_2). \end{cases} \quad (4)$$

2. Функции, входящие только в один особый класс ФАЛ.

Это функции запрета и импликации. Ясно, что если к одной из них добавить любую ФАЛ, не входящую в тот класс, в который уже входит рассматриваемая функция, мы получим базис.

Рассмотрим импликацию в качестве первой функции базиса. Добавляя к импликации последовательно функции инверсии, запрета, сложения по модулю два и константы нуля, можно получить следующие базисы: $\{\rightarrow, \neg\}$, $\{\rightarrow, \Delta\}$, $\{\rightarrow, \oplus\}$, $\{\rightarrow, 0\}$.

В следующих четырех системах приводится соответствие между функциями основного базиса и функциями перечисленных выше базисов. Для базиса $\{\rightarrow, \neg\}$ имеем:

$$\begin{cases} \bar{x}; \\ x_1 \vee x_2 = \bar{x}_1 \rightarrow x_2; \\ x_1 x_2 = \overline{x_1 x_2} = \overline{x_1 \vee x_2} = \overline{x_1 \rightarrow x_2}. \end{cases} \quad (5)$$

Для базиса $\{\rightarrow, \Delta\}$ имеем:

$$\begin{cases} \bar{x} = x \rightarrow (x \Delta x); \\ x_1 \vee x_2 = \bar{x}_1 \rightarrow x_2 = x_1 \rightarrow (x_1 \Delta x_1) \rightarrow x_2; \\ x_1 x_2 = \overline{x_1 x_2} = \overline{x_1 \vee x_2} = \overline{x_1 \rightarrow x_2} = \overline{x_1 \rightarrow (x_2 \rightarrow (x_2 \Delta x_2))} = \\ = \langle a = x_1 \rightarrow (x_2 \rightarrow (x_2 \Delta x_2)) \rangle = a \rightarrow (a \Delta a). \end{cases} \quad (6)$$

Для базиса $\{\rightarrow, \oplus\}$:

$$\begin{cases} \bar{x} = x \oplus (x \rightarrow x); \\ x_1 \vee x_2 = \bar{x}_1 \rightarrow x_2 = x_1 \oplus (x_1 \rightarrow x_1) \rightarrow x_2; \\ x_1 x_2 = \overline{x_1 x_2} = \overline{x_1 \vee x_2} = \overline{x_1 \rightarrow x_2} = \overline{x_1 \rightarrow (x_2 \oplus (x_2 \rightarrow x_2))} = \\ = \langle a = x_1 \rightarrow (x_2 \oplus (x_2 \rightarrow x_2)) \rangle = a \oplus (a \rightarrow a). \end{cases} \quad (7)$$

Для базиса $\{\rightarrow, 0\}$:

$$\begin{cases} \bar{x} = x \rightarrow 0; \\ x_1 \vee x_2 = \bar{x}_1 \rightarrow x_2 = x_1 \rightarrow 0 \rightarrow x_2; \\ x_1 x_2 = \overline{x_1 x_2} = \overline{x_1 \vee x_2} = \overline{x_1 \rightarrow x_2} = \overline{x_1 \rightarrow (x_2 \rightarrow 0)} = (x_1 \rightarrow (x_2 \rightarrow 0)) \rightarrow 0. \end{cases} \quad (8)$$

Положим, то в качестве первой функции базиса выступает функция запрета. Могут быть использованы следующие базисы: $\{\Delta, \neg\}$, $\{\Delta, \sim\}$, $\{\rightarrow, 1\}$. Базис $\{\Delta, \rightarrow\}$ рассмотрен выше.

Для базиса $\{\Delta, \neg\}$ имеем:

$$\begin{cases} \bar{x}; \\ x_1 x_2 = \overline{x_1 \Delta x_2}; \\ x_1 \vee x_2 = \overline{\overline{x_1 \vee x_2}} = \overline{\overline{x_1 x_2}} = \overline{x_1 \Delta x_2}. \end{cases} \quad (9)$$

Для базиса $\{\Delta, \sim\}$:

$$\begin{cases} \bar{x} = x \sim (x \Delta x); \\ x_1 x_2 = \overline{x_1 \Delta x_2} = x_1 \sim (x_1 \Delta x_1) \Delta x_2; \\ x_1 \vee x_2 = \overline{\overline{x_1 \vee x_2}} = \overline{\overline{x_1 x_2}} = \overline{x_1 \Delta x_2} = \overline{x_1 \Delta (x_2 \sim (x_2 \Delta x_2))} = \\ = \langle a = x_1 \Delta (x_2 \sim (x_2 \Delta x_2)) \rangle = a \sim (a \Delta a). \end{cases} \quad (10)$$

Для базиса $\{\Delta, 1\}$:

$$\begin{cases} \bar{x} = 1 \Delta x; \\ x_1 x_2 = \overline{x_1 \Delta x_2} = 1 \Delta x_1 \Delta x_2; \\ x_1 \vee x_2 = \overline{\overline{x_1 \vee x_2}} = \overline{\overline{x_1 x_2}} = \overline{x_1 \Delta x_2} = \overline{x_1 \Delta (1 \Delta x_2)} = 1 \Delta (x_1 \Delta (1 \Delta x_2)). \end{cases} \quad (11)$$

3. Функции, входящие в два особенных класса ФАЛ.

Таких функций три: инверсия, сложение по модулю два и равнозначность.

Наборы функций $\{\neg, \vee\}$ и $\{\neg, \&\}$ являются функционально полными, что следует из формул де Моргана:

$$\begin{cases} x_1 x_2; \\ \bar{x} = x \sim x x; \\ x_1 \vee x_2 = \overline{\overline{x_1 \vee x_2}} = \overline{\overline{x_1 x_2}} = \overline{(x_1 \sim x_1 x_1)(x_2 \sim x_2 x_2)} = \\ = \langle a = (x_1 \sim x_1 x_1)(x_2 \sim x_2 x_2) \rangle = a \sim a a. \end{cases} \quad (12)$$

Аналогично для базиса $\{\oplus, \&, 1\}$ имеем:

$$\begin{cases} x_1 x_2; \\ \bar{x} = x \oplus 1; \\ x_1 \vee x_2 = \overline{\overline{x_1 \vee x_2}} = \overline{\overline{x_1 x_2}} = \overline{(x_1 \oplus 1)(x_2 \oplus 1)} = (x_1 \oplus 1)(x_2 \oplus 1) \oplus 1 = x_1 \oplus x_2 \oplus x_1 x_2. \end{cases} \quad (13)$$

Для базисов $\{\oplus, \vee, \sim\}$ и $\{\oplus, \vee, 1\}$ имеем:

$$\begin{cases} x_1 \vee x_2; \\ \bar{x} = x \oplus (x \vee x); \\ x_1 x_2 = \overline{\overline{x_1 x_2}} = \overline{\overline{x_1 \vee x_2}} = \overline{(x_1 \oplus (x_1 \vee x_1))(x_2 \oplus (x_2 \vee x_2))} = \end{cases} \quad (14)$$

$$= \left\langle a = (x_1 \oplus (x_1 \vee x_1)) \overline{(x_1 \oplus (x_1 \vee x_1))(x_2 \oplus (x_2 \vee x_2))} \right\rangle = a \oplus (a \vee a); \quad (15)$$

$$\begin{cases} x_1 \vee x_2; \\ \bar{x} = x \oplus 1; \\ x_1 x_2 = \overline{\overline{x_1 x_2}} = \overline{\overline{x_1 \vee x_2}} = \overline{(x_1 \oplus 1) \vee (x_2 \oplus 1)} = ((x_1 \oplus 1) \vee (x_2 \oplus 1)) \oplus 1. \end{cases}$$

Для оставшихся базисов, $\{\sim, \&, 0\}$ и $\{\sim, \vee, 0\}$, получаем следующие соответствия с функциями основного базиса:

$$\begin{cases} x_1 x_2; \\ \bar{x} = x \sim 0; \\ x_1 \vee x_2 = \overline{\overline{x_1 \vee x_2}} = \overline{\overline{x_1 \cdot x_2}} = \overline{(x_1 \sim 0)(x_2 \sim 0)} = ((x_1 \sim 0)(x_2 \sim 0)) \sim 0; \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} x_1 \vee x_2; \\ \bar{x} = x \sim 0; \\ x_1 x_2 = \overline{\overline{x_1 x_2}} = \overline{\overline{x_1 \vee x_2}} = \overline{(x_1 \sim 0) \vee (x_2 \sim 0)} = ((x_1 \sim 0) \vee (x_2 \sim 0)) \sim 0. \end{cases} \quad (17)$$

Таким образом, для всех избыточных базисов нами получены выражения, определяющие связь между функциями основного базиса, и функциями, входящими в выбранный избыточный базис.

2 Пример использования различных базисов для построения схем автоматики и вычислительной техники

На примере устройства, реализующего память в конечном автомате [33, 34], покажем эффективность выбора вместо базиса $\{И; ИЛИ; НЕ\}$ базиса $\{ИЛИ-НЕ\}$.

Приведем логическую формулу работы асинхронного RS -триггера [10]:

$$y(t) = (S(t) \vee y(t-1)) \overline{R(t)}, \quad (18)$$

где S – вход установки триггера в единицу; R – вход сброса; y – выход триггера; t – текущий момент времени; $t - 1$ – предшествующий момент времени.

Опуская обозначения времени, приведем более упрощенную форму записи логической формулы работы асинхронного RS -триггера:

$$y = (S \vee y)\bar{R}. \quad (19)$$

Покажем, как меняется сложность технической реализации при построении схемы RS -триггера на примере двух известных базисов – $\{И; ИЛИ; НЕ\}$ и $\{ИЛИ-НЕ\}$. Используя элементы первого базиса, изобразим схему (рис. 1, а). Данная схема построена на трех логических элементах. При построении схемы в базисе $\{ИЛИ-НЕ\}$ преобразуем формулу (19) к виду [14]:

$$y = S \downarrow y \downarrow R. \quad (20)$$

На рис. 1, б приведена логическая схема триггера на элементах ИЛИ-НЕ. Для реализации потребовались два логических элемента. Другими словами, использование базиса $\{ИЛИ-НЕ\}$ взамен базиса $\{И; ИЛИ; НЕ\}$ упрощает структуру логической схемы рассматриваемого дискретного устройства.

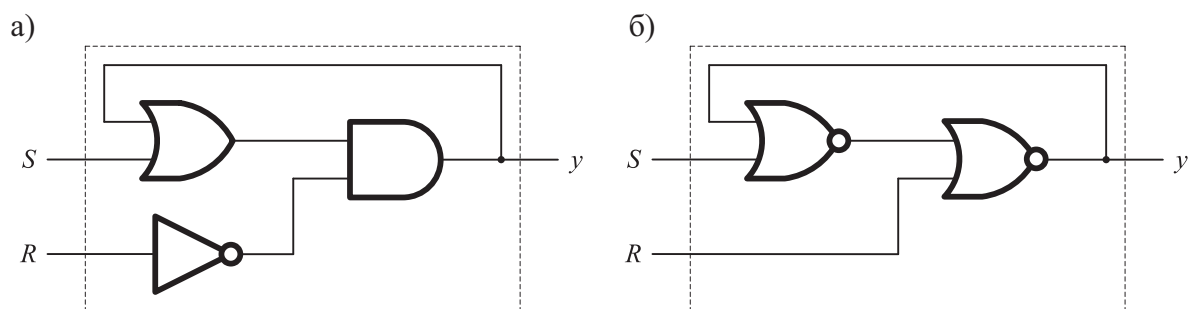


Рис. 1. Логическая схема асинхронного RS -триггера:
а – построенная в базисе $\{И; ИЛИ; НЕ\}$; б – построенная в базисе $\{ИЛИ-НЕ\}$

Пользуясь программным продуктом SIS [35–37], определим в библиотеке функциональных элементов stdcell2_2.genlib сложности структур, показанных на рис. 1. Сложность оценивается условным показателем площади, занимаемой устройством на кристалле микросхемы, в той или иной библиотеке. Результаты сведены в табл. 4.

В табл. 4 также приведены площади асинхронных RS -триггеров в базисах $\{И; ИЛИ; НЕ\}$ и $\{ИЛИ-НЕ\}$ – соответственно триггеры 1-го и 2-го типов. Эффективность использования базиса $\{ИЛИ-НЕ\}$ в сравнении с использованием базиса $\{И; ИЛИ; НЕ\}$ может быть оценена коэффициентом ε – отношением площадей триггеров 2-го и 1-го типов. Триггер 2-го типа занимает площадь более чем вдвое меньшую, чем триггер 1-го типа.

Таблица 4. Площади *RS*-триггеров в различных библиотеках

Элементы	Площадь в условных единицах
И (AND)	32
ИЛИ (OR)	64
НЕ (NOT)	16
ИЛИ-НЕ (NOR)	24
Элементы памяти	
<i>RS</i> -триггер 1-го типа	112
<i>RS</i> -триггер 2-го типа	48
ε	2,33

Заключение

Основной базис {И; ИЛИ; НЕ} часто используется для описания работы логических устройств автоматики и вычислительной техники. Однако в задачах синтеза аппаратных средств автоматики, реализующих различные функции алгебры логики, более простые структуры могут быть получены с использованием других функционально полных наборов.

В работе показано, что избыточных базисов двоичной логики существует не так уж и много, при этом они содержат от одной до трех функций. Функционально полные наборы получены полным перебором с использованием теоремы Поста – Яблонского: два базиса содержат по одной ФАЛ, девять – по две ФАЛ и шесть – по три ФАЛ. Для функций каждого базиса определены логические выражения, связывающие их с функциями основного базиса {И; ИЛИ; НЕ}, что может быть полезным разработчику устройств автоматики и вычислительной техники при реализации конкретного логического устройства с целью получения более простой его структуры, чем при реализации в основном базисе {И; ИЛИ; НЕ}.

Библиографический список

1. McCluskey E. J. Logic Design Principles : With Emphasis on Testable Semicustom Circuits / E. J. McCluskey. – N. Y. : Prentice Hall PTR, 1986. – 549 p.
2. Согомоян Е. С. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомоян, Е. В. Слабаков. – М. : Радио и связь, 1989. – 208 с.
3. Сапожников Вал. В. Самопроверяемые дискретные устройства / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – СПб. : Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.
4. Goessel M. Error Detection Circuits / M. Goessel, S. Graf. – L. : McGraw-Hill, 1994. – 261 p.

5. Abramovici M. Digital System Testing and Testable Design / M. Abramovici, M.A. Breuer, A. D. Friedman. – Comp. Sc. Press, 1998. – 652 p.
6. Fujiwara E. Code Design for Dependable Systems : Theory and Practical Applications / E. Fujiwara. – John Wiley & Sons, 2006. – 720 p.
7. Wang L-T. System-on-Chip Test Architectures : Nanometer Design for Testability / L.-T. Wang, C.E. Stroud, N.A. Touba. – Morgan Kaufmann Publishers, 2008. – 856 p.
8. Проектирование и верификация цифровых систем на кристаллах. Verilog & System Verilog / В.И. Хаханов, И.В. Хаханова, Е.И. Литвинова, О.А. Гузь. – Харьков : Новое слово, 2010. – 528 с.
9. Harris D. M. Digital Design and Computer Architecture / D. M. Harris, S. L. Harris. – N. Y. : Morgan Kaufman, 2013. – 569 p.
10. Сапожников Вал. В. Теория дискретных устройств железнодорожной автоматики, телемеханики и связи : учебник для вузов ж.-д. транспорта / Вал. В. Сапожников, Ю. А. Кравцов, Вл. В. Сапожников ; под ред. В. В. Сапожникова. – М. : УМК МПС, 2001. – 312 с.
11. Яблонский С. В. Введение в дискретную математику : учеб. пособие для вузов / С. В. Яблонский ; под ред. В. А. Садовничева. – 4-е изд., стер. – М. : Высшая школа, 2003. – 384 с.
12. Белоусов А. И. Дискретная математика : учебник для вузов / А. И. Белоусов, С. Б. Ткачев ; под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. – 3-е изд., стер. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 744 с.
13. Поспелов Д. А. Логические методы анализа и синтеза схем / Д. А. Поспелов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергия, 1974. – 368 с.
14. Дмитриев В. В. Синтез триггеров на базе теории конечных автоматов / В. В. Дмитриев, К. С. Кононов, А. С. Перский // Автоматика на транспорте. – 2015. – № 1. – С. 73–83.
15. Гессель М. Построение комбинационных самопроверяемых устройств с монотонно независимыми выходами / М. Гессель, А. А. Морозов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 1994. – № 7. – С. 148–160.
16. Busaba F. Y. Self-Checking Combinational Circuit Design for Single and Unidirectional Multibit Errors / F. Y. Busaba, P. K. Lala // Journal of Electronic Testing: Theory and Application. – 1994. – Issue 5. – Pp. 19–28.
17. Piestrak S. J. Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes / S. J. Piestrak. – Wrocław : Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995. – 111 p.
18. Saposhnikov Val. V. Design of Self-Checking Unidirectional Combinational Circuits with Low Area Overhead / Val. V. Saposhnikov, Vl. V. Saposhnikov, A. Morosov, M. Göessel // Proc. IEEE Int. On-Line Testing Workshop (IOLTW). – Biarritz, France, 1996. – Pp. 56–67.
19. Saposhnikov Vl. V. Self-Dual Parity Checking – A New Method for On-Line Testing / Vl. V. Saposhnikov, A. Dmitriev, M. Goessel, Val. V. Saposhnikov // 14th IEEE VLSI Test Symposium, Princeton, New Jersey, USA, April 28 – May 1, 1996. – Pp. 162–168.

