

6. Буков В.Н. Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем. – Калуга: Изд-во научной литературы Н.Ф. Бочкаревой, 2006. – 720 с.
7. Поляк Б.Т., Щербakov П.С. Робастная устойчивость и управление. – М.: Наука, 2002. – 304 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Н.И. Сельвесюк.

Бронников Андрей Михайлович – Военная академия ракетных войск стратегического назначения им. Петра Великого в г. Москве; e-mail: bronnikov_a_m@mail.ru; 109074, г. Москва, Китайгородский проезд, 9/5; тел.: 84997864618; в распоряжении начальника академии; д.т.н.; доцент.

Каравашкина Елена Олеговна – МНПК «Авионика» в г. Москве; e-mail: informpo4ta@mail.ru; 127055, г. Москва, ул. Образцова, 7; тел.: 84956842004; заместитель начальника отдела.

Bronnikov Andrey Mihaylovitsh – Military Academy of Strategic Rocket Forces, Moscow; e-mail: bronnikov_a_m@mail.ru; 9/5, Kitaygorodsky proezd, Moscow, 109074, Russia; phone: +74997864618; at the disposal of the head of the Academy; dr. of eng. sc.; associate professor.

Karavashkina Elena Olegovna – Joint Stock Company “AVIONICA”, Moscow; e-mail: informpo4ta@mail.ru; 7, Obraztsova street, Moscow, 127055, Russia; phone: +74956842004; deputy head of department.

УДК 621.314.5

А.А. Зарифьян, П.Г. Колпахчян, В.Х. Пшихопов, М.Ю. Медведев

ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА*

Рассматривается проблема синтеза энергосберегающего управления тяговым электроприводом железнодорожного транспорта. Приводится обзор классических методов управления тяговыми приводами. Рассмотрены принципы построения и структура современного асинхронного тягового электропривода. Для приведенной структуры описана комплексная математическая модель тягового электропривода. Приводятся результаты моделирования асинхронного тягового электропривода в режимах трогания с места и подавления боксования. Отмечается, что улучшение тяговых свойств электропривода возможно за счет более полного учета условий сцепления в системах автоматики.

Тяговый электропривод; энергосбережение.

A.A. Zarifian, P.G. Kolpahchyan, V.Kh. Pshikhopov, M.Yu. Medvedev

PROBLEMS OF DEVELOPMENT OF ENERGY-EFFICIENT ELECTRIC TRACTION CONTROL SYSTEMS.

This paper presents problem of power saving control design for electric traction drives. Review of classical control systems of electric traction drives is given. The principles and block-diagram of the modern AC traction drive for train. For the given block-diagram complex mathematical model of the AC traction drive is described. Computer simulation results for mode of movement starting and slip mode are presented. The properties of AC traction drives are possible to increase by full modeling of friction in the automatic mode.

Traction drive; energy savings.

* Работа поддержана грантом РФФИ №12-08-13112 офи_м_РЖД «Разработка методов оптимизации энергопотребления электропоездов в динамических режимах на базе комплексной системы управления движением и энергоснабжением».

Введение. Проблема повышения эффективности железнодорожных перевозок связана с улучшением тяговых свойств электровозов [1–4]. Экстенсивное развитие тягового электропривода (ТЭП) уже исчерпало себя, так как дальнейшее увеличение мощности тяговых двигателей затруднено из-за массо-габаритных ограничений и ограничений, связанных с проблемами сцепления колеса с рельсом.

На ранее выпущенных электровозах регулирование режимов работы осуществляется машинистом вручную. Так, магистральный электровоз постоянного тока ВЛ10 является основным грузовым локомотивом на линиях постоянного тока железных дорог стран СНГ. Регулирование силы тяги и скорости электровоза ВЛ10 осуществляется следующим образом:

1. Для изменения частоты вращения тяговых электродвигателей (ТЭД) применяется переключение схемы их соединения. Предусмотрены последовательное (С) соединение восьми ТЭД, последовательно-параллельное (СП) соединение двумя параллельными группами по четыре двигателя и параллельное (П) соединение четырех групп по два двигателя. Напряжение, подведенное к ТЭД, принимает ступенчатый характер значения 375, 750 и 1500 В.

2. Подключая в якорную цепь дополнительные сопротивления, получают возможность более плавного регулирования скорости при трогании с места и разгоне.