20. Гессель М. Исследование комбинационных самопроверяемых устройств с независимыми и монотонно независимыми выходами / М. Гессель, А. А. Морозов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 1997. – № 2. – С. 180–193.
21. Сапожников Вал. В. Метод построения комбинационных самопроверяемых устройств с обнаружением всех одиночных неисправностей / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, М. Гессель, А. А. Морозов // Электронное моделирование. – 1998. – Т. 20. – № 6. – С. 70–80.
22. Morosov A. Self-Checking Combinational Circuits with Unidirectionally Independent Outputs / A. Morosov, Val. V. Saposhnikov, Vl. V. Saposhnikov, M. Goessel // VLSI Design. – 1998. – Vol. 5. – Issue 4. – Pp. 333–345.
23. Saposhnikov Val. V. A New Design Method for Self-Checking Unidirectional Combinational Circuits / Val. V. Saposhnikov, A. Morosov, Vl. V. Saposhnikov, M. Göessel // Journal of Electronic Testing: Theory and Application. – 1998. – Vol. 12. – Issue 1–2 (February / April). – Pp. 41–53.
24. Matrosova A. Yu. Self-Checking Synchronous FSM Network Design with Low Overhead / A. Yu. Matrosova, I. Levin, S. A. Ostanin // VLSI Design. – 2000. – Vol. 11. – Issue 1. – Pp. 47–58.
25. Сапожников Вал. В. Самодвойственные дискретные устройства / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, М. Гёссель. – СПб. : Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отделение, 2001. – 331 с.
26. Matrosova A. Survivable Self-Checking Sequential Circuits / A. Matrosova, I. Levin, S. Ostanin // Proc. of 2001 IEEE International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems (DFT 2001), Oct. 24–26, San Francisco, CA, 2001. – Pp. 395–402.
27. Гессель М. Логическое дополнение – новый метод контроля комбинационных схем / М. Гессель, А. В. Морозов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 1. – С. 167–176.
28. Сапожников Вал. В. Основы технической диагностики : учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – М. : Маршрут, 2004. – 318 с.
29. Сапожников Вал. В. Синтез самодвойственных дискретных систем / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Р. Ш. Валиев. – СПб. : Элмор, 2006. – 224 с.
30. Göessel M. New Methods of Concurrent Checking: Edition 1 / M. Göessel, V. Ocheretny, E. Sogomonyan, D. Marienfeld. – Dordrecht: Springer Science+Business Media B. V., 2008. – 184 p.
31. Lala P. K. An Introduction to Logic Circuit Testing / P. K. Lala. – USA, Arkansas, Texarkana : Morgan & Claypool Publishers, 2009. – 99 p.
32. Закревский А. Д. Логические основы проектирования дискретных устройств / А. Д. Закревский, Ю. В. Поттосин, Л. Д. Черемисинова. – М. : Физматлит, 2007. – 592 с.
33. Matrosova A. Yu. Selection of the flip-flops for partial enhanced scan techniques / A. Yu. Matrosova, A. V. Melnikov, R. V. Mukhamedov, S. A. Ostanin, V. Singh // Вест-

- ник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2012. – № 2. – С. 112–120.
34. Беннетс Р. Дж. Проектирование тестопригодных логических схем / Р. Дж. Беннетс. – М.: Радио и связь, 1990. – 176 с.
 35. Sentovich E. M. SIS: A System for Sequential Circuit Synthesis / E. M. Sentovich, K. J. Singh, L. Lavagno, C. Moon, R. Murgai, A. Saldanha, H. Savoj, P. R. Stephan, R. K. Brayton, A. Sangiovanni-Vincentelli // Electronics Research Laboratory, Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of California, Berkeley, 4 May 1992. – 45 p.
 36. Gopalakrishan P. Direct Transistor-Level Layout for Digital Blocks / P. Gopalakrishan, R. A. Rutenbar. – Boston : Kluwer Academic Publishers, 2004. – 125 p.
 37. Бибило П. Н. Логическое проектирование дискретных устройств с использованием продукционно-фреймовой модели представления знаний / П. Н. Бибило, В. И. Романов. – Минск : Беларус. навука, 2011. – 279 с.

*Efanov Dmitry V.,
Dmitriev Vyacheslav V.*
«Automation and Remote Control on Railways» department
Petersburg state transport university

Binary logic bases

Digital devices synthesized with the use of different binary logic bases could have different complexity depending on the component base technology. The Post-Yablonsky theorem defines which elementary boolean functions form basis. But there is a task to determine the common number of not redundant bases, i. e. bases which lose their functionally completeness if any function was removed. This problem is interesting not from mathematical point of view only, but from the side of developer too – he could choose the most acceptable way of implementation. The task of enumeration of all not redundant bases of classical binary logic is considered. Authors adduce formulas of correspondence between primary basis {AND; OR; NOT} and functions of stated bases. Also authors adduce an example of implementation of not redundant bases for logical circuit design.

boolean function; functionally complete system; basis; special class of functions

Reference

1. McCluskey E. J. Logic Design Principles: With Emphasis on Testable Semicustom Circuits. N. Y., Prentice Hall PTR, 1986, 549 p.
2. Sogomonyan E. S., Slabakov E. V. Self-checking devices and failover systems. Moscow, Radio & Communication, 1989, 208 p.

3. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. Self-checking digital devices. St. Petersburg, Energoatomizdat, 1992, 224 p.
4. Goessel M., Graf S. Error Detection Circuits. L., McGraw-Hill, 1994, 261 p.
5. Abramovici M., Breuer M. A., Friedman A. D. Digital System Testing and Testable Design. Comp. Sc. Press, 1998, 652 p.
6. Fujiwara E. Code Design for Dependable Systems : Theory and Practical Applications. John Wiley & Sons, 2006, 720 p.
7. Wang L.-T., Stroud C. E., Toubia N. A. System-on-Chip Test Architectures : Nanometer Design for Testability. Morgan Kaufmann Publishers, 2008, 856 p.
8. Hahanov V. I., Hahanova I. V., Litvinova E. I., Guz O. A. Design and verification of digital SoC. Verilog & System Verilog. Kharkov, New word, 2010, 528 p.
9. Harris D. M., Harris S. L. Digital Design and Computer Architecture. N. Y., Morgan Kaufman, 2013, 569 p.
10. Sapozhnikov Val. V., Kravtsov Yu. A., Sapozhnikov Vl. V. Theory of digital devices of railway automation, remote control and communication. Textbook for railway high school. Moscow, UMK MPS, 2001, 312 p.
11. Yablonsky S. V. Introduction in discrete mathematics: Tutorial for high school. Eds. V. A. Sadovnichev. Moscow, High School, 2003, 384 p.
12. Belousov A. I., Tkachev S. B. Discrete mathematics. Textbook for high school. Eds. V. S. Zarubina, A. P. Krischenko. Moscow, Bauman MSTU, 2004, 744 p.
13. Pospelov D. A. Logical methods of analysis and synthesis of circuits. Moscow, Energy, 1974, 368 p.
14. Dmitriev V. V., Kononov K. S., Persky A. S. Synthesis of flip-flops based on finite state machines theory. Automation on transport, 2015, vol. 1, pp. 73–83.
15. Goessel M., Morozov A. A., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. Formation of combinational self-checking devices with monotonically independent outputs. Automation & Remote Control, 1994, № 7, pp. 148–160.
16. Busaba F. Y., Lala P. K. Self-Checking Combinational Circuit Design for Single and Unidirectional Multibit Errors. Journal of Electronic Testing: Theory and Application, 1994, Issue 5, pp. 19–28.
17. Piestrak S. J. Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995, 111 p.
18. Saposhnikov Val. V., Saposhnikov Vl. V., Morosov A., Göessel M. Design of Self-Checking Unidirectional Combinational Circuits with Low Area Overhead. Proc. IEEE Int. On-Line Testing Workshop (IOLTW), Biarritz, France, 1996, pp. 56–67.
19. Saposhnikov Vl. V., Dmitriev A., Goessel M., Saposhnikov Val. V. Self-Dual Parity Checking – A New Method for On-Line Testing. 14th IEEE VLSI Test Symposium, Princeton, N. J., USA, April 28 – May 1, 1996, pp. 162–168.
20. Goessel M., Morozov A. A., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. Research of combinational self-checking devices with independent and monotonically independent outputs. Automation & Remote Control, 1997, № 2, pp. 180–193.
21. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Goessel M., Morozov A. A. Method of formation of combinational self-checking devices with detection of all single faults. Electronic Modeling, 1998, vol. 20, № 6, pp. 70–80.

22. Morosov A., Saposhnikov Val. V., Saposhnikov Vl. V., Goessel M. Self-Checking Combinational Circuits with Unidirectionally Independent Outputs. VLSI Design, 1998, vol. 5, Issue 4, pp. 333–345.
23. Saposhnikov Val. V., Morosov A., Saposhnikov Vl. V., Göessel M. A New Design Method for Self-Checking Unidirectional Combinational Circuits. Journal of Electronic Testing: Theory and Application, 1998, vol. 12, Issue 1–2 (February / April), pp. 41–53.
24. Matrosova A. Yu., Levin I., Ostanin S. A. Self-Checking Synchronous FSM Network Design with Low Overhead. VLSI Design, 2000, vol. 11, Issue 1, pp. 47–58.
25. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Goessel M. Self-dual discrete devices. St. Petersburg, Energoatomizdat, St. Petersburg department, 2001, 331 p.
26. Matrosova A., Levin I., Ostanin S. Survivable Self-Checking Sequential Circuits. Proc. of 2001 IEEE International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems (DFT 2001), Oct. 24–26, San Francisco, CA, 2001, pp. 395–402.
27. Goessel M., Morozov A. V., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. Logical addition – new method of combinational circuit test. Automation & Remote Control, 2003, № 1, pp. 167–176.
28. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. Base of technical diagnostics. Tutorial for railway high school. Moscow, Marshrut, 2004, 318 p.
29. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Valiev R. Sh. Synthesis of self-dual digital systems. St. Petersburg, Elmor, 2006, 224 p.
30. Göessel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., Marienfeld D. New Methods of Concurrent Checking: Edition 1. Dordrecht, Springer Science+Business Media B. V., 2008, 184 p.
31. Lala P. K. An Introduction to Logic Circuit Testing. USA, Arkansas, Texarkana, Morgan & Claypool Publishers, 2009, 99 p.
32. Zakrevsky A. D., Pottosin Yu. V., Cheremisinova L. D. Logical base of digital device design. Moscow, Fizmathlit, 2007, 592 p.
33. Matrosova A. Yu., Melnikov A. V., Mukhamedov R. V., Ostanin S. A., Singh V. Selection of the flip-flops for partial enhanced scan techniques. Tomsk State University Journal of Control and Computer Science, 2012, № 2, pp. 112–120.
34. Bennets R. Dzh. Design of testable logical circuits. Moscow, Radio & Communication, 1990, 176 p.
35. Sentovich E. M., Singh K. J., Lavagno L., Moon C., Murgai R., Saldanha A., Savoj H., Stephan P. R., Brayton R. K., Sangiovanni-Vincentelli A. SIS: A System for Sequential Circuit Synthesis. Electronics Research Laboratory, Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of California, Berkeley, 4 May 1992, 45 p.
36. Gopalakrishnan P., Rutenbar R. A. Direct Transistor-Level Layout for Digital Blocks. Boston, Kluwer Academic Publishers, 2004, 125 p.
37. Bibilo P. N., Romanov V. I. Logical design of digital devices with the use of production-frame model of knowledge representation. Minsk, Belorusskaja Nauka, 2011, 279 p.

Статья представлена к публикации членом редколлегии

Вал. В. Сапожниковым

Поступила в редакцию 06.05.2015, принята к публикации 02.06.2015

ЕФАНОВ Дмитрий Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

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

ДМИТРИЕВ Вячеслав Владимирович – ассистент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

e-mail: webus@pisem.net

© Ефанов Д. В., Дмитриев В. В., 2015

Электронное моделирование

УДК 004.021+656.25

**П. Е. Булавский, д-р техн. наук,
Д. С. Марков, канд. техн. наук,
В. Б. Соколов, канд. техн. наук,
Т. Ю. Константинова, канд. техн. наук**

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

ФОРМАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

В статье рассмотрены задачи синтеза алгоритмического отображения систем обеспечения жизненного цикла железнодорожной автоматики и телемеханики как сложных систем массового обслуживания. Принято, что алгоритмическое отображение представляется в виде алгоритмов обслуживания заявок, должно формализоваться на языке параллельных логических схем алгоритмов (ПЛСА) и использоваться в качестве основы имитационных моделей сложных систем массового обслуживания. Показана целесообразность синтеза объединенного алгоритма обслуживания заявок. Дано определение объединенного алгоритма обслуживания заявок. Разработан метод объединения алгоритмов, основанный на построении матрицы вхождений элементов исходного алфавита ПЛСА, анализе разбиений по ее составляющим, позволяющий синтезировать объединенный алгоритм обслуживания заявок при однократном вхождении элементов исходного алфавита, минимальном количестве разделительных логических условий и минимизированном количестве разделительных логических условий. Применение предложенного метода объединения алгоритмов позволяет сократить объем имитационных моделей и соответственно количества ошибок в моделирующей программе.

системы обеспечения жизненного цикла железнодорожной автоматики и телемеханики; сложные системы массового обслуживания; имитационное моделирование; алгоритм обслуживания заявок; объединенный алгоритм; матрица вхождений; разделительные логические условия

Введение

Жизненный цикл железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) – это совокупность взаимосвязанных, последовательно выполняемых процессов от формирования концепции безопасности и исходных требований к устройству или системе железнодорожной автоматики и телемеханики до вывода из экс-

платации и утилизации. Жизненный цикл ЖАТ включает следующие основные процессы:

- разработка концепции безопасности и соответствующих документов;
- разработка аппаратно-программных решений и конструкторско-технической документации;
- доказательство безопасности принятых технических, программных решений и сертификация на безопасность;
- тиражирование – проектирование аппаратных и программных средств ЖАТ для конкретных объектов железнодорожного транспорта;
- изготовление аппаратно-программных средств ЖАТ по проекту;
- выполнение пусконаладочных работ на объекте, проведение соответствующих испытаний и приемка в эксплуатацию;
- техническая эксплуатация и модернизация ЖАТ в процессе эксплуатации;
- выполнение процедур вывода ЖАТ из эксплуатации и утилизации.

Безопасность и бесперебойность движения поездов определяются не только потребительскими свойствами, показателями безотказности и безопасности ЖАТ как изделий, но и в определяющей степени качеством систем обеспечения жизненного цикла (СОЖЦ) ЖАТ, к которым относятся:

- комплекс методов и инструментальных средств доказательства безопасности ЖАТ [1–3];
- системы автоматизированного проектирования (САПР) ЖАТ [4, 5];
- системы диагностирования и удаленного мониторинга (СДУМ) технического состояния ЖАТ [6–9];
- системы электронного документооборота технической документации ЖАТ [10–12];
- автоматизированные системы управления хозяйством автоматики и телемеханики – АСУ-Ш [13].

Разработка и модернизация СОЖЦ ЖАТ представляют собой непрерывные процессы принятия и реализации сложных системотехнических решений, включающие методы и средства оценки их эффективности. В [14, 15] показано, что процессы, выполняемые СОЖЦ, относятся к дискретным в непрерывном времени, а СОЖЦ представляют собой сложные системы массового обслуживания (ССМО). В качестве методов и средств оценки эффективности применяются методы имитационного моделирования и имитационные модели (ИМ) [14, 16]. В качестве инструментального средства реализации ИМ СОЖЦ ЖАТ традиционно используется моделирующая среда GPSS World [17].

1 Основные положения

В [18] 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.

В данной работе рассматривается алгоритмическое описание процессов обслуживания заявок, которое, в соответствии с [15], является основой синтеза имитационных моделей СОЖЦ ЖАТ. В качестве заявок, в зависимости от вида СОЖЦ ЖАТ, выступают: комплекты технических документов, информационные сообщения, задачи по экспертизе или проектированию систем и т. п. В [15] для алгоритмического отображения СОЖЦ ЖАТ предложено использовать язык параллельных логических схем алгоритмов (ПЛСА). При этом алфавит ПЛСА СОЖЦ ЖАТ включает следующие элементы: операторы $o_i, i=1, I$ и логические условия: ждущие $q_k, Q \in; k=1, K$; собственные $g_s, s=1, S$; вероятностные $\alpha_n, n=1, N$; операторы распараллеливания $R \uparrow^p$; объединения $\downarrow^p \&$ и тождественно-ложного логического условия $w \uparrow^p$. Правила записи ПЛСА с использованием предложенного алфавита изложены в [19].

Для алгоритмического отображения СОЖЦ ЖАТ как ССМО характерно большое количество вхождений операторов $o_i, i=1, I$ и логических условий $q_k, k=1, K$; $g_s, s=1, S$; $\alpha_n, n=1, N$ при сравнительно небольшом количестве их типов. В связи с этим целесообразно поставить задачу сокращения вхождения однотипных операторов и логических условий в алгоритмическое описание ССМО. Задача решается в целях сокращения объема, времени подготовки и отладки модели, количества ошибок в моделирующей программе, увеличения быстродействия GPSS-моделей. Для решения необходимо объединить алгоритмы обслуживания заявок A_j (АОЗ).

ССМО обслуживает множество заявок $h_j \in H, j=1, J$ различного типа. Тип заявки h_j идентифицируется по выполняемому АОЗ. Каждая заявка обслуживается по своему алгоритму $A_j, j=1, J$, формализованная запись которого реализуется на ПЛСА с использованием предложенной выше символики: O, Q, G, A , т. е. описывает АОЗ в терминах операторов, соответствующих операциям, выполняемым ССМО.

В дальнейшем в тех случаях, когда не требуется различать типы членов алфавита, они обозначаются $z_\beta, \beta=1, B$, где B – общее количество элементов описания АОЗ. При объединении АОЗ необходимо учитывать, что после выполнения какого-либо z_β в различных алгоритмах $A_j, j=1, J$ могут выполняться неодинаковые последовательности элементов. Для определения порядка выполнения элементов в объединенном алгоритме A_o при обслуживании заявок различного типа $h_j, j=1$ вводятся дополнительные разделительные логические условия (РЛУ) – r . РЛУ ставятся в A_o после элемента z_β , образуя дерево проверок, число

выходов которого равно количеству неодинаковых элементов, выполняемых в различных $A_j, j=1, J$ после z_{β} . Тип заявки j определяет элемент, который должен выполняться в алгоритме A_o после элемента z_{β} , и, следовательно, РЛУ представляет собой булеву функцию от типа заявок $-f(j)$. Для записи такой функции вводятся булевы переменные вида:

$$x_1 = \begin{cases} 1 - \text{если } j = 1; \\ 0 - \text{если } j \neq 1; \end{cases} x_2 = \begin{cases} 1 - \text{если } j = 2; \\ 0 - \text{если } j \neq 2; \end{cases} x_J = \begin{cases} 1 - \text{если } j = J; \\ 0 - \text{если } j \neq J. \end{cases} \quad (1)$$

Тогда $f(j)=f(x_j)$ в РЛУ записывается в виде:

$$r = \begin{cases} 1 - \text{если } f(x_j) = 1; \\ 0 - \text{если } f(x_j) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

С учетом введенных понятий формулируется определение объединенного алгоритма A_o .

Определение. Объединенным называется алгоритм A_o , отвечающий следующим условиям:

- любой элемент алфавита $(O, Q, G, A) A_j, j=1, J$ входит в ПЛСА A_o и притом только один раз;
- если в функции $f(x_j)$ ПЛСА A_o , включающий РЛУ, подставить конкретное значение j , то последовательность выполнения элементов алфавита O, Q, G, A будет соответствовать ПЛСА A_j .

Таким образом, задачей объединения АОЗ является синтез алгоритма A_o , отвечающего указанным условиям.

2 Метод объединения алгоритмов обслуживания заявок

Очевидно, что метод объединения АОЗ должен учитывать особенности алгоритмического отображения ССМО и его использования в качестве основы построения GPSS-модели:

- наличие параллельных ветвей и соответственно операторов их разделения и объединения;
- одновременное присутствие в модели множества заявок, находящихся на различных стадиях выполнения АОЗ;
- наличие в логических узлах A_o РЛУ, определяющих маршрут обслуживания заявки h_j с помощью анализа значений логических условий $r=f(x_j)$.

Очевидно, что проверки дополнительных логических условий приводят к усложнению модели. Поэтому в результате объединения АОЗ необходимо

получить алгоритм A_o , отвечающий вышеприведенному определению при минимальном количестве вхождений РЛУ.

Известные методы объединения алгоритмов (метод преобразования и минимизации системы скобочных формул перехода [20] и метод кодирования входных переменных микропрограммного автомата [19]) предназначены для решения задач синтеза микропрограммных автоматов и не учитывают указанных выше особенностей АОЗ.

Кодирование входных переменных в [19] производится в предположении неизменности состояния входа микропрограммного автомата во время выполнения алгоритма, заданного соответствующим входным набором, тогда как в модели может одновременно обрабатываться множество различных заявок. При этом параллельно должны выполняться различные АОЗ, кодируемые разными состояниями входных переменных. Количество входных переменных определяется по числу объединяемых алгоритмов и, исходя из этого, минимизируется вхождение переменных в объединенный алгоритм.

Для построения GPSS-модели, в связи с требованием сокращения затрат времени на проведение имитационного эксперимента (ИЭ), количество входных переменных или РЛУ должно определяться прежде всего из условия минимальности числа их вхождений. При этом допустима избыточность типов РЛУ, т. е. РЛУ, в которых проверяются различные функции $f(x_j)$.

На основе анализа определяется необходимость разработки метода объединения АОЗ, учитывающего изложенные выше требования.

Основой предлагаемого метода объединения алгоритмов является анализ свойств разбиений Π на множестве A ($A_j \in A, j=1, J$) объединяемых алгоритмов, позволяющий определить количество, расстановку РЛУ r_m в A_o и состав функций $f(x_j)$ для каждого $r_m, m = \overline{1, M}$.

Членами разбиения $\Pi_{z_\beta}, \beta=1, B$ являются индексы типов заявок (j) алгоритмов $A_j, j=1, J$, включающих элемент z_β . Для определения и анализа Π_{z_β} построим матрицу вхождений $M[E, J]$, где E – количество столбцов, а J – строк матрицы. Количество столбцов матрицы определяется по выражению $E = \Xi + E_q + 2(E_g + E_\alpha)$, где Ξ – количество операторов множества O ; E_q, E_g, E_α – количество ждущих, собственно логических и вероятных условий используемых в описании A_o . Столбцы матрицы помечаются элементами описания A_o , причем для каждого вероятностного и собственно логического условия выделяются два столбца, один из которых предназначен для последователей α_n, g_s при истинном значении, а другой – при ложном. Членами $m_{e,j}, e=1, E, j=1, J$ матрицы $M[E, J]$ являются элементы $z_\beta, \beta=1, B$. На пересечении j -й строки e -го столбца, помеченного элементом z_β , записывается последователь z_β в j -м алгоритме. Наличие параллельных ветвей A_j при построении $M[E, J]$ учитывается следующим образом. Если последователем z_β в j -м алгоритме является оператор распараллеливания $R \uparrow^p$, то в качестве $m_{e,j}$ записывается этот оператор и его последователи, т. е. начальные элементы соответствующих параллельных ветвей. Если последо-

вателем z_β в j -м алгоритме является оператор объединения $\downarrow^p \&$, то в качестве $m_{e,j}$ записывается этот оператор и его последователь. Оператор $\downarrow^p \&$ записывается для всех элементов z_β , являющихся конечными в объединяемых им параллельных ветвях j -го алгоритма. При наличии неодинаковых начальных элементов в АОЗ первый столбец матрицы вхождений помечается фиктивным оператором o^n , который условно принимается начальным для всех $A_j, j=1, J$. В случае, если оператор является конечным, в качестве его последователя записывается фиктивный конечный оператор o^k .

Матрица вхождений позволяет построить разбиения Π_{z_β} для всех $z_\beta, \beta=\overline{1, B}$, входящих в J объединяемых алгоритмов. Причем $\Pi_{z_\beta} = \{a_1, a_2, \dots, a_\sigma, a_\chi\}$, где $a_1, a_2, \dots, a_\sigma, a_\chi$ – блоки разбиения. Для определения состава блоков достаточно проанализировать столбцы матрицы вхождений. Номера строк j , имеющих одинаковые элементы $m_{e,j}$ в e -м столбце, составляют блок a_σ разбиения Π_{z_β} для z_β , которым помечен данный столбец. Множество блоков, получаемых по e -му столбцу, образуют разбиение Π_{z_β} . По разбиению Π_{z_β} однозначно определяется количество проверок, т. е. вхождений r_m в A_o после выполнения элемента z_β . Это количество равно $\chi - 1$, где χ – число блоков в разбиении. Аналогично строятся разбиения по всем $e=1, E$ столбцам матрицы вхождений. Очевидно, что количество блоков по всем полученным разбиениям однозначно определяет общее количество вхождений МРЛУ r_m в алгоритм A_o , которое является минимальным для данных J , объединяемых в АОЗ. Количество вхождений РЛУ в A_o определяется по следующему выражению:

$$M = \sum_{\xi} (s_b - 1) + \sum_k (s_q - 1) + \sum_s (s_g - 1) + \sum_s (s_{-g} - 1) + \sum_n (s_\alpha - 1) + \sum_n (s_{-\alpha} - 1), \quad (3)$$

где $s_b, s_q, s_g, s_{-g}, s_\alpha, s_{-\alpha}$ – соответственно количество блоков нетривиальных разбиений [19] по всем z_β с учетом разбиений для элементов g, α при их истинном (s_g, s_α) и ложном ($s_{-g}, s_{-\alpha}$) значениях.

Анализ разбиений Π_{z_β} позволяет определить состав логических функций $f(x_j)$, проверяемых в каждом РЛУ $r_m, m=1, M$. Элементами функций $f(x_j)$ являются переменные x_j , имеющие индекс j тех алгоритмов A_j , которые входят в один блок разбиения Π_{z_β} . Пусть, например, $\Pi_{z_\beta} = \{1, 2, 3; 4, 5; 10; 12, 14\}$, где $\alpha_1=1, 2, 3, \alpha_2=4, 5, \alpha_3=10, \alpha_4=12, 14, \chi=4$. Тогда, после реализации элемента z_β , необходимо проверить $\chi - 1$, т. е. три РЛУ – r_1, r_2, r_3 , которые образуют дерево проверок (рис. 1). Функция $f(x_j)$ в этом случае имеет следующий вид:

$$fr_1 = x_4 \vee x_5, \quad fr_2 = x_{10}, \quad fr_3 = x_{12} \vee x_{14}, \quad (4)$$

при этом

$$\begin{aligned}
 r_1 &= \begin{cases} 1 - \text{если } f_{r_1} = 1 (j = 4 \text{ или } 5); \\ 0 - \text{если } f_{r_1} = 0; \end{cases} \\
 r_2 &= \begin{cases} 1 - \text{если } f_{r_2} = 1 (j = 10); \\ 0 - \text{если } f_{r_2} = 0; \end{cases} \\
 r_3 &= \begin{cases} 1 - \text{если } f_{r_3} = 1 (j = 12 \text{ или } 14); \\ 0 - \text{если } f_{r_3} = 0. \end{cases}
 \end{aligned} \tag{5}$$

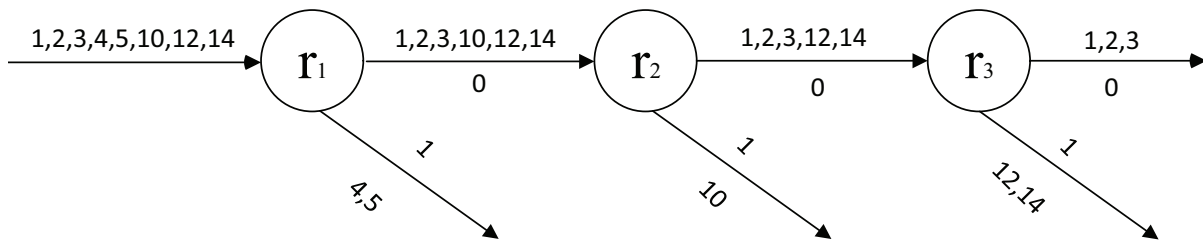


Рис. 1. Дерево проверок для РЛУ r_1, r_2, r_3

Аналогичным образом определяются логические функции $f(x_j)$ для всех нетривиальных разбиений $\Pi_{z\beta}$, полученных по матрице вхождений.

Далее проанализируем полученное множество функций $f(x_j)$ с целью уменьшения их количества. Пусть имеются два двухблочных разбиения: $\Pi_{z_1} = \{1, 2; 5, 7, 8\}$ и $\Pi_{z_2} = \{1, 2; 7, 8, 9, 10\}$. После выполнения z_1 и z_2 следует проверить по одному РЛУ – r_1 и r_2 . При этом в r_1 могут проверяться две функции – $f_{r_1} = x_1 \vee x_2$ или $f_{r_1} = x_5 \vee x_7 \vee x_8$. Аналогично для r_2 : $f_{r_2} = x_1 \vee x_2$ или $f_{r_2} = x_7 \vee x_8 \vee x_9 \vee x_{10}$. Очевидно, что в обоих случаях целесообразно использовать одну и ту же функцию $f_r = x_1 \vee x_2$. Аналогичные рассуждения могут быть справедливы для разбиений Π , имеющих большее количество блоков. Тогда для сокращения набора проверяемых функций по всем $r_m, m = 1, M$ достаточно выявить в $\Pi_{z\beta}, \beta = 1, B$ одинаковые блоки и использовать их для построения функций $f(x_j)$. Кроме того, сокращение количества $f(x_j)$ достигается с помощью анализа не полностью определенных разбиений $\Pi_{z\beta}$, блоки которых содержат не все J -е номера объединенных алгоритмов.

Пусть имеются два разбиения $\Pi_{z_4} = \{1, 2, 3, 4; 5, 6\}$ и $\Pi_{z_5} = \{1, 4; 10, 12\}$. После выполнения z_4 и z_5 проверяется по одному РЛУ – r_4 и r_5 .

В r_4 могут проверяться две функции – $f_{r_4} = x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee x_4$ или $f_{r_4} = x_5 \vee x_6$, а в r_5 – $f_{r_5} = x_1 \vee x_4$ или $f_{r_5} = x_{10} \vee x_{12}$. РЛУ r_4 и r_5 образуют вершины проверок, приведенные на рис. 2.

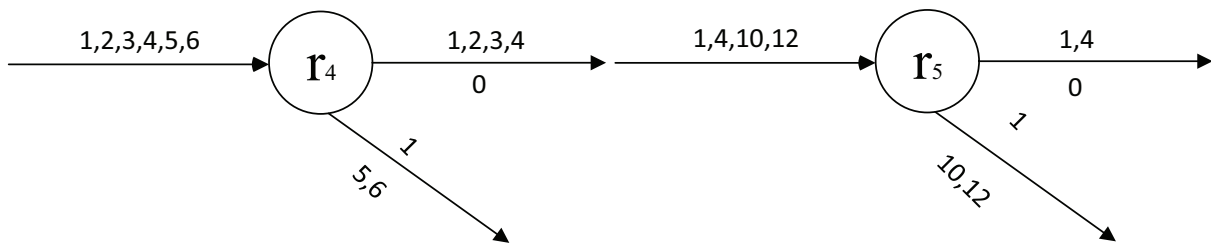


Рис. 2. Вершины проверок для РЛУ r_4, r_5

Дополним разбиение Π_{z_5} , включив в первый блок переменные x_2 и x_3 . Сделать это позволяет то обстоятельство, что в узел r_5 заявки с $j = 2$ или $j = 3$ не попадают, так как маршрут их обработки проходит по другим элементам z_β . Тогда в r_4 и r_5 достаточно проверить одну и ту же функцию $f_r = x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee x_4$. При этом r_5 образует проверку вида, показанного на рис. 3.

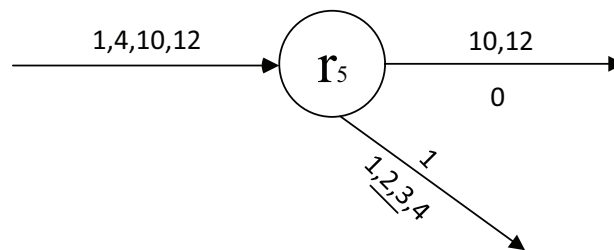


Рис. 3. Вершина проверок для РЛУ r_5 после добавления переменных x_2 и x_3

Для сокращения набора проверяемых $f(x_j)$ с учетом указанного положения достаточно проанализировать не полностью определенные разбиения по всем столбцам матрицы вхождений $e = \overline{1, E}$, выявить возможность дополнения блоков и использовать их для построения соответствующих функций.

Таким образом, полученные матрицы вхождений $M[E, J]$, разбиения Π по всем столбцам $e = \overline{1, E}$ и набор функций $f(x_j)$ дают возможность построить объединенную ПЛСА A_o при однократном вхождении элементов $z_\beta, \beta = \overline{1, B}$, минимальном количестве M проверок $r_m, m = \overline{1, M}$ и сокращенном наборе функций $f(x_j)$.

Для построения объединенной ПЛСА алгоритма A_o выписывается элемент z_1 , которым помечен первый столбец матрицы $M[E, J]$. Таким элементом может быть фиктивный оператор o^n или начальный элемент, одинаковый для всех алгоритмов $A_j, j = \overline{1, J}$. По разбиению Π_{z_1} и набору функций $f(x_j)$ определяются РЛУ r_m и соответствующие им функции $f_{r_m}(x_j)$. Полученные РЛУ записываются в ПЛСА A_o после элемента z_1 . Нумерация РЛУ и стрелок осуществляется по мере их записи в ПЛСА. Далее, по матрице $M[E, J]$ выписывается элемент, выполняемый после z_1 при истинном значении полученных РЛУ. Для этого элемента выполняются операции определения и записи в ПЛСА соответствующих РЛУ и функций $f(x_j)$. Указанные процедуры повторяются до записи в ПЛСА конечного элемента o^k . Затем по матрице $M[E, J]$ вписывается элемент, выполняющийся

после z_1 , при ложном значении первого РЛУ. Если этот элемент был выписан на предыдущем шаге, то переход к нему осуществляется по стрелке, которая приписана данному РЛУ. Далее переходим к элементу, который выполняется при истинном значении первого и ложном второго РЛУ, и т. д. Запись членов ПЛСА продолжается до тех пор, пока не будут перебраны все элементы, которыми помечены столбцы матрицы $M[E, J]$, а также все РЛУ, полученные на предыдущих шагах при их ложном значении. Если последователем элемента является оператор распараллеливания $R\uparrow^p$, то он выписывается в ПЛСА со своим номером, а его стрелке (\uparrow^p) присваивается очередной по порядку номер. Начальные члены параллельных ветвей, образуемых $R\uparrow^p$, выписываются в процессе построения A_o последовательно и перед каждым ставится стрелка с тем же значением индекса p . Для каждого начального члена параллельной ветви осуществляются процедуры определения последователей и РЛУ, аналогично описанным выше. После элемента, являющегося последним, в параллельной ветви, объединяемой оператором $\downarrow^p\&$ (такой элемент в матрице $M[E, J]$ помечается символом $\&$), в ПЛСА при соответствующих значениях РЛУ записывается тождественно ложное логическое условие $w\uparrow^p$, заканчивающее параллельную ветвь. Если последователем элемента является оператор объединения $\downarrow^p\&$, то в ПЛСА записывается этот оператор и его последователь, для которого также повторяются указанные ранее процедуры. Оператор объединения помечается стрелкой \downarrow^p с тем же значением индекса p , которые имеют стрелки тождественно ложных логических условий $w\uparrow^p$, заканчивающих соответствующие параллельные ветви.

В результате указанных процедур синтезируется объединенная ПЛСА A_o при однократном вхождении элементов z_β , минимальном количестве проверок r_m , $m=1, M$ и сокращенном наборе функций $f(x_j)$.

Заключение

Жизненный цикл сложных систем [21], к которым относятся СОЖЦ ЖАТ [22], включает следующие основные стадии:

- формулировка проблемы;
- определение целей исследования;
- выбор парадигмы моделирования;
- постановка задач моделирования;
- синтез концептуальной модели и формализованной схемы исследуемой системы;
- выбор инструментальных средств построения имитационной модели (ИМ);
- определение требований к ИМ;
- разработка моделирующей программы;
- планирование и выполнение контрольных экспериментов;

- проведение экспертизы выполнения всех стадий разработки и данных контрольных экспериментов – верификация ИМ [23];
- заключение по результатам верификации ИМ;
- оформление программной документации;
- архивирование моделирующей программы в соответствующих фондах алгоритмов и программ.