3. Также применяется система ступенчатого изменения магнитного потока путем шунтирования главных полюсов.

Перечисленные способы регулирования частоты вращения ТЭД являются классическими и применяются на электровозах постоянного тока с коллекторными ТЭД. Дальнейшее улучшение тяговых свойств электроподвижного состава ведется путем улучшения тягово-энергетических показателей ТЭП и улучшения использования сцепного веса локомотива.

Повысить использование сцепного веса, регулируя силы тяги и торможения, возможно путем применения автоматизированного ТЭП, позволяющего реализовать жесткие тяговые характеристики и свести к минимуму влияние возмущений со стороны питающей сети и нагрузки. В [5–9] отмечается, что одним из путей улучшения тяговых свойств ЭПС является повышение жесткости тяговых характеристик, поэтому с этой точки зрения целесообразно применение тяговых двигателей с жесткими электромеханическими характеристиками – двигателей постоянного тока с независимым возбуждением и бесколлекторных двигателей переменного тока, в особенности асинхронных двигателей. Так, в перспективных локомотивах новые электровозы оснащены тяговыми электроприводами на основе АД (АТЭП), в соответствии с документом «Типы и основные параметры локомотивов», утвержденным распоряжением МПС России №747р от 27.11.2002.

Постановка задачи. В состав АТЭП входят асинхронный тяговый двигатель (АТД) и система преобразования электроэнергии. Выпуск АТД мощностью 1000...1200 кВт освоен отечественной промышленностью. В то же время элементная база для преобразователей импортная. Но при наличии силовых полупроводниковых приборов (СПП) требуемой мощности необходимы эффективные способы и алгоритмы управления ими. На современных образцах ЭПС производства ведущих зарубежных фирм применяются различные варианты управления АТЭП, основанные на принципах векторного регулирования АТД, которые являются интеллектуальной собственностью этих фирм и практически недоступны. Следовательно, освоение производства ЭПС на основе АТЭП отечественной разработки требует формирования научной базы для его проектирования и проведения интенсивных исследовательских и проектно-конструкторских работ. Одной из наиболее важных задач является создание способов и алгоритмов регулирования, обеспечивающих реализацию высоких тяговых свойств электровоза во всем диапазоне нагрузок и скоростей.

Для ее решения необходимы разработка концептуального подхода к регулированию АТЭП, создание принципов и алгоритмов функционирования системы управления АТЭП с учетом особенностей его работы на электроподвижном составе (ЭПС). Кроме того, необходима комплексная оценка влияния реализуемых принципов регулирования на работу оборудования и подсистем электровоза.

Принципы создания системы управления АТЭП. Использование АТД усложняет систему преобразования электроэнергии электровоза и характеризуется высокой степенью взаимного влияния процессов между отдельными элементами АТЭП.

Ручное управление АТД является неэффективным из-за наличия возмущений как со стороны системы энергоснабжения, так и со стороны нагрузки ТЭП. Поэтому для реализации максимально возможных сил тяги и торможения необходимо использование автоматического управления. Автоматизация систем регулирования ТЭП позволяет расширить возможности использования условий сцепления за счет формирования тяговых характеристик с регулируемой жесткостью. Поэтому одним из наиболее важных вопросов при проектировании ТЭП нового поколения с АТД является создание системы управления, которая должна обеспечивать реализацию высоких тяговых свойств электровоза во всем диапазоне нагрузок и скоростей, причем ее влияние на тягово-энергетические показатели локомотивов является в значительной степени определяющим.

Регулирование момента АТД необходимо осуществлять без колебаний и перерегулирования, а его быстродействие должно быть достаточным для прекращения боксования в случае его возникновения. По различным оценкам [8, 9] некомпенсированная постоянная времени регулирования момента должна быть не более 3–5 мс.

Постоянная времени ротора АТД может достигать единиц секунд, поэтому применение принципов скалярного регулирования для построения систем автоматического регулирования (САР) АТЭП не позволяет получить требуемые динамические показатели системы. В [10] отмечается, что только САР, реализующие автоматическое поддержание постоянства магнитного потока, позволяют достичь необходимое быстродействие и обеспечить наиболее высокие тяговые свойства локомотива. Это положение подтверждается передовым опытом разработки электроподвижного состава с АТЭП как в России, так и за рубежом.