Проведение исследований с использованием разработанной ИМ предполагает реализацию процедур ее валидации для конкретных приложений и выполнение указанных выше стадий жизненного цикла ИМ. Следует отметить, что метод имитационного моделирования не структурирован, что затрудняет как разработку, так и выполнение процедур верификации ИМ СОЖЦ ЖАТ и валидации приложений. В связи с этим актуальной является задача структуризации ИМ в конкретной предметной области – СОЖЦ ЖАТ. Использование в качестве базы алгоритмического отображения СОЖЦ ЖАТ позволяет структурировать ИМ за счет формализации АОЗ на языке ПЛСА, что обеспечивает возможности контроля полноты и корректности алгоритмов, а также их формальных преобразований. В данной работе рассмотрены задачи и методы формализации и формальных преобразований алгоритмического отображения СОЖЦ ЖАТ.

Полученные результаты:

- сформулированы требования к алгоритмическому описанию СОЖЦ ЖАТ как ССМО;
- формализованное описание АОЗ предложено выполнять на языке ПЛСА, обеспечивающего возможность сокращения общего количества элементов описания алгоритмов;
- разработан метод алгоритмического описания ССМО на основе анализа разбиений по матрице вхождений элементов ПЛСА в АОЗ, позволяющий минимизировать количество разделительных логических условий, логических функций при однократном вхождении элементов исходного алфавита;
- предложенный метод объединения АОЗ позволяет сократить объем алгоритмического отображения ССМО, а следовательно, объем GPSS-модели и количество ошибок в ней.

Перспективы:

- разработка алгоритма синтеза объединенного АОЗ;
- разработка методики оценки эффективности объединения АОЗ на основе анализа количества вхождений элементов исходного алфавита ПЛСА в A_j и суммарного количества вхождений элементов исходного алфавита ПЛСА и РЛУ в объединенный алгоритм;
- разработка компьютерной программы объединения АОЗ на основе предложенного метода с принятием решений по критерию минимального количества вхождений элементов исходного алфавита и РЛУ в алгоритмическое описание ССМО.

Библиографический список

1. Сапожников Вл. В. Доказательство безопасности систем ж.-д. автоматики / Вл. В. Сапожников, О. А. Наседкин // Наука и транспорт. – 2006. – С. 10–13.
2. Наседкин О. А. Особенности испытания МПУ ЖАТ / О. А. Наседкин, Е. В. Ледеяев // Автоматика связь, информатика. – 2012. – № 7. – С. 30–32.
3. Васильев Д. А. Экспертная программа для проведения испытаний технологического программного обеспечения систем микропроцессорной централизации / Д. А. Васильев, С. В. Гизлер, О. А. Наседкин, М. П. Шайфер // Развитие элементной базы и совершенствование методов построения устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : сб. науч. тр. ; под. ред. Вл. В. Сапожникова. – СПб. : ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2014. – С. 39–42.
4. Насонов Г. Ф. Автоматизированная система мониторинга проектирования, производства, строительства и проведения пусконаладочных работ по системам СЦБ / Г. Ф. Насонов, М. Н. Василенко, П. Е. Булавский // Транспорт Российской Федерации. – 2010. – № 3. – С. 46–49.
5. Василенко М. Н. Автоматизированная система экспертизы схемных решений железнодорожной автоматики и телемеханики / М. Н. Василенко, А. М. Горбачев, Д. В. Зуев, Е. В. Григорьев // Транспорт Российской Федерации. – 2011. – № 5. – С. 64–67.
6. Молодцов В. П. Системы диспетчерского контроля и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : учеб. пособие / В. П. Молодцов, А. А. Иванов. – СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2010. – 140 с.
7. Ефанов Д. В. Обеспечение безопасности движения за счет технического диагностирования и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / Д. В. Ефанов, П. А. Плеханов // Транспорт Урала. – 2011. – № 3. – С. 44–48.
8. 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.
9. Ефанов Д. В. Некоторые аспекты развития систем функционального контроля устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / Д. В. Ефанов // Транспорт Урала. – 2015. – № 1. – С. 35–40.
10. Тележенко Т. А. Автоматизированная система экспертизы схемных решений ЖАТ / Т. А. Тележенко // Автоматика, связь, информатика. – 2009. – № 5. – С. 24–26.
11. Василенко М. Н. Электронный документооборот в хозяйстве СЦБ / М. Н. Василенко, В. Г. Трохов, Д. В. Зуев // Автоматика, связь, информатика. – 2014. – № 8. – С. 2–3.
12. Василенко М. Н. Развитие электронного документооборота в хозяйстве АТ / М. Н. Василенко, В. Г. Трохов, Д. В. Зуев, Д. В. Седых // Автоматика, связь, информатика. – 2015. – № 1. – С. 14–16.
13. Нестеров В. В. Развитие систем СТДМ, АСУ-Ш-2 и АОС-ШЧ / В. В. Нестеров // Автоматика, связь, информатика. – 2012. – № 12. – С. 45–46.
14. Информационные технологии : учебник для вузов / Б. Я. Советов, В. В. Цехановский. – М. : Высшая школа, 2003. – 263 с.

15. Булавский П. Е. Матричный метод формализации имитационных моделей сложных систем массового обслуживания / П. Е. Булавский, Д. С. Марков // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2010. – № 4. – С. 186–195.
16. Алиев Т. И. Основы моделирования дискретных систем / Т. И. Алиев. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2009. – 363 с.
17. GPSSWORLD. Основы имитационного моделирования различных систем / Е. М. Кудрявцев. – М. : ДМК Пресс, 2004. – 317 с.
18. 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. ; под ред. Вл. В. Сапожникова. – СПб. : ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2014. – С. 43–47.
19. Синтез управляющих автоматов / В. Г. Лазарев, Е. И. Пийль. – М. : Энергия, 1984. – 408 с.
20. Дьяченко В. Ф. Управление на сетях связи / В. Ф. Дьяченко, В. Г. Лазарев, Г. Г. Саввин. – М. : Наука, 1967. – 223 с.
21. Balci O. Verification, validation and accreditation / O. Balci // Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference, Washington, DC, USA, December 13–16, Piscataway, NJ, 1998. – Pp. 41–48.
22. Шаманов В. И. Управление процессом модернизации комплексов систем железнодорожной автоматики и телемеханики / В. И. Шаманов // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1. – № 3. – С. 237–250.
23. Carson J. S. Model verification and validation / J. S. Carson // Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference, San Diego, CA, USA, December 08–11, 2002. – Pp. 52–58.

Bulavskij Petr E.,

Markov Dmitry S.,

Sokolov Vadim B.,

Konstantinova Tatjana Yu.

«Automation and Remote Control on Railways» department
Petersburg state transport university

Formalisation of algorithmic description of systems of railway automation and remote control life cycle provision

This paper is devoted to the problem of synthesis of algorithmic reflection of railway automation and remote control life cycle as complex queuing system (CQS). It is accepted that algorithmic reflection is presented as request service algorithm (RSA), it should be formalised on PLSA language and used as the base for simulation models (SM) of CQS. Expediency of synthesis of united RSA is shown. The definition of united RSA is given. Authors offer the method of algorithm union based on formation of occurrence matrix

of basic PLSA alphabet, analysis of its fragmentation, that allows to synthesize the united RSA with occurring once of basic PLSA alphabet elements, minimum number of separation logical conditions and minimized number of dividing logical conditions logical functions. Implementation of offered method of alorythm union allows to reduce the amount of SM and therefore the number of errors in simulation software.

railway automation and remote control life cycle provision systems; complex queuing systems; simulation modeling; request service alorythm; united alorythm; occurrence matrix; separation logical conditions

Reference

1. Sapozhnikov V.I., Nasedkin O.A. Safety proof of railway automation systems. *Science & Transport*, 2006, pp. 10–13.
2. Nasedkin O.A., Lediaev E.V. Features of test of computer based railway automation and remote control devices. *Automatics, Communication, Informatics*, 2012, № 7, pp. 30–32.
3. Vasiljev D.A., Gizler S.V., Nasedkin O.A., Shaipher M.P. Expert software for testing technology software of computer based interlocking. Component base development and railway automation and remote control devices design methods improvement; eds. V.I. Sapozhnikov. St. Petersburg, PSTU, 2014, pp. 39–42.
4. Nasonov G.F., Vasilenko M.N., Bulavsky P.E. Automated system for the monitoring of railway signaling systems design, manufacturing, construction and commissioning. *Transport RF*, 2010, № 3, pp. 46–49.
5. Vasilenko M.N., Gorbacev A.M., Zuev D.V., Grigorjev E.V. Automated system for the examination of railway automation and remote control schematics. *Transport RF*, 2011, № 5, pp. 64–67.
6. Molodtsov V.P., Ivanov A.A. Supervisory and monitoring systems of railway automation and remote control devices. St. Petersburg, PSTU, 2010, 140 p.
7. Efanov D.V., Plekhanov P.A. Traffic safety provision by technical diagnostics and monitoring of railway automation and remote control devices. *Ural Transport*, 2011, № 3, pp. 44–48.
8. Lykov A.A., Efanov D.V., Vlasenko S.V. Technical diagnostics and monitoring of railway automation and remote control. *Transport RF*, 2012, № 5, pp. 67–72.
9. Efanov D.V. Some aspects of concurrent error detection systems of railway automation and remote control devices development. *Ural Transport*, 2015, № 1, pp. 35–40.
10. Telezhenko T.A. Automated system for the examination of railway automation and remote control schematics. *Automatics, Communication, Informatics*, 2009, № 5, pp. 24–26.
11. Vasilenko M.N., Trohov V.G., Zuev D.V. Electronic document management in railway signaling. *Automatics, Communication, Informatics*, 2014, № 8, pp. 2–3.
12. Vasilenko M.N., Trohov V.G., Zuev D.V., Sedych D.V. Development of electronic document management in railway automation and remote control. *Automatics, Communication, Informatics*, 2015, № 1, pp. 14–16.

13. Nesterov V. V. Development of STDM, ASU-Sch-2 and AOS-SchCh systems. *Automatics, Communication, Informatics*, 2012, № 12, pp. 45–46.
14. Sovetov B. Ya., Tsehanovsky V. V. *Information technology*. Moscow, High School, 2003, 263 p.
15. Bulavsky P. E., Markov D. S. The matrix method of complex queuing system simulation models formalization. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2010, № 4, pp. 186–195.
16. Aliev T. I. *Basics of digital systems modeling*. St. Petersburg, ITMO University, 2009, 363 p.
17. Kudryavtsev E. M. *GPSSWORLD. Basics of different systems modeling*. Moscow, DMK Press, 2004, 317 p.
18. Markov D. S., Sokolov V. B. The method of portion modeling of transport queuing systems. *Component base development and railway automation and remote control devices design methods improvement*; eds. Vl. V. Sapozhnikov. St. Petersburg, PSTU, 2014, pp. 43–47.
19. Lazarev V. G., Pijil E. I. *Synthesis of regulatory finite state machines*. Moscow, Energia, 1984, 408 p.
20. Djachenko V. F., Lazarev V. G., Savvin G. G. *Control in communication network*. Moscow, Nauka, 1967, 223 p.
21. Balci O. Verification, validation and accreditation. *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*, Washington, DC, USA, December 13–16, Piscataway, N. J., 1998, pp. 41–48.
22. Shamanov V. I. Control of railway automation and remote control system complexes modernization process. *Automation on Transport*, 2015, vol. 1, № 3, pp. 237–250.
23. Carson J. S. Model verification and validation. *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, San Diego, CA, USA, December 08–11, 2002, pp. 52–58.

*Представлена к публикации членом редколлегии Вал. В. Сапожниковым
Поступила в редакцию 01.09.2015, принята к публикации 24.09.2015*

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

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

КОНСТАНТИНОВА Татьяна Юрьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

e-mail: at-tanya@mail.ru

© Булавский П. Е., 2015

© Марков Д. С., 2015

© Соколов В. Б., 2015

© Константинова Т. Ю., 2015

Из истории автоматике

УДК 656.25

А. Б. Никитин, д-р техн. наук

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

НАУЧНАЯ ШКОЛА КАФЕДРЫ «АВТОМАТИКА И ТЕЛЕМЕХАНИКА НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ» ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ ИМПЕРАТОРА АЛЕКСАНДРА I

К 85-летию кафедры (1930–2015 гг.)

В статье рассмотрены основные этапы становления кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» и развития систем обеспечения безопасности движения поездов, связанных с научными исследованиями ученых кафедры. Ретроспективный анализ показывает, что все новые достижения специалистов и ученых кафедры получили практическую реализацию. Исторические этапы развития систем автоматике от релейной техники до современных микропроцессорных систем прошли при участии ведущих ученых. Сформировавшаяся научная школа оказала влияние и на методические основы теоретических дисциплин, преподаваемых на кафедре. Особое внимание уделено анализу подготовки научных кадров высшей квалификации. В рамках данной работы произведен краткий обзор влияния разработок кафедры на работу железнодорожного транспорта и формирование научных школ в других вузах и отраслевых институтах. Кроме того, рассмотрены вопросы состояния и перспектив разработок научных лабораторий и центров кафедры.

механическая централизация; релейная централизация; сигнализация; диспетчерская централизация; микропроцессорная централизация; учебная программа; учебная лаборатория; научно-исследовательская лаборатория; системы автоматизированного управления; безопасный автомат

Становление железных дорог России тесно связано с Институтом корпуса инженеров путей сообщения, ныне Петербургским государственным университетом путей сообщения, который был учрежден указом императора Александра I 3 декабря 1809 г. В 1835 г. профессор института П. П. Мельников опубликовал книгу «О железных дорогах», в которой технически и экономически обосновал необходимость создания железнодорожной сети в России. Именно он возглавил

строительство железнодорожной магистрали Санкт-Петербург – Москва, введенной в эксплуатацию в 1851 г., и был первым министром путей сообщения России.

Рост промышленности и сельского хозяйства России к концу XIX в. вызвал значительное увеличение протяженности железных дорог и интенсивности железнодорожных перевозок. Данные тенденции привели к существенному усложнению процессов регулирования движения поездов и управления стрелками и сигналами. Технические средства, предназначенные для решения этих задач, усложнялись и должны были обеспечить увеличение пропускной способности железных дорог, безопасность движения и облегчение труда оперативных работников. В это время на железнодорожном транспорте появляется новая специальность, которая получила название «Сигнализация, централизация и блокировка» (СЦБ). Основы данной специальности, как научной и учебной дисциплины, были заложены профессорами университета Я. Н. Гордеенко (1851–1922), Н. О. Рогинским (1883–1963), Н. В. Лупалом (1883–1966).

Профессор Яков Николаевич Гордеенко, крупный ученый, инженер и изобретатель, является основоположником специальности СЦБ в России. Он создал первую отечественную систему механической централизации с жесткими тягами, которая была внедрена в 1884 г. В этих системах впервые предусматривались стрелочные замыкатели. К концу XIX в. этой централизацией было оборудовано 1700 стрелок – больше, чем другими системами вместе взятыми.

В 1906 г. профессор Я. Н. Гордеенко применил в механической централизации гибкие тяги, обосновал переход от систем без принудительных замыканий к механическим, что явилось важным этапом развития техники СЦБ. Следующим этапом было применение электромеханических замыканий, которые также были применены в системах Я. Н. Гордеенко.

В 1882 г. профессор Я. Н. Гордеенко впервые ввел в курс лекций «Железные дороги» раздел по железнодорожной сигнализации. Эту дату можно считать началом преподавания новой учебной дисциплины «Сигнализация, централизация и блокировка». В это время под руководством Я. Н. Гордеенко начинают выполняться отдельными студентами первые дипломные проекты по СЦБ.

В университете в 1895 г. была защищена и первая диссертация по СЦБ – «О центральных устройствах по управлению стрелками и сигналами на русских железных дорогах». Ее автор – инженер Сергей Демьянович Карейша (1854–1934), в дальнейшем профессор, заведующий кафедрой «Железные дороги», выдающийся ученый и педагог.

Профессор Николай Осипович Рогинский организовал в Петербургском электротехническом институте первую учебную лабораторию СЦБ при кафедре «Электрические телеграфы». В 1925 г. на базе этой лаборатории открывается специализация «СЦБ и связь» с выпуском небольшого количества инженеров. Преподавание ведется под руководством Н. О. Рогинского, а основные разделы специализации читают Н. В. Лупал и Н. А. Магский.

В 1922 г. Н. О. Рогинский опубликовал первый учебник по СЦБ – «Железнодорожная сигнализация и обеспечение безопасности движения» [1]; он руководил разработкой и проектированием механизированных горок. Первая механизированная горка была оборудована на станции Красный Лиман. Разработка оказалась настолько эффективной, что к 1940 г. на дорогах было уже оборудовано 36 горок, что составляло 68% от общего числа. Написанная Н. О. Рогинским книга «Механизация сортировочных горок», издававшаяся в 1935, 1938 и 1949 гг., долгие годы была классическим трудом для специалистов по СЦБ.

В Ленинградском институте путей сообщения лаборатория СЦБ была организована в 1928 г., где основы этой дисциплины изучались студентами-движенцами.

В 1930–1931 гг., после создания на базе его водных, воздушных и автодорожных факультетов самостоятельных высших учебных заведений, институт получил название Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта (ЛИИЖТ). В это же время здесь открывается специальность СЦБ и организуется кафедра «Сигнализация, централизация и блокировка», которой заведовал профессор Н. В. Лупал. Кафедра первой в стране начала систематическую подготовку специалистов по СЦБ и уже в 1934 г. состоялся первый выпуск 17 инженеров [2].

В июне 1937 г. на базе факультета СЦБ и связи ЛИИЖТа был организован Ленинградский электротехнический институт инженеров сигнализации и связи ЛЭТИ-ИСС (с 1950 г. ЛЭТИИЖТ), который стал основными высшим учебным заведением страны, готовящим кадры для отрасли. На факультете СЦБ ЛЭТИ-ИССа были организованы кафедры «Электрическая централизация» и «Автоблокировка» (заведующие кафедрами соответственно Н. В. Лупал и М. И. Влодавский).

В годы Великой Отечественной войны институт эвакуируется в г. Алма-Ату. Здесь создается объединенная кафедра СЦБ, которая, кроме учебного процесса, выполняет научные исследования в помощь фронтовым железным дорогам. После возвращения в 1945 г. института в родные стены кафедры вновь развелись. Преподаватели и студенты стали приводить в порядок помещения и сохранившееся после блокады оборудование, но учебный процесс и исследовательская работа продолжают практически без перерыва. С 1945 по 1954 г. выпуск инженеров «эсцбистов» увеличился почти до 150 человек в год. Кроме того, была организована трехгодичная инженерная подготовка для техников-производственников.

В 1949 г. специальность СЦБ стала называться «Автоматика и телемеханика на железных дорогах», а кафедры соответственно «Автоматика и телемеханика на станциях» и «Автоматика и телемеханика на перегонах».

В 1954 г. ЛЭТИИЖТ вошел в состав ЛИИЖТа и стал его электротехническим факультетом. Специалисты по железнодорожной автоматике были объединены в составе кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах», название

которой сохранилось до настоящего времени. До 1960 г. ею руководил профессор Н. В. Лупал. Впоследствии заведующими кафедрой были А. А. Эйлер (1960–1961 гг.), А. С. Переборов (1961–1986 гг.), В. Ю. Ефимов (1986–1991 гг.) и Вл. В. Сапожников (1991–2014 гг.). С февраля 2014 г. кафедрой заведует автор этой статьи.

За 30 лет на кафедре под руководством профессора Н. В. Лупала было выполнено большое количество научно-исследовательских работ, оказавших существенное влияние на развитие техники СЦБ в России. Основное направление научной деятельности кафедры в 30-х гг. XX в. можно сформулировать как исследования, направленные на отказ от механических замыканий, уменьшение роли электромеханических замыканий и переход к релейным зависимостям. Подобно тому, как деятельность профессора Я. Н. Гордеенко определила переход от систем без принудительных замыканий к механическим системам, исследования Н. В. Лупала и сотрудников кафедр во многом определили принципы перехода от механических систем к релейным (в этом состоял следующим этап развития СЦБ).

Работы Н. В. Лупала принадлежали в основном области релейных систем электрической централизации. Первой установкой чисто релейной централизации в стране стала централизация на станции Гудермес (1934), построенная по идеям и схемам Н. В. Лупала. Под руководством или при участии и консультировании сотрудников кафедры в это время разрабатывались и внедрялись многие первые системы СЦБ – релейная централизация с местными зависимостями и местным питанием (доцент А. Д. Шумилов, 1936 г., Октябрьская и Ярославская дороги); первые проекты отечественной трехзначной автоблокировки (доцент Н. М. Неугасов, 1931 г.); первая система диспетчерской централизации ДВК (доцент А. Д. Шумилов, 1936 г., участок Люберцы – Куровская).

Большой заслугой Н. В. Лупала явилось также то, что под его руководством на кафедре были разработаны первые учебные планы для подготовки инженеров СЦБ, учебные программы и созданы учебные лаборатории.

В 30-х гг. профессор Н. В. Лупал опубликовал первые учебники: «Основы оптической сигнализации» (1933), «Электрическая централизация стрелок и сигналов» (1934), «Диспетчерская централизация и СЦБ на сортировочных горках» (1934), «Аппаратура электрической централизации и блокировки» (1935), «Электрическая централизация без ящика зависимости» (1937), «Диспетчерская централизация» (1939).

К наиболее важным научным исследованиям, выполненным на кафедре после возвращения ЛЭТИИИС в Ленинград в период 1945–1954 гг., следует отнести разработку новых систем диспетчерской централизации (проф. Н. В. Лупал, доц. А. А. Павлов), станционных систем с кодовым управлением (доценты А. С. Переборов, А. А. Эйлер, А. Д. Шумилов), стрелочных электроприводов с бесконтактным контролем (доценты В. Н. Седов, И. Н. Чупятов), реле с уменьшенным расходом меди (доценты П. Н. Веревкин, А. В. Смирнова), новых рельсовых

цепей автоблокировки (доценты М. И. Влодавский, Н. Ф. Котляренко, М. И. Босин).

В 1961 г. кафедру возглавил профессор А. С. Переборов. С этого времени основным научным направлением кафедры было исследование возможности применения бесконтактных элементов в устройствах железнодорожной автоматики и телемеханики. Сотрудники и аспиранты исследовали с этой точки зрения транзисторы, тиристоры, лампы с холодным катодом, феррит-транзисторные модули, герконы, струйные элементы и др. В это время появляются первые полупроводниковые системы.

Несколько позднее на кафедре стало развиваться новое научное направление, связанное с работой научно-исследовательской лаборатории «Организация технического обслуживания систем автоматики, телемеханики и связи». Лабораторией разрабатывались научно-обоснованные мероприятия по организации производственной базы дистанции, новым принципам организации труда, внедрения прогрессивных технологий.

В 1960–1980 гг. на кафедре был выполнен ряд крупных научных и практических разработок, имевших важное значение для отрасли.

Разработаны методы расчета полупроводниковых логических элементов и на базе них создана одна из первых в стране серия унифицированных логических элементов ЛИИЖТа (выпускалась Новгородским радиотехническим заводом в 1962–1967 гг.). Эта серия содержала логические элементы ИЛИ-НЕ, усилители и триггеры, с помощью которых на кафедре были построены первые бесконтактные системы железнодорожной автоматики (СЖАТ). Разработана и внедрена на станциях Резекне Прибалтийской ж. д. (1968) и Обухово Октябрьской ж. д. (1969) первая отечественная полупроводниковая система станционной автоматики – бесконтактный маршрутный набор. Система предназначалась для работы совместно с исполнительной группой электрической централизации. Аппаратура на ст. Обухово проработала 30 лет практически без обслуживания и явилась первым опытом создания необслуживаемых бесконтактных систем.

Разработана первая электронная система телемеханики ЦРС с передачей ответственных приказов, внедрена на ст. Кочетовка и Каменка Юго-Восточной ж. д. в 1970 г. В системе был использован циклический распределительный принцип передачи информации с накоплением сообщений.

Осуществлен первый опыт создания электронной централизации стрелок и сигналов (исполнительной группы) на феррит-транзисторных модулях. Система прошла испытание на ст. Новый Петергоф в 1972 г. Для построения безопасных схем здесь впервые было предложено использовать принципы пространственного и временного парафазного кодирования логических сигналов. Эти принципы широко используются при построении современных безопасных микропроцессорных СЖАТ [3–5].

Разработана система горочно-программно-задающего устройства на базе видеотерминала (ГПЗУ-В). Система внедрена на двенадцати станциях семи железнодорожных дорог в 1976–1991 гг.

Разработаны теоретические основы построения электромагнитного вагонного замедлителя. Испытания опытных образцов прошли на Октябрьской ж. д. в 1969–1981 гг.

В 80-х гг. массовое общесетевое внедрение получили разработанные на кафедре импульсное реле автоблокировки ИВГ, схемы управления стрелочными электродвигателями переменного тока, бесконтактные устройства кодовой автоблокировки и бесконтактный коммутатор тока.

Проведены комплексные исследования в области надежности СЖАТ. В 1967 г. опубликована первая монография на эту тему: «Надежность железнодорожной автоматики и телемеханики», автор – Королев А. И. [6].

Созданы основы теории синтеза безопасных схем. Впервые дана формулировка задачи синтеза безопасного автомата на абстрактном языке (языке регулярных выражений), определено понятие опасного отказа и доказаны основные теоремы [7, 8].

В многочисленных статьях 70–80-х гг. и монографиях профессоров Сапожниковых [9–14] развита теория построения самопроверяемых дискретных систем.

С начала 1990-х гг. основное научное направление работы кафедры состоит в широких фундаментальных исследованиях в области теории построения надежных, безопасных и контролепригодных систем и прикладных работах по созданию и внедрению на железнодорожном транспорте микропроцессорных и компьютерных систем автоматики и телемеханики.

В 1997 г. был образован Центр компьютерных железнодорожных технологий. В состав центра входят следующие подразделения: НИЛ обучения и внедрения компьютерных технологий, НИЛ электромагнитной совместимости и электропитающих устройств, а также Испытательный центр средств железнодорожной автоматики и телемеханики (рис. 1).

Научно-исследовательская лаборатория «Обучение и внедрение компьютерных ж.-д. технологий» создана в 1992 г. Лаборатория специализируется на разработке, внедрении микропроцессорных СЖАТ и обучении оперативного технологического персонала.

В 1995 г. была принята в постоянную эксплуатацию микропроцессорная система диспетчерской централизации ДЦ-МПК. На ее основе в 1998 г. был создан диспетчерский центр управления Петербургском отделением Октябрьской ж. д., в 2006 г. – центр управления Литовских ж. д. в г. Вильнюс [15].

В 2001 г. была разработана и принята в постоянную эксплуатацию на ст. Коли и Пикалево Октябрьской ж. д. первая в стране система релейно-процессорной централизации ЭЦ-МПК [2]. Этой системой оборудовано 95 станций на шести железных дорогах России, а также в Казахстане и Литве. Для линий метрополитенов

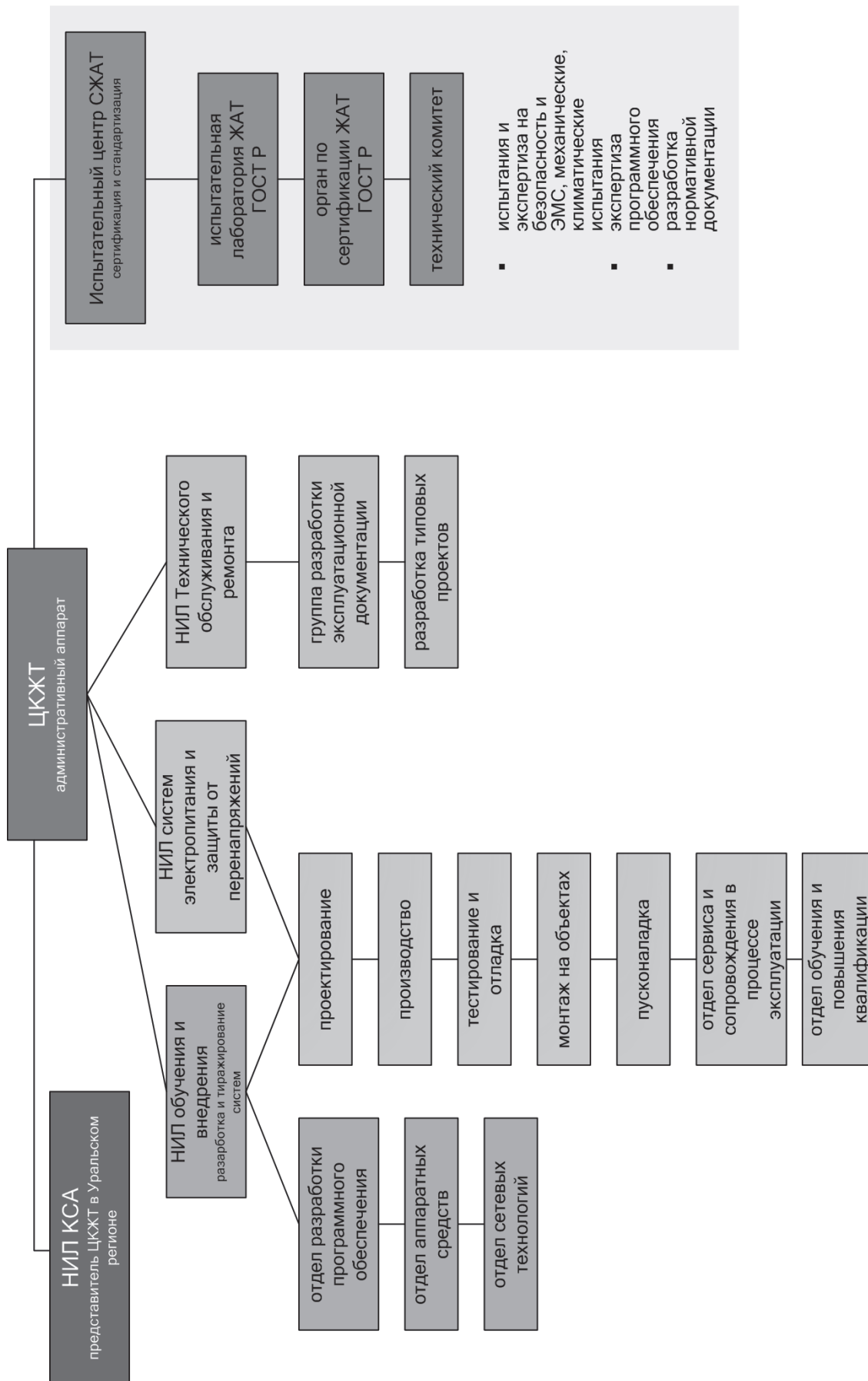


Рис. 1. Состав Центра компьютерных железнодорожных технологий

разработана система комплексного автоматизированного диспетчерского управления (КАС ДУ), которая внедряется на метрополитенах Петербурга, Екатеринбурга, Самары, Нижнего Новгорода и Минска (рис. 2).

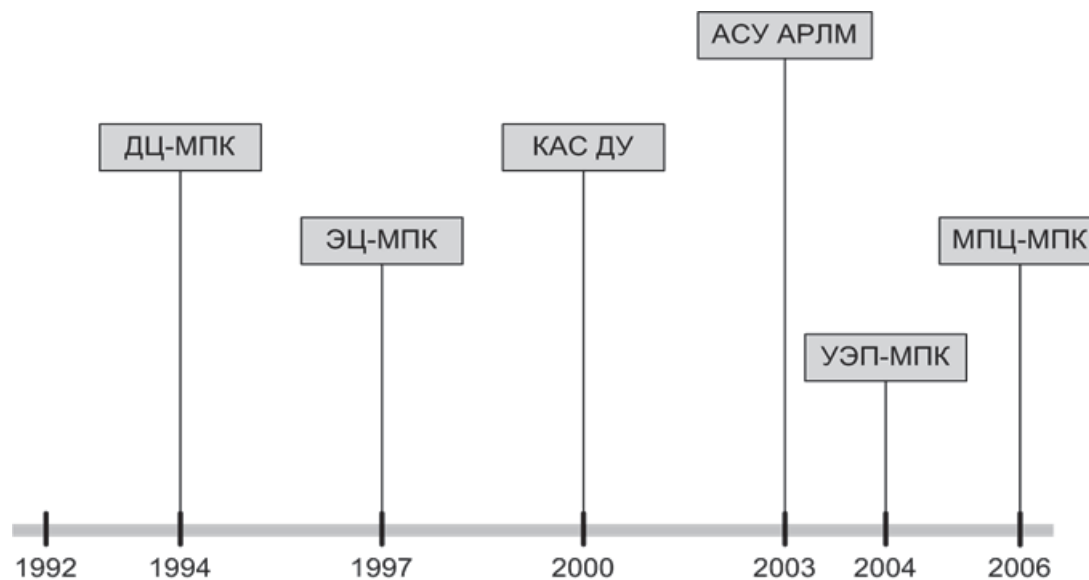


Рис. 2. Основные этапы развития систем

Со второй половины 1990-х гг. в рамках работ по Программе технического и технологического перевооружения хозяйства СЦБ кафедра проводит НИР по анализу и выработке предложений по совершенствованию действующих технологий обслуживания СЖАТ. Основным итогом проделанной НИР стала разработка совместно с Департаментом автоматики и телемеханики ОАО «РЖД» и утверждение в 2003 г. «Типового проекта организации обслуживания и ремонта технических средств ЖАТ дистанций сигнализации и связи железных дорог России». В течение 2003–2006 гг. кафедра осуществляла внедрение Типового проекта на дистанциях сигнализации и связи Московской, Куйбышевской, Свердловской, Восточно-Сибирской, Дальневосточной и Сахалинской железных дорог (рис. 3).

Методическую основу процесса сертификации на безопасность составили нормативные документы «Безопасность железнодорожной автоматики и телемеханики», разработанные в 1991–1997 гг. на кафедре (руководитель работы – Вал. В. Сапожников). В их состав вошли шесть отраслевых стандартов, пять руководящих документов, четыре руководящих технических материала. Нормативные документы определили единство терминологии и требований к разрабатываемым системам, порядок разработки, виды испытаний и форму отчетности разработчика по реализации требований безопасности, порядок проведения сертификации [16]. В настоящее время НИЛ диагностики и автоматизации технического обслуживания ведет работы по созданию и внедрению трех систем:

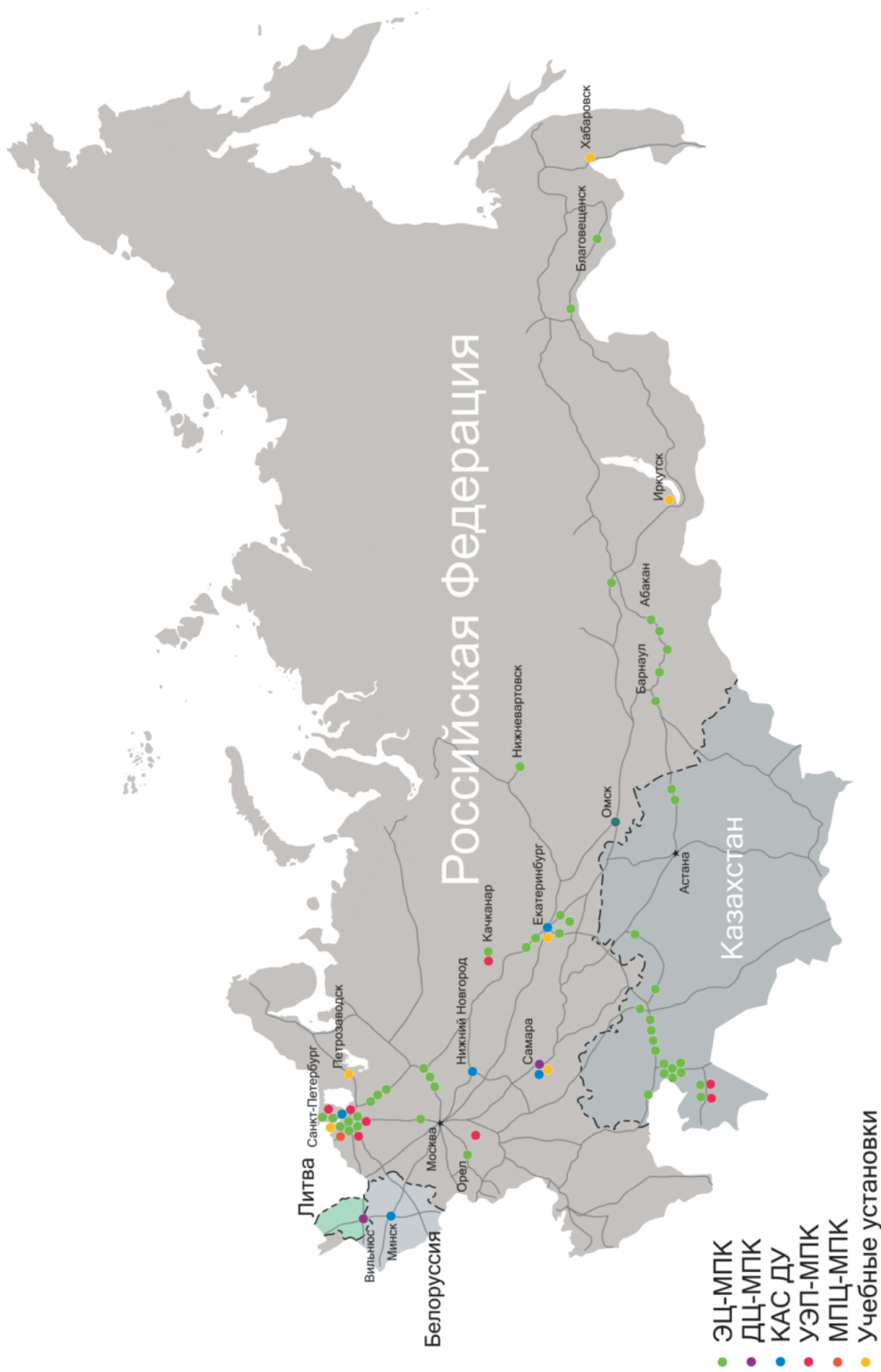


Рис. 3. География внедрения ЖАТ ЦСЖТ ПГУПС

- автоматизированной системы управления хозяйством сигнализации, централизации и блокировки (АСУ-Ш) [17, 18];
- автоматизированной обучающей системы для дистанций сигнализации и связи (АОС-ШЧ) [19];
- системы диспетчерского контроля состояния и диагностирования устройств ЖАТ (АПК-ДК) [20–22].