Наибольшее распространение получила двухзвенная структура преобразовательной установки. При этом на ЭПС переменного тока в качестве входного, как правило, используется 4q-S преобразователь, позволяющий получить на выходе стабилизированное напряжение заданной величины и имеющий хорошие энергетические показатели. На ЭПС постоянного тока в качестве входного используется импульсный стабилизирующий преобразователь. В качестве выходного преобразователя чаще всего используется автономный инвертор напряжения (АИН), который преобразует частоту, число фаз и регулирует величину выходного напряжения.

На рис. 1 приведена структурная схема АТЭП электровоза переменного тока. Объектом управления является АТД и преобразовательная установка для его питания. Система управления имеет иерархическую структуру, включающую три уровня. На верхнем уровне находится система управления движением локомотива. Входной информацией для нее являются поступающие с контроллера машиниста (КМ) команды, данные о состоянии оборудования локомотива и информация, поступающая от диспетчерской службы. Эта система формирует задания на управление 4q-S преобразователями, потокосцепления и электромагнитного момента на валу АТД в зависимости от режима работы, текущих параметров движения и имеющейся информации о состоянии локомотива.

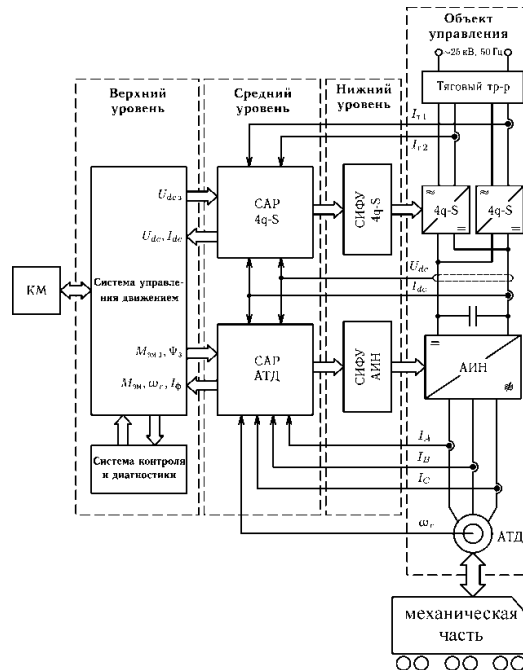


Рис. 1. Структурная схема АТЭП электровоза переменного тока

Система управления движением включает в себя подсистемы защиты от блокирования, защиты от аварийных ситуаций, а также индикации текущего состояния систем и оборудования электровоза. Она является общей для всего локомотива и обеспечивает совместную работу подсистем нижнего уровня иерархии.

На среднем уровне находятся САР отдельных элементов АТЭП, таких как 4-qS преобразователь и система «АИН – АТД». В их задачи входит по задаваемым напряжению в звене постоянного тока, моменту и потокосцеплению АТД выдавать системе импульсно-фазового управления (СИФУ) соответствующих преобразователей исходные данные для формирования последовательности импульсов управления силовыми полупроводниковыми приборами.

Системы автоматического регулирования и СИФУ выполняются для тяговых двигателей, питающихся от общего инвертора, и вместе с устройствами преобразования представляют собой систему АТЭП одной тележки локомотива.

С учетом описанных выше положений была разработана структура и определены параметры системы управления АТЭП. Выбор схемного решения и алгоритмов управления преобразовательной установки во многом определяют тягово-энергетические показатели АТЭП, а реализуемый САР способ регулирования АТД – его динамические свойства. Поэтому решение этих вопросов является одной из наиболее важных проблем при создании перспективного ЭПС.

Комплексная математическая модель ТЭП. Для исследования процессов в АТЭП электровоза широко используются методы математического моделирования. Особенно эффективным является применение компьютерных моделей на этапе проектирования, поскольку уже на ранних стадиях разработки нового электровоза позволяет получить ответы на ряд вопросов без изготовления сложных и дорогостоящих натурных образцов. Особую актуальность применение комплексных математических моделей электромеханических процессов в ТЭП электровоза приобретает при разработке систем управления.