Несколько поколений систем АСУ-Ш и АОС-ШЧ внедрены на большинстве дистанций сигнализации и связи.

На основе опыта разработки АПК-ДК и других систем контроля по заказу ЦШ с 2003 г. на кафедре ведутся работы по созданию системы технического диагностирования и мониторинга устройств ЖАТ (СТДМ).

Научно-технический центр систем автоматизации проектирования (руководитель – д. т. н. Василенко М. Н.) образован в 2005 г. с целью повышения эффективности научных разработок в области систем автоматизированного проектирования (САПР) устройств СЦБ. Основными научными и практическими направлениями работы центра являются [23–26]:

- разработка программного обеспечения АРМ инженеров-проектировщиков устройств СЦБ (обустроено более 250 АРМ-ПТД в сорока проектных организациях ОАО «РЖД»);
- разработка и внедрение АРМ ведения технической документации (АРМ-ВТД) для инженеров групп технической документации служб и дистанции СЦБ (обустроено более 270 рабочих мест на четырнадцати железных дорогах).

Широкий спектр фундаментальных и прикладных работ, проведенных на кафедре, создал базу для развития новых научных направлений, в том числе и в других вузах и научно-исследовательских институтах отрасли (рис. 4).

Это также способствовало активной подготовке научных кадров высшей квалификации [2]. На кафедре защитили докторские диссертации следующие сотрудники: Вал. В. Сапожников (1980), Вл. В. Сапожников (1984), А. Е. Федотов (1985), И. М. Кокурин (1986), А. М. Костроминов (1990), М. Н. Василенко (1993), В. П. Быков (1996), Д. В. Гавзов (1997), А. Б. Никитин (2005), А. Д. Мананов и П. Е. Булавский (2011).

В табл. 1 приведены данные по защитах кандидатских диссертаций.

Результаты научных исследований широко используются при организации учебного процесса. Этот фундаментальный принцип обучения характерен для кафедры со дня ее основания.

Первый выпуск инженеров по специальности «Сигнализация, централизация и блокировка» (17 человек) состоялся на кафедре в 1934 г. В последующие годы (включая время Великой Отечественной войны – 1941–1945 гг.) и по настоящее время выпуск инженеров не прекращался. В 1949 г. специальность СЦБ получила название «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте». Всего на кафедре подготовлено свыше 8 тысяч инженеров (табл. 2).

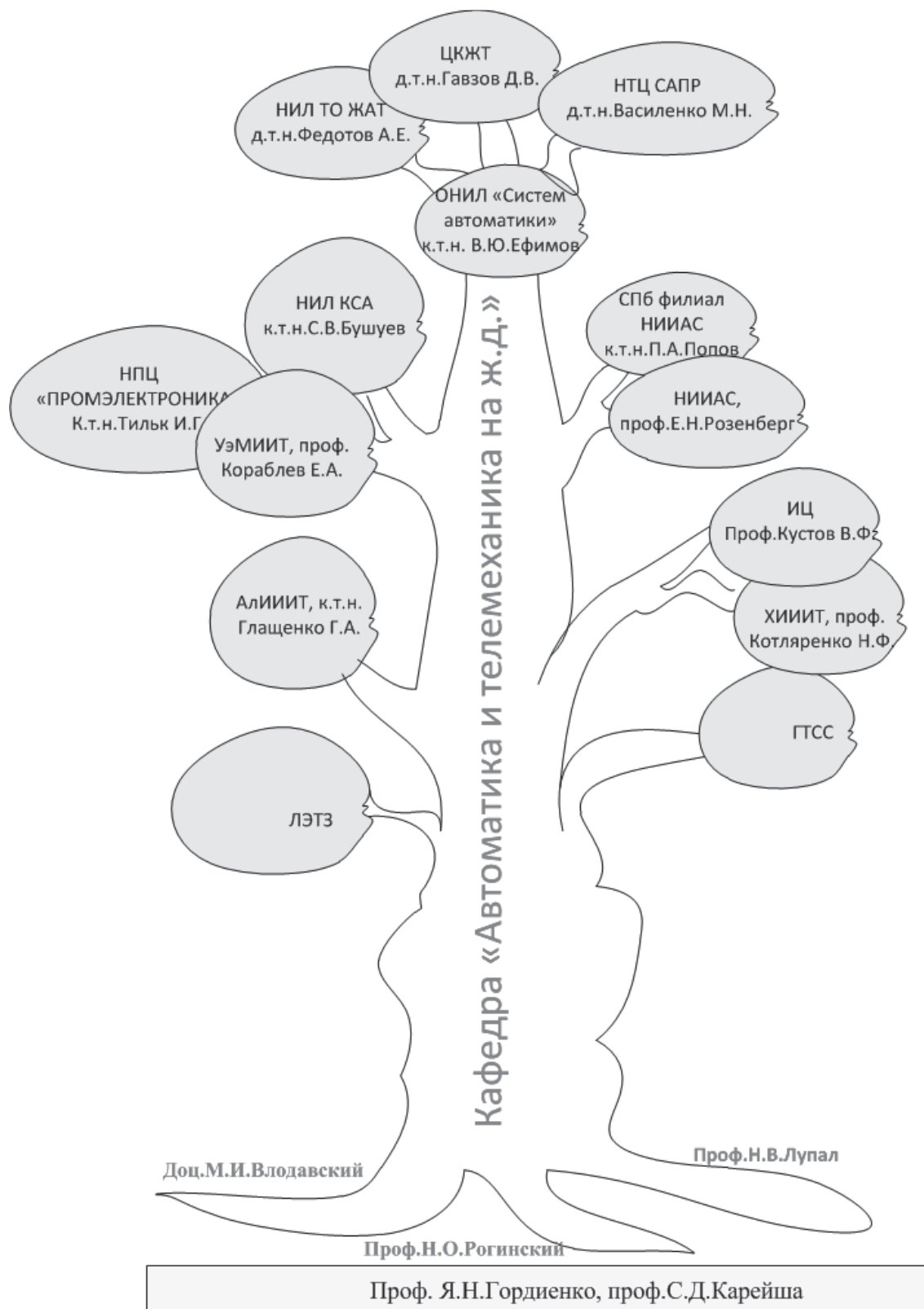


Рис. 4. Генеалогическое древо научной школы «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ПГУПС

Таблица 1. Число защит кандидатских диссертаций

Годы	1964–1969	1970–1974	1975–1979	1980–1984	1985–1989	1990–1994	1995–1999	2000–2004	2005–2009	2010–2014	Всего
Число защит	18	8	12	23	13	6	7	11	7	10	115

Таблица 2. Число специалистов, подготовленных на кафедре «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте» ПГУПС в 1930–2014 гг.

Специалисты	Количество
Инженеры	8520
Кандидаты наук	132
Доктора наук	11
Бакалавры	134
Магистры	76

Ученые кафедры вносят существенный вклад в разработку методических основ подготовки инженеров по специальности «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте».

На базе ПГУПС работает учебно-методическая комиссия УМО по образованию в области железнодорожного транспорта и транспортного строительства по специальности «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» (председатель – профессор Вал. В. Сапожников). Эта комиссия составляет учебные планы и программы, решает все методические вопросы обучения.

В настоящее время преподаватели кафедры входят в авторские коллективы тринадцати основных учебников, по которым учатся студенты.

В учебных лабораториях на базе разработок кафедры внедрены в качестве лабораторных работ микропроцессорная и релейно-процессорная централизация, компьютерная система диспетчерской централизации, микропроцессорная система диспетчерского контроля, АРМ ведения и проектирования технической документации, АРМ ремонтно-технических участков и учета отказов, автоматизированные обучающие системы (28 обучающих курсов) и компьютерные имитаторы (рис. 5).

В научно-исследовательских работах кафедры активно участвуют студенты. Сформирован круглогодичный студенческий отряд «Автоматика» (около 40 человек). Планы его работы согласовываются с руководством Октябрьской дороги. В период летней практики студенты выполняли работы по автоматизированному проектированию СЖАТ, в частности систем электрической централизации на станциях. Совместно с проектным институтом «Ленгипротранс» студенты участвовали в реконструкции Санкт-Петербургского железнодорожного узла,



Рис. 5. Обучающие системы

а именно: проектировали развитие станций Санкт-Петербург-Московский-Сортировочный, 5-й парк, 2-й парк, Обухово.

Студенты осуществляют перенос на электронные носители технической документации, хранящейся в дистанциях: схематических и двухниточных планов станций, принципиальных и монтажных схем для Октябрьской, Северной и других дорог.

В преддверии отмечаемой даты на кафедре проведены две научно-практические конференции, организована встреча с руководством ЦШ ЦДИ ОАО «РЖД», службы «Ш» Октябрьской ж. д. и института «Гипротрансигналсвязь» по вопросам подготовки специалистов на кафедре.

При кафедре действует на постоянной основе Санкт-Петербургский научно-практический семинар «Автоматика и дискретная математика», где свои научные достижения представляют внимание студенты, аспиранты, научные сотрудники кафедры и коллеги из других вузов и научных учреждений (рис. 6). С момента своего основания (2012 г.) семинар посетили свыше 100 участников. Сегодня семинар активно совершенствуется, в его работе задействуются новые информационные технологии, что способствует становлению грамотных специалистов в области автоматики и вычислительной техники, а также развитию научного сообщества кафедры [27].



Рис. 6. Студенты старших курсов на семинаре «Автоматика и дискретная математика»

Более 50 лет (с 1963 г.) на кафедре формируются сборники научных трудов, освещающие последние достижения в области создания и эксплуатации новых систем железнодорожной автоматики и телемеханики [28]. С 2015 г. издается научный журнал «Автоматика на транспорте».

Научные и практические результаты, полученные сотрудниками кафедры, широко известны и признаны в России и за рубежом. Они изложены в статьях и докладах, монографиях и учебниках. Около 60 работ опубликовано за рубежом, в том числе в США. Их результаты представлялись на многочисленных конференциях в России и различных странах.

Библиографический список

1. Рогинский Н. О. Железнодорожная сигнализация и обеспечение безопасности следования поездов / Н. О. Рогинский. – М. : Транспечать, 1928. – Вып. II. – 293 с.
2. Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения в XX – начале XXI в. / Вал. В. Сапожников, М. Н. Василенко, П. Е. Булавский, А. Б. Никитин, А. А. Лыков, О. А. Наседкин, В. В. Нестеров, В. Б. Соколов, М. Б. Соколов ; под ред. Вал. В. Сапожникова, Вл. В. Сапожникова. – СПб. : ПГУПС, 2009. – 346 с.
3. Гавзов Д. В. Методы обеспечения безопасности дискретных систем / Д. В. Гавзов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 1994. – № 8. – С. 3–50.
4. Сапожников Вал. В. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Х. А. Христов, Д. В. Гавзов. – М. : Транспорт, 1995. – 272 с.

5. Сапожников Вал. В. Основы технической диагностики / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – М. : Маршрут, 2004. – 316 с.
6. Королев А. И. Надежность железнодорожной автоматики и телемеханики / А. И. Королев. – М. : Транспорт, 1967. – 191 с.
7. Сапожников Вал. В. О защищенности однопутных схем управления от опасных отказов / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Железнодорожные системы автоматики и телемеханики с применением бесконтактных элементов : сб. тр. ; под ред. А. С. Переборова. – Л. : ЛИИЖТ, 1971. – Вып. 314. – С. 37–47.
8. Сапожников Вал. В. О синтезе конечных автоматов с исключением опасных отказов / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 1972. – № 8. – С. 93–99.
9. Сапожников Вал. В. Методы синтеза надежных автоматов / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – Л. : Энергия, 1980. – 96 с.
10. Сапожников Вал. В. Дискретные автоматы с обнаружением отказов / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – Л. : Энергоатомиздат, 1984. – 112 с.
11. Сапожников Вал. В. Самопроверяемые дискретные устройства / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – СПб. : Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.
12. Сапожников Вал. В. Самодвойственные дискретные устройства / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, М. Гёссель. – СПб. : Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отделение, 2001. – 331 с.
13. Сапожников Вал. В. Синтез самодвойственных дискретных систем / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Р. Ш. Валиев. – СПб. : Элмор, 2006. – 224 с.
14. Труды по теории синтеза и диагноза конечных автоматов и релейных устройств / Под ред. Вал. В. Сапожникова, Вл. В. Сапожникова. – СПб. : Элмор, 2009. – 900 с.
15. Никитин А. Б. Этапы реконструкции центра диспетчерского управления на литовской железной дороге / А. Б. Никитин, А. А. Козлов, С. В. Ракчеев // Автоматика и телемеханика железных дорог России. Техника, технология, сертификация : сб. науч. тр. – СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2011. – С. 14–19.
16. Сертификация и доказательство безопасности систем железнодорожной автоматики и телемеханики / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, В. И. Талалаев, Д. В. Гавзов, А. А. Красногоров, Т. А. Белишкіна, П. Е. Булавский, О. А. Наседкин, А. М. Костроминов ; под ред. Вл. В. Сапожникова. – М. : Транспорт, 1997. – 288 с.
17. Нестеров В. В. Информационные технологии для автоматизации техобслуживания / В. В. Нестеров, М. В. Долгов, Д. С. Першин, А. В. Кожевников // Автоматика, связь, информатика. – 2004. – № 6. – С. 32–33.
18. Нестеров В. В. Развитие систем СТДМ, АСУ-Ш-2 и АОС-ШЧ / В. В. Нестеров // Автоматика, связь, информатика. – 2012. – № 12. – С. 45–46.
19. Гриненко А. В. Автоматизированная обучающая система для дистанций сигнализации и связи / А. В. Гриненко, В. В. Нестеров, В. Л. Лабецкий // Автоматика, связь, информатика. – 2001. – № 11. – С. 22–25.
20. Молодцов В. П. Системы диспетчерского контроля и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : учеб. пособие / В. П. Молодцов, А. А. Иванов. – СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2010. – 140 с.

21. Ефанов Д. В. Обеспечение безопасности движения за счет технического диагностирования и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / Д. В. Ефанов, П. А. Плеханов // Транспорт Урала. – 2011. – № 3. – С. 44–48.
22. Ефанов Д. В. Некоторые аспекты развития систем функционального контроля устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / Д. В. Ефанов // Транспорт Урала. – 2015. – № 1. – С. 35–40.
23. Василенко М. Н. Принципы организации электронного документооборота технической документации / М. Н. Василенко, Б. П. Денисов, П. Е. Булавский, Д. В. Седых // Транспорт Российской Федерации. – 2006. – № 7. – С. 31–35.
24. Василенко М. Н. Единое информационное пространство технической документации ЖАТ / М. Н. Василенко, А. Ф. Ершов // Автоматика связь, информатика. – 2012. – № 5. – С. 15–16.
25. Булавский П. Е. Автоматизация синтеза электронного документооборота систем железнодорожной автоматики на основе международных стандартов / П. Е. Булавский, Д. С. Марков // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2013. – № 4. – С. 17–24.
26. Василенко М. Н. Развитие электронного документооборота в хозяйстве АТ / М. Н. Василенко, В. Г. Трохов, Д. В. Зуев, Д. В. Седых // Автоматика связь, информатика. – 2015. – № 1. – С. 14–16.
27. Ефанов Д. В. Научно-практический семинар «Автоматика и дискретная математика» / Д. В. Ефанов, В. В. Дмитриев // Проблемы безопасности и надежности микропроцессорных комплексов : сб. тр. науч.-практ. конф. ; под ред. Вал. В. Сапожникова. – СПб. : ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015. – С. 180–186.
28. К истории издания научных трудов кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Актуальные вопросы развития систем железнодорожной автоматики и телемеханики : сб. науч. тр. ; под ред. Вл. В. Сапожникова. – СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2013. – С. 32–40.

Nikitin Alexander B.

«Automation and Remote Control on Railways» department
Petersburg state transport university

**The scientific school of
«Automation and Remote control on railways» department
of Petersburg state transport university**

The article considers milestones of growth of «Automation and remote control on railways» department and development of train traffic safety provision systems connected with researches of department scientists. Retrospective analysis shows that all new achievements of specialists and scientists of department got their implementation. Historical stages from relay technology to modern computer systems were held with participation of leading scientists. The scientific school had an influence on the methodical base of

theoretical subjects given on the department. Special attention was given to the analysis of preparation of highest qualification scientific personell. This paper contains the synopsis of influence of department research on the operation of railway transport and formation of scientific school in other universities and institutes.

mechanical interlocking; electrical interlocking; computer based interlocking; signaling; centralized traffic control; training program; educational laboratory; research laboratory; automated control system; safe finite state machine

Reference

1. Roginsky N.O. Railway signaling and train traffic safety provision. Moscow, Transpechat, 1928, Issue II, 293 p.
2. Sapozhnikov Val. V., Vasilenko M.N., Bulavsky P.E., Nikitin A. B., Lykov A.A., Nasedkin O.A., Nesterov V.V., Sokolov V.B., Sokolov M. B. Automation and remote control on railways» department of Petersburg state transport university in XX – beginning of XXI century; eds. Val. V. Sapozhnikov & Vl. V. Sapozhnikov. St. Petersburg, PSTU, 2009, 346 p.
3. Gavzov D.V., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. Ways of digital systems safety provision. Automation & Remote Control, 1994, № 8, pp. 3–50.
4. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Hristov H. A., Gavzov D. V. Ways of safety microelectronic railway automation systems design. Moscow, Transport, 1995, 272 p.
5. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. Base of technical diagnostics. Tutorial for railway high school. Moscow, Marshrut, 2004, 316 p.
6. Korolev A.I. Reliability of railway automation and remote control. Moscow, Transport, 1967, 191 p.
7. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. On the protection of combinational control circuits against hazards. Railway automation and remote control systems with the use of contactless components; eds. A. S. Pereborov. Leningrad, LIERT, 1971, Issue 314, pp. 37–47.
8. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. On the synthesis of finite state machines with exclusion of hazards. Automation & Remote Control, 1972, № 8, pp. 93–99.
9. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. Ways of synthesis of reliable finite state machines. Leningrad, Energia, 1980, 96 p.
10. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. Digital finite state machines with detection of failures. Leningrad, Energoatomizdat, 1984, 112 p.
11. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. Self-checking digital devices. St. Petersburg, Energoatomizdat, 1992, 224 p.
12. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Goessel M. Self-dual discrete devices. St. Petersburg, Energoatomizdat, St. Petersburg department, 2001, 331 p.
13. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Valiev R. Sh. Synthesis of self-dual digital systems. St. Petersburg, Elmor, 2006, 224 p.

14. Scientific works on the theory of synthesis and test of finite state machines and relay devices. Eds. Val. V. Sapozhnikov & Vl. V. Sapozhnikov. St. Petersburg, Elmor, 2009, 900 p.
15. Nikitin A. B., Kozlov A. A., Rakcheev S. V. Lithuanian railway centralized traffic control center reconstruction phases. Automation & remote control on Russian railways. Technics, technology, certification. St. Petersburg, PSTU, 2011, pp. 14–19.
16. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Talalaev V. I., Gavzov D. V., Krasnogorov A. A., Belishkina T. A., Bulavsky P. E., Nasedkin O. A., Kostrominov A. M. Certification and safety proof of railway automation and remote control systems; eds. Vl. V. Sapozhnikov. Moscow, Transport, 1997, 288 p.
17. Nesterov V. V., Dolgov M. V., Pershin D. S., Kozhevnikov A. V. Information technologies for the maintenance automatisation. Automatics, Communication, Informatics, 2004, № 6, pp. 32–33.
18. Nesterov V. V. Development of STDM, ASU-Sch-2 and AOS-SchCh systems. Automatics, Communication, Informatics, 2012, № 12, pp. 45–46.
19. Grinenko A. V., Nesterov V. V., Labetsky V. L. Automated training system for signaling and communication departments. Automatics, Communication, Informatics, 2001, № 11, pp. 22–25.
20. Molodtsov V. P., Ivanov A. A. Supervisory and monitoring systems of railway automation and remote control devices. St. Petersburg, PSTU, 2010, 140 p.
21. Efanov D. V., Plekhanov P. A. Traffic safety provision by technical diagnostics and monitoring of railway automation and remote control devices. Ural Transport, 2011, № 3, pp. 44–48.
22. Efanov D. V. Some aspects of concurrent error detection systems of railway automation and remote control devices development. Ural Transport, 2015, № 1, pp. 35–40.
23. Vasilenko M. N., Denisov B. P., Bulavsky P. E., Sedych D. V. Principles of electronic document management organization. Transport RF, 2006, № 7, pp. 31–35.
24. Vasilenko M. N., Ershov A. F. Unite information space of railway automation and remote control technical documentation. Automatics, Communication, Informatics, 2012, № 5, pp. 15–16.
25. Bulavsky P. E., Markov D. S. Automatization of railway automation and remote control electronic document management synthesis based on international standards. Proceedings of Petersburg Transport University, 2013, № 4, pp. 17–24.
26. Vasilenko M. N., Trohov V. G., Zuev D. V., Sedych D. V. Development of electronic document management in railway automation and remote control. Automatics, Communication, Informatics, 2015, № 1, pp. 14–16.
27. Efanov D. V., Dmitriev V. V. Scientific workshop «Automation and discrete mathematics». Proceedings of conference «Safety & reliability problems of microprocessors complex»; eds. Val. V. Sapozhnikov. St. Petersburg, PSTU, 2015, pp. 180–186.
28. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. To the history of publication of scientific works of «Automation and remote control on railways» department.

Actual problems of railway automation and remote control systems development; eds. VI. V. Sapozhnikov. St. Petersburg, PSTU, 2013, pp. 32–40.

*Представлена к публикации членом редколлегии Вл. В. Сапожниковым
Поступила в редакцию 28.08.2015, принята к публикации 30.09.2015*

НИКИТИН Александр Борисович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.
e-mail: nikitin@crtc.spb.ru

© Никитин А. Б., 2015

Н.В. Лупал, канд. техн. наук

Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»,
Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта

РАЗВИТИЕ УСТРОЙСТВ СЦБ В ПЕРИОД ПРОМЫШЛЕННОГО КАПИТАЛИЗМА (1861–1900 гг). ЧАСТЬ 2: РАЗВИТИЕ СИГНАЛИЗАЦИИ

Данная работа содержит материалы второго раздела неизданной монографии первого заведующего кафедрой «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта Николая Васильевича Лупала – «Развитие устройств сигнализации, централизации и блокировки на железных дорогах России». Освещаются особенности сигнализации и связи на железных дорогах в рассматриваемый период.

Петербург-Варшавская железная дорога; Одесская железная дорога; телеграф; сигнализация; семафор

Появившиеся впервые в 1859–1860 гг. на дорогах красные диски надолго утверждаются на наших железных дорогах как один из основных видов входных сигнальных приборов.

Красные диски имелись двух типов.

Один, наиболее распространенный, представлял собой неподвижную стойку высотой 3,5–4 м, на которой находился подвижной железный круг, окрашенный со стороны приближающегося поезда в красный цвет, а с обратной стороны – в белый цвет. В диске имелось отверстие, закрытое красным стеклом, за которым устанавливался неподвижный фонарь.

В конструкции второго вида диск и фонарь вместе со стойкой могли поворачиваться на 90°. При обеих конструкциях диск, повернутый плоскостью к поезду, а ночью красный огонь требовали остановки; диск, стоящий параллельно пути, а ночью белый огонь разрешали вход поезду на станцию.

Управление дисками полагалось производить либо с пассажирской платформы, либо от входных стрелок. Однако имелось много дисков с приборами управления, расположенными непосредственно на стойках.

Перед входными поворотами красными дисками устанавливались «дальние сигналы» – неподвижные предупредительные приборы, зеленые диски.

Зеленый диск представлял собой деревянный столб 6–8 м высотой с дощатым железным кругом с прорезью, прикрываемой зеленым стеклом, за которым помещался вставной или подъемный фонарь. Позже для зеленых дисков стали

применять в качестве столбов старые рельсы, а диски изготавливать из тонкого котельного железа.

Красные диски устанавливались перед входной стрелкой на расстоянии от 10 до 100 сажен (21–210 м), в зависимости от местных условий, с таким расчетом, чтобы при маневрах поезда не выходили за диск.

Зеленые диски, или «дальние предельные сигналы», устанавливались за 250–400 сажен (530–850 м) от входной стрелки.

Назначением красных дисков являлось «закрытие входа на станцию во время производства маневров», а также запрещение одновременного приема поездов противоположных направлений на однопутных дорогах.

Первые диски на Петербурго-Варшавской дороге были выписаны из-за границы. Это были так называемые диски Робера, управляемые посредством одного провода, в которой включался подвесной груз для регулировки натяжения провода. Это регулирующее устройство имело ряд недостатков: для открытия диска требовалось приложить большое усилие, при закрытии возможны были ушибы сигналиста, наконец, зимой диск часто не открывался.

Дорожный мастер Петербурго-Варшавской дороги Федоров в 1864 г. предложил свой способ управления дисками – посредством вороткового механизма, позволяющего произвести выборку провесов провода.

Красные диски применялись на многих дорогах, но далеко не на всех. Железные дороги в этот период почти все находились в руках частных обществ, и вопросы технического оснащения железных дорог часто рассматривались лишь с точки зрения получения наибольших доходов.

Взгляды правлений железных дорог по вопросам сигнализации были весьма различны. В результате часть дорог применяла для ограждения станций входные красные диски, часть – входные семафоры, иногда с крыльями, иногда с шарами, часть дорог устанавливала семафоры посередине станции, на части дорог вообще никаких постоянных приборов не было.

Интересно было положение с сигнальными приборами на Одесской железной дороге. Из рапорта департаменту железных дорог инспектора Корсакова следовало, что на линии Одесса – Кременчуг никаких дисков не имелось, но «установлены при самих стрелках фонари системы Бендера, показывающие своим положением, который путь открыт». И далее: «Так как фонарь системы Бендера, находящийся при въездной стрелке, показывает машинисту путь, на который он въезжает, и можно тотчас видеть, есть ли на этом пути какие-либо препятствия, то я полагал бы лишним постановку вращающихся особых дисков...». Такой взгляд высказывал местный представитель министерства.

Разногласия в вопросах сигнализации при усиленном строительстве новых дорог и увеличении густоты движения поездов вызвали вмешательство министерства путей сообщения. В целях единообразия сигнализации циркуляром департамента железных дорог от 11 июня 1870 г. было предложено на всех

дорогах установить входные поворотные красные диски, а перед ними – неподвижные зеленые диски.

Установка красных и зеленых дисков была произведена большинством железных дорог в течение 1870 г.

Однако отдельным дорогам по их просьбе были разрешены некоторые отступления. На Одесской дороге было разрешено применять деревянные семафоры, сигнализирующие днем красным шаром, а ночью красным фонарем. Фонарь и шар поднимались посредством веревки, конец которой привязывался к перекладине на мачте. Вместе с тем технический комитет рекомендовал применить управление семафором посредством проволоки от пассажирской платформы.

Московско-Рязанской и Ряжско-Моршанской железным дорогам было разрешено «в виде исключения, впредь до утверждения министерством однообразного для всех дорог положения о сигналах, сохранить существующие у них вместо красных дисков на станциях и полустанциях семафоры, с тем, однако же, чтобы они были установлены не посередине станции или полустанции, а непременно у входных стрелок».

Некоторые дороги мотивировали просьбы о разрешении применить деревянные семафоры вместо металлических дисков тем, что первые могут быть изготовлены дорогой и, следовательно, дешевле дисков, выписываемых из-за границы.

На Петербурго-Московской и Петергофской железных дорогах были в 1870 г. установлены семафоры в связи с введением на первой дороге централизации, а на второй – блокировки.

В 1873 г. министерством путей сообщения было издано первое «Положение о сигналах», обязательное для всех русских железных дорог. Это положение санкционировало применение красных и зеленых дисков. Вместе с тем допускались и семафоры.

Согласно «Положению о сигналах» 1873 г., семафоры устанавливались как для указания поездным агентам свободного пути и необходимости остановки, так и для извещения путевой стражи о выходе поезда со станции. Такие путевые семафоры предупреждали путевую стражу о приближении поезда поднятым вверх крылом под углом 135° к мачте, а ночью белым огнем.

Входные семафоры вместо красных дисков применялись в 1870-х гг. уже в довольно значительных размерах. Сигнал остановки подавался семафорами посредством горизонтального положения крыла и красным огнем ночью. Сигнал «путь свободен» показывался либо отвесным положением крыла и белым огнем ночью (Московско-Брестская, Балтийская железные дороги), либо наклонным вниз на 45° к мачте (Московско-Рязанская, Рязано-Козловская железные дороги), либо наклонным вверх на 45° к горизонтали.

Семафоры устанавливались справа от пути, иногда крылом на путь, иногда крылом в поле. Семафоры имели обычно и контрольные огни, расположенные

по направлению к станции, причем в качестве ночных контрольных огней применялись красный, зеленый, белый, синий, голубой.

На некоторых дорогах пользовались особыми станционными семафорами. Такие семафоры устанавливались посередине станции у станционных платформ и имели по два крыла, расположенных с обеих сторон мачты.

На Балтийской железной дороге такие семафоры давали три показания: а) крыло горизонтально, ночью красный огонь – вход воспрещен; б) крыло опущено вниз на 45° , ночью зеленый огонь – уменьшение скорости; в) крыло опущено вниз вертикально, ночью белый свет – проход без остановки на станции. При этом для машиниста имело значение показание лишь левого крыла семафора.

На Петербурго-Варшавской железной дороге подобный семафор был введен в 1872 г. на ст. Петербург, но каждое крыло могло занимать два положения: горизонтальное и наклонное.

Сигнализация безостановочного прохода через станцию вообще осуществлялась различно.

Сигнализация у разветвлений путей бывала иногда весьма причудлива. Примером неудачной сигнализации разветвления являлась, например, одна из товарных станций Балтийской железной дороги. К этой станции прилегал четыре ветви (Е, П, В и Т), а сама станция находилась внутри треугольника путей. Кроме «дальних» входных семафоров «А» и «Д», имелись установленные рядом друг с другом два «станционных» семафора – «Б» и «С», каждый с двумя крыльями (1 и 2, 3 и 4), расположенными каждая пара по обе стороны мачты.

Опущенное положение крыла 1 семафора «С» при остальных (2, 3, 4) крыльях в горизонтальном положении разрешало поезду, идущему из В, войти на товарную станцию, такое же опущенное положение крыла 1 семафора «С», при условии, что поезд, идущий из Т, прошел открытый дальний семафор «Ф», разрешало и этому поезду войти на товарную станцию. Опущенное крыло 3 семафора «Б» разрешало поездам, следующим из В или Т (при условии открытого семафора «А»), проследовать к П.

Опущенное вниз крыло 2 семафора «С» разрешало проследовать на Т как поезду, идущему из П, так и поезду, отправляющемуся с товарной станции в Т, и, кроме того, разрешало поезду, идущему из Е, вход на товарную станцию (при условии, что открыт дальний семафор «Д»).

Опущенное крыло 4 семафора «Б» разрешало проследование на В поезду, идущему из П, отправление поезду на В с товарной станции и вход на товарную станцию поезду, идущему из Е (при условии, что открыт дальний семафор «Д»).

Сигнализация с современной точки зрения совершенно неудовлетворительная! Одно и то же показание семафора подавалось поездам, идущим с разных линий, одно и то же показание разрешало прием на станцию, отправление с нее и проследование поездов по линии, не проходящей через станцию.

Особенно неудобными были ночные показания. Не говоря уже об одновременном горении на рядом расположенных семафорах зеленого и красного огней,

каждое разрешительное зеленое показание могло быть воспринято при пяти различных передвижениях. «Экономия» на семафорах очевидно способствовала не ускорению, а замедлению движения поездов и совершенно не содействовала безопасности их движения.

Конструкции семафоров, применявшихся на дорогах, были весьма различны. Применялись как деревянные, так и металлические мачты.

Управление семафорами и дисками производилось как с пассажирских платформ, так и от стрелочных будок, а иногда непосредственно с мачты. В первых двух случаях от переводного станка шла однопроводная проволочная передача к рычажному приводу с противовесом, устанавливаемому на мачте. На резервных шкивах проволока заменялась железной цепью. В передачу иногда включался примитивный компенсатор, большей же частью вместо компенсатора для регулировки натяжения тяги устанавливались стяжные муфты.

Недостатки существовавших на дорогах сигнальных устройств живо чувствовались передовыми работниками и для улучшения сигнализации предлагались соответственные мероприятия.

В докладе инженера М. Рутковского на первом совещательном съезде инженеров службы пути предлагалось, например, вводить семафоры вместо красных дисков, применять в семафорной проводке компенсаторы, устанавливать электрические повторители семафоров в помещении телеграфа.

Докладчик вполне правильно указывал следующие преимущества семафоров перед красными дисками:

- а) при значительно большей высоте семафоров крылья их проектируются, как правило, на фон неба;
- б) семафоры более ветроустойчивы;
- в) от семафоров можно получать большее число показаний;
- г) усилие для перемещения крыльев требуется меньше, чем для поворота диска.

Съезд, в общем, одобрил предложения докладчика и даже пошел далее, отметив в своем решении желательность введения предупредительных сигнальных приборов, дающих знать машинисту, в каком положении находится «дальний» (входной) семафор (открыт он или закрыт). Управление предупредительным диском рекомендовалось производить со станции и связывать с управлением входным семафором. Видимый предупредительный прибор считалось возможным заменять или дополнять звуковым сигналом, обращающим внимание поезда бригады на приближение к станции, как, например, петардами, автоматическим свистком Тимоховича и т. п.

Указывалось, что места установки предупредительных сигнальных приборов должны быть таковы, чтобы машинист имел возможность остановить поезд перед закрытым входным семафором.

Желательность замены красных дисков семафора указывалась и в решениях Первого съезда представителей службы движения: «Из станционных сигналов:

дисков, шаров и семафоров – наилучшими являются семафоры, как сигналы удобно видимые, ясные и отчетливые...».