К числу задач, которые ставятся в ходе разработки тягового оборудования, относится расчет режимов работы различных устройств, определение тепловых потерь в тяговых двигателях и элементах статических преобразователей, пульсаций электромагнитного момента на валу АТД, анализ работы САР в различных. Решение этих задач требует создания математического аппарата для представления электромагнитных и электромеханических процессов.

Математическое моделирование физических процессов, протекающих в ТЭП электровоза в динамических режимах, связано с целым рядом особенностей:

- ◆ ТЭП электровоза является сложной динамической системой, в состав которой входят электрическая, механическая и управляющая взаимодействующие друг с другом подсистемы;
- ◆ диапазон изменения частоты вращения ротора тягового двигателя достаточно широк и включает стоповые и околостоповые режимы;
- ◆ силовые полупроводниковые приборы в цепях статических преобразователей ТЭП имеют нелинейные характеристики;
- ◆ при исследовании процессов в тяговых двигателях необходимо учитывать насыщение магнитной цепи;
- ◆ скорость процессов, протекающих в отдельных подсистемах ТЭП электровоза, отличается на несколько порядков;
- ◆ нагрузка ТЭП электровоза определяется силой сцепления в контакте «колесо – рельс», которая имеет нелинейную зависимость от скорости проскальзывания колес с положительными и отрицательными уклонами и гистерезис;
- ◆ при создании АТЭП электровоза могут использоваться различные структуры преобразователей с разными законами и алгоритмами управления.

Для адекватного отображения процессов в АТЭП в нестационарных режимах необходимо обязательное рассмотрение переходных механических процессов, связанных с развитием и затуханием бокового проскальзывания колесных пар, совместно с электромагнитными процессами в цепях тяговых двигателей, из-за высокой степени их взаимного влияния.

Моделирование отдельного колесомоторного блока не дает ответа на вопросы, связанные с взаимным влиянием различных элементов. Анализ работы АТЭП на уровне тележки не позволяет добиться достаточной точности в тех случаях, когда требуется учитывать взаимодействие между компонентами системы. Это исследования, связанные с анализом поведения электровоза в нестационарных режимах, при пуске, действия системы управления при возникновении бокового проскальзывания или юза, взаимодействие электровоза и системы тягового энергоснабжения и т.д. Поэтому наиболее адекватные результаты дает моделирование электромеханических процессов, протекающих в одной или несколько параллельно работающих секциях. Препятствием на пути реализации таких моделей является их большая размерность. Но их создание и использование следует считать актуальным, с их помощью можно получить ответы на целый ряд вопросов о взаимном влиянии элементов ТЭП в нестационарных режимах. Поэтому в дальнейших исследованиях электромеханические процессы в ТЭП рассматриваются на уровне всего электровоза.

Для решения поставленных задач по комплексному анализу работы АТЭП, как электромеханической системы, создана математическая модель электровоза [11], включающая в себя модели АТД, устройств преобразования электроэнергии, системы управления, механической части электровоза, процессов в контакте «колесо – рельс». С ее помощью проведены исследования во всех режимах работы электровоза, включая трогание с места и движение с малой скоростью, учитывать

все основные факторы, влияющие на точность представления процессов. С помощью разработанной модели выполнена оценка эффективности принципов и алгоритмов управления, определено ее влияние на функционирование устройств преобразования энергии и АТД, проведен анализ электромеханических процессов.

Результаты моделирования в режиме трогания с места. Рассмотрим электромеханические процессы, возникающие при трогании с места и разгоне (рис. 2). К негативным факторам, оказывающим значительное влияние на работу, относятся неблагоприятный гармонический состав электромагнитного момента АТД и как следствие низкочастотные пульсации.

Значительная магнитная инерционность АТД и ограничения по току и напряжению со стороны инвертора приводят к тому, что одновременное регулирование потокосцепления и момента при большом рассогласовании затруднено. Поэтому при пуске электровоза в течение 0,2 с от начала работы система управления делает уставку по моменту нулевой, что необходимо для завершения переходного процесса регулирования потокосцепления ротора. Затем задание момента увеличивается до требуемой величины.

Некоторые из полученных результатов представлены на рис. 2, где обозначено: U_{AB} – линейное напряжение АТД; I_A – ток фазы АТД; M^*_1, M_{em1} – задание момента и его действительное значение; ω_1 – угловая скорость вращения ротора первого по ходу АТД; F_{x1l}, F_{x1r} – силы тяги левого и правого колес первой по ходу колесной пары, F_{T1}, F_{T2}, F_{T3} – усилия в наклонных тягах.