Вместе с тем этот съезд признал выходные сигналы излишними, ввиду выдачи письменного или телеграфного разрешения. Такому решению способствовало, очевидно, незначительное распространение в то время на русских железных дорогах путевой блокировки и недооценка роли последней.

В 1883 г. были введены «Правила движения по железным дорогам», значительно разнящиеся от аналогичных правил 1874 г. Один из видных железнодорожных специалистов того времени И. И. Рихтер так говорил о новых правилах: «Положение о сигналах 1873 г., построенное на принципе открытых пунктов опасности и перегонов и условного или разрешительного блока, не отвечает интенсивности движения, требующей перехода к принципу закрытых пунктов опасности и переговоров или абсолютного блока». Комиссия, подготавливавшая правила движения 1883 г., рассматривала также проект нового «Положения о сигналах на железных дорогах (паровозных), открытых для общего пользования», разработанного ее подкомиссией. Этот проект в жизнь не был введен, главным образом по финансовым соображениям, но явился весьма интересным, почему немного на нем остановимся.

Проектом предвиделись «предельные» сигнальные приборы, устанавливаемые перед станциями, разветвлениями, пересечениями, мостами. Эти приборы должны были являться семафорами на три показания: а) остановка – крыло горизонтально, ночью красный огонь; б) уменьшение скорости – крыло наклонно вниз под углом 45°, ночью зеленый огонь; в) путь свободен – крыло вертикально вниз, ночью белый огонь. Если «предельный» прибор не обладал достаточной видимостью за 300 сажен (640 м), то перед ним на том же расстоянии должен быть установлен «входной дальний» диск или семафор, связанный с «предельным», дающий два показания: а) уменьшение скорости – ночью зеленый огонь, если «предельный» семафор закрыт; б) въезд дозволен – ночью белый огонь, если «предельный» семафор открыт.

Таким образом, по принятой в настоящее время терминологии, предвиделись входные («предельные») и предупредительные (входные дальние) сигнальные приборы. Аналогичные «предельным» семафоры намечались и для блокпостов; в качестве выходных предполагались семафоры на два показания. Если исключить применение белого огня как сигнального, в остальном проект был, несомненно, прогрессивным, он предвидел скоростную трехзначную сигнализацию, осуществленную на наших дорогах лишь после революции. Быть может, прогрессивность предлагаемой сигнализации также явилась одной из причин отклонения проекта. Однако на некоторых дорогах новая сигнализация частично осуществлялась, положение же о сигналах 1873 г. официально сохранялось в течение 36 лет.

В начале 1890-х гг. преобладающим видом путевых сигнальных приборов являлись семафоры. Последние применялись на 35 железных дорогах, при-

чем на 24 из них применялись исключительно семафоры, а на 11 дорогах – как семафоры, так и диски. Сигнализация только дисками употреблялась лишь на 10 дорогах.

Управление сигнальными приборами осуществлялось преимущественно одиноким проводом. Двойная проволочная передача применялась для управления семафорами всего лишь на 8 дорогах.

Конструкции семафоров и дисков были весьма разнообразны. Так, были известны до 10 конструкций красных дисков и до 15 конструкций семафоров.

Наилучшим из применявшихся видов семафоров был семафор конструкции проф. Я. Н. Гордеенко, приспособленный для двойной проволочной передачи с фонарем, устанавливаемым в уровне крыла. Разрешающее показание давалось опусканием крыла вниз на 45° , ночью – зеленым огнем. Контрольными огнями в сторону станции являлись красный и белый.

Семафорные мачты применялись как деревянные, так и металлические из корытообразного железа или решетчатые из уголкового железа.

На некоторых дорогах применялся управляемый с мачты двукрылый двухсторонний семафор на три показания.

Существовали семафоры с крылом, вращающимся вокруг оси, расположенной в центре тяжести крыла на особом кронштейне. Фонарь устанавливался в чугунном кожухе, внутри которого имелись очки с красным стеклом в сторону пути и синим в сторону станции. Очки связывались с поводком, соединенным с тягой, идущей от рычага с противовесом на мачте. Разрешительное показание давалось белым огнем.

Для контроля показаний семафоров при недостаточной видимости контрольных огней употреблялись электрические повторители в виде подвижного указателя-гальваноскопа или маленькой модели семафора с подвижным крыльшком. Кроме того, при открытии семафора практиковалось включение звонка на платформе.

Применялись также механические повторители: либо в виде невысокого семафора, либо в виде небольшого поворотного красного диска, включающиеся в провод основного сигнала. Повторитель ставился у платформы и включался между рычагом и входным семафором, если управление последним производилось рычагом, установленным в помещении телеграфа.

Оригинальный маршрутный указатель был установлен на ст. Дебальцево. Этот указатель применялся при приеме и отправлении поездов и указывал одно из трех направлений движения. На мачте была установлена железная коробка с шестью отделениями, снабженными фигурными вырезами, прикрываемыми зелеными или молочными стеклами. Вырезы могли прикрываться щитками, управляемыми рычагами, помещенными в запираемом ящике на платформе.

Хотя «Положение о сигналах» 1873 г. пересмотрено не было, но некоторые новые указания по сигнализации» были даны в «Правилах содержания и охранения паровозных железных дорог» 1883 г.

Так, параграф 146 этих правил требовал ограждения станций «сигналами» и «предупредительными сигналами»; параграф 149 устанавливал минимальную видимость сигнала остановки в 300 сажен (640 м); параграф 152 требовал установки повторителей или звонков.

В 1880-х гг. делаются первые попытки электрического управления семафорами.

В 1889 г. Н. А. Рахманиновым на ст. Москва Московско-Рязанской железной дороги были произведены опыты по управлению диском при помощи электричества.

Положительные результаты опытов позволили автору данной статьи установить на ст. Перово входной семафор с электроразводным механизмом, который действовал отчетливо и исправно в течение нескольких лет. Для управления электросемафором в конторе начальника станции устанавливался индуктор переменного тока, а для контроля положения крыла семафора – повторитель.

Позднее были предложены и устанавливались электросемафоры и других русских изобретателей (Воловского, Филя и др.).

Оригинальные сигнальные приборы с электрическим управлением были предложены начальником службы телеграфа Курско-Харьково-Азовской дороги К. А. Кайлем. Входной диск снабжался цилиндрической коробкой с круглыми отверстиями с обеих сторон. Внутри коробки устанавливался электромеханизм, управляющий передвижением цветных стекол, перекрывающих отверстия в цилиндрической коробке. Принцип устройства электромеханизма несколько напоминает устройство сигнального механизма современного прожекторного светофора. Якорь поляризованного реле посредством зубчатой передачи управляет «окуляром» с цветными стеклами. Центр тяжести «окуляров» находится ниже точки опоры вала и стремится поставить якорь «А» в горизонтальное положение, соответствующее положению среднего красного стекла, чему помогает и противовес «Г». При пропускании через обмотку реле тока одного направления якорь, отклоняясь в одну сторону, ставит перед отверстием синее стекло (уменьшение скорости), а при пропускании тока обратного направления ставит «окуляр» в положение, при котором белый свет фонаря (путь свободен) ничем не прикрывается.

Nikolay V. Lupal

«Automation and Remote Control on Railways» department,
Leningrad Institute of Railway Transport Engineers

Development of signaling, centralization and blocking devices during the period of industrial capitalism (1861–1900). Part 2: Signaling development

The article presents the materials of the second section of unpublished manuscript of a monograph «Development of signaling, interlocking and blocking devices on Russian railways», that was written by N. V. Lupal, the first head of «Automation and Remote Control on Railways» department of Leningrad Institute of Railway Transport Engineers. The section highlights the particularities of railway signaling and communication of this time.

Petersburg-Warsaw railway; Odessa railway: telegraph; signaling; colour light signal

© Лупал Н. В., 2015

СПИСОК СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В 2015 ГОДУ

Живучесть, надежность, безопасность

Горелик А. В., Неваров П. А. № 3,
Анализ показателей надежности функционирования систем с. 271–281
железнодорожной автоматики и телемеханики с учетом
экономических критериев

Горелик А. В., Неваров П. А., Журавлев И. А., Веселова А. С. № 2,
Модели оценки технологической эффективности систем с. 143–155
железнодорожной автоматики и телемеханики

Из истории автоматики

Лупал Н. В. № 2,
Развитие устройств сигнализации, централизации с. 212–229
и блокировки в дореформенный период (до 1861 г.)

Лупал Н. В. № 3,
Развитие устройств СЦБ в период промышленного с. 338–347
капитализма (1861–1900 г). Часть 1: Развитие науки
и техники в области железных дорог

Лупал Н. В. № 4,
Развитие устройств СЦБ в период промышленного с. 452–460
капитализма (1861–1900 г). Часть 2: Развитие
сигнализации

Никитин А. Б. № 4,
Научная школа кафедры «Автоматика и телемеханика с. 433–451
на железных дорогах» Петербургского государственного
университета путей сообщения Императора Александра I

Интеллектуальные системы управления

Кокурин И. М., Васильев А. Б. № 2,
Автоматизация информационной поддержки принятия с. 156–167
решений поездным диспетчером при организации
движения поездов

Кокурин И. М., Ковалев К. Е. № 4,
с. 367–380
Распределение функций и зон управления между
оперативным персоналом участковых станций при
проектировании электрической централизации

Никитин А. Б., Ковкин А. Н. № 1,
с. 51–62
Управление стрелочными электроприводами
в компьютерных системах горочной централизации

Таранец О. И. № 1,
с. 63–72
Оптимизация режимов торможения отцепов
на сортировочных горках в условиях действия случайных
факторов

Проектирование и тестирование логических устройств

Дмитриев В. В., Кононов К. С., Перский А. С. № 1,
с. 73–83
Синтез триггеров на базе теории конечных
автоматов

Сапожников Вал. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. № 3,
с. 311–337
Исследование свойств кодов Хэмминга и их модификаций
в системах функционального контроля

Сапожников Вал. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. № 2,
с. 195–211
Обнаружение опасных ошибок на рабочих выходах
комбинационных логических схем

Сапожников Вал. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. № 1,
с. 84–107
Применение кодов с суммированием при синтезе
систем железнодорожной автоматики и телемеханики
на программируемых логических интегральных схемах

Ходырев В. В., Вяткин А. Г. № 3,
с. 298–310
Синтез безопасных схемных решений на основе схем
общего назначения

Системы и устройства автоматики и телемеханики

Кравцов Ю. А. № 1,
с. 7–27
Электромагнитная совместимость рельсовых цепей
и электроподвижного состава с асинхронным тяговым
приводом

- Кравцов Ю. А., Архипов Е. В., Бакин М. Е.* № 2,
Перспективные способы кодирования рельсовых цепей
тональной частоты с. 119–126
- Манаков А. Д., Блюдов А. А., Кабецкий А. Г., Трошин А. А.* № 1,
Нормы опасного и мешающего влияния помех на устройства
АЛС-АРС системы БАРС Петербургского метрополитена с. 28–39
- Никитин А. Б., Болтаев С. Т.* № 3,
Оценка состояния инфраструктуры железнодорожной
автоматики и телемеханики Узбекистана для введения
высокоскоростного движения с. 251–270
- Никитин А. Б., Яшин М. Г., Пантелеев Р. А.* № 2,
Транспортабельные модули электрической централизации
как средство восстановления систем управления движением
поездов с. 127–142
- Попов П. А., Королев И. Н., Мыльников П. Д.* № 4,
Основные принципы контроля корректности бортовой
системы позиционирования средствами железнодорожной
автоматики с. 355–366
- Шаманов В. И.* № 3,
Управление процессом модернизации комплексов систем
железнодорожной автоматики и телемеханики с. 237–250

Стандартизация и сертификация

- Сивко Б. В.* № 4,
Аксиоматико-базисный подход для разработки безопасных
и отказоустойчивых систем с. 381–399

Теоретические вопросы автоматики и информатики

- Ефанов Д. В., Дмитриев В. В.* № 4,
Базисы двоичной логики с. 400–417

Техническая диагностика и прогнозирование

- Бочкарев С. В., Лыков А. А., Марков Д. С.* № 1,
Совершенствование методов диагностирования стрелочного
переводного устройства с. 40–50

- Иванов А. А., Легоньков А. К., Молодцов В. П.* № 3,
 Новые приборы регистрации параметров с. 282–297
 устройств железнодорожной автоматики в системе
 АПК-ДК (СТДМ)

Электронное моделирование

- Булавский П. Е., Марков Д. С., Соколов В. Б.,
 Константинова Т. Ю.* № 4,
 с. 418–432

Формализация алгоритмического описания систем
 обеспечения жизненного цикла железнодорожной
 автоматики и телемеханики

- Новиков Д. В.* № 2,
 с. 168–179

Способы уменьшения процессорного времени
 при моделировании принципиальных схем систем
 железнодорожной автоматики и телемеханики в среде
 Ngspice

- Ходаковский В. А., Ходаковский Т. В.* № 2,
 с. 180–194

Мера сходства узкополосных сигналов

LIST OF ARTICLES PUBLISHED IN 2015

Viability, reliability, safety

- A. V. Gorelik, P. A. Nevarov* No 3,
 pp. 271–281
 Analysis of reliability performances of railway
 automation and remote control systems, considering economical
 criteria

- A. V. Gorelik, P. A. Nevarov, I. A. Zhuravlev, A. S. Veselova* No 2,
 pp. 143–155
 Models for evaluating of technological efficiency of railway
 automation and remote control systems

History of automation

- N. V. Lupal* No 2,
 pp. 212–229
 Development of signaling, interlocking and line-block
 in the pre-reform period (before 1861)

N. V. Lupal No 3,
Development of signaling, interlocking and blocking
pp. 338–347
devices during the period of industrial capitalism (1861–1900).
Part 1: Development of science and technology of railways

N. V. Lupal No 4,
Development of signaling, centralization
pp. 452–460
and blocking devices during the period of industrial
capitalism (1861–1900).
Part 2: Signaling development

A. B. Nikitin No 4,
Scientific school of «Automation and remote control
pp. 433–451
on railways» department of Petersburg state transport
university

Intelligent control systems

I. M. Kokurin, A. B. Vasiliev No 2,
Automation of decision-making information support for train
pp. 156–167
controller for train traffic arrangement

I. M. Kokurin, E. K. Kovalev No 4,
Functions and control zones distribution between operational
pp. 367–380
personnel of the polling stations

A. B. Nikitin, A. N. Kovkin No 1,
Point machines control in computer systems of
pp. 51–62
hump interlocking

O. I. Taranets No 1,
Optimization of the braking modes of cuts of cars on humps
pp. 63–72
under the influence of random factors

Design and test of logical devices

V. V. Dmitriev, K. S. Kononov, A. S. Persky No 1,
Synthesis of flip-flops on the basis of the theory of finite-state
pp. 73–83
machines

Val. V. Sapozhnikov, Vl. V. Sapozhnikov, D. V. Efanov No 3,
Hamming codes and its modifications research within
pp. 311–337
concurrent error detection systems

Val. V. Sapozhnikov, Vl. V. Sapozhnikov, D. V. Efanov No 2,
Dangerous errors detection at the operational outputs of
pp. 195–211
combinational logic circuits

- Val. V. Sapozhnikov, Vl. V. Sapozhnikov, D. V. Efanov* No 1,
Application of codes with summation for the synthesis of pp. 84–107
railway automation and remote control systems based on field-
programmable gate arrays
- V. V. Khodyrev, A. G. Vyatkin* No 3,
Synthesis of safe circuit solutions, based on general-purpose pp. 298–310
circuits
- Systems and devices of automation and remote control**
- Yu. A. Kravtsov* No 1,
Electromagnetic compatibility of track circuits pp. 7–27
and electric rolling stock with asynchronous
traction motor
- Yu. A. Kravtsov, E. V. Arkhipov, M. E. Bakin* No 2,
Advanced coding schemes of voice-frequency track circuits pp. 119–126
- A. D. Manakov, A. A. Blyudov, A. G. Kabetsky, A. A. Troshin* No 1,
Norms for hazardous and harmful interferences pp. 28–39
for the ALS-ARS devices of BARS system
of St. Petersburg subway
- A. B. Nikitin, S. T. Boltaev* No 3,
State estimation of railway automation and remote pp. 251–270
control infrastructure of Uzbekistan for introduction
of high-speed running
- A. B. Nikitin, M. G. Yashin, R. A. Panteleev* No 2,
Portable modules of electric interlocking system as a measure pp. 127–142
for restoration of train traffic control systems
- P. A. Popov, I. N. Korolev, P. D. Mylnikov* № 4,
Basic principles of onboard positioning system correctness test pp. 355–366
by railway automation means
- V. I. Shamanov* No 3,
Management of the modernization process pp. 237–250
of the complex of railway automation and remote
control systems
- Standardization and certification**
- B. V. Sivko* No 4,
Axiomatic-based approach for development of trustworthy pp. 381–399
and fault-tolerant systems

Theory of automation and informatics*D. V. Efanov, V. V. Dmitriev*

Binary logic bases

No 4,
pp. 400–417**Technical diagnostics and prediction***S. V. Bochkarev, A. A. Lykov, D. S. Markov*

Improving the methods of set of points diagnosing

No 1,
pp. 40–50*A. A. Ivanov, A. K. Legon'kov, V. P. Molodtsov*

New devices for registration of parameters of railway automation hardware within APK-DK (STDM) system

No 3,
pp. 282–297**Electronic simulation***P. E. Bulavsky, D. S. Markov, V. B. Sokolov, T. Yu. Konstantinova*

Formalisation of algorithmic description of systems of railway automation and remote control life cycle provision

No 4,
pp. 418–432*D. V. Novikov*

On reducing the CPU time for simulating of typical ZhAT systems in Ngspice network

No 2,
pp. 168–179*V. A. Khodakovsky, T. V. Khodakovsky*

On similarity measure of narrow band signals

No 2,
pp. 180–194

Подписано в печать с оригинал-макета 21.12.2015. Формат 60×84/9,5. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 12,75. Уч.-изд. л. 7,5. Установочный тираж 500 экз. Заказ 1225. Цена свободная.
Отпечатано в типографии ФГБОУ ВПО ПГУПС. 190031, СПб., Московский пр., 9.