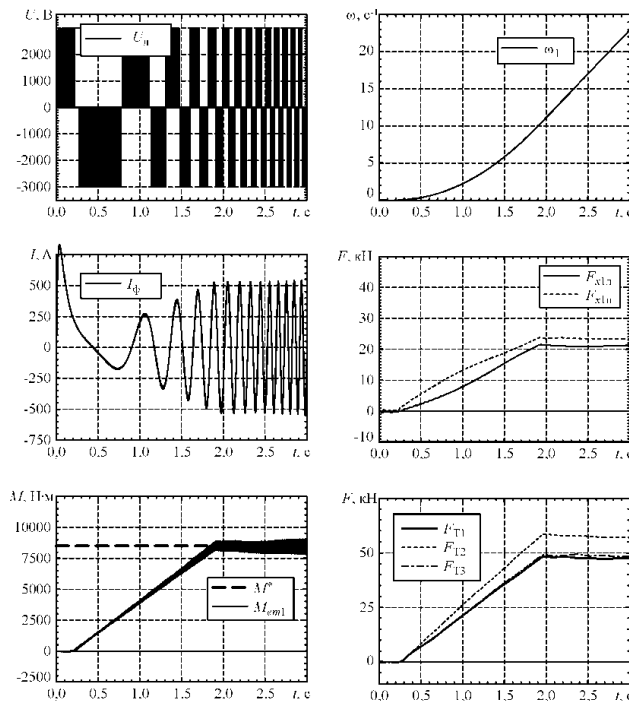


Рис. 2. Электромеханические процессы при трогании с места

Анализ результатов показал, что процесс пуска и разгона электровоза протекает с хорошими динамическими показателями. В целом, можно отметить, что качество регулирования остается высоким во всем диапазоне нагрузок и скоростей, начиная от стоповых и околостоповых режимов, вплоть до конструкционной скорости.

Результаты моделирования при подавлении боксования. Работа АТЭП на пределе по сцеплению связана с повышенной вероятностью возникновения боксования. В процессе исследований установлено, что для эффективного подавления боксования необходимо снижение электромагнитного момента на валу АТД, интенсивность изменения которого определяется из условий отсутствия колебаний и ударных нагрузок в механической части тягового электропривода.

В качестве примера функционирования системы защиты от боксования исследуемого электровоза выполнен расчет процессов при наезде на участок пути с ухудшенными условиями сцепления, длина которого превышает расстояние между крайними КП. При этом учитывались вертикальные и горизонтальные неровности путевой структуры. Результаты моделирования для первой по ходу колесной пары показаны на рис. 3. Скорость движения электровоза равна 22 м/с.

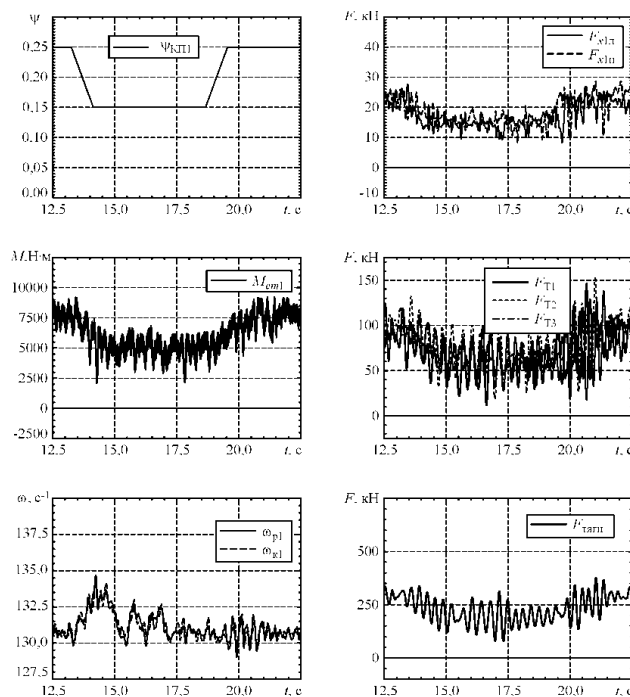


Рис. 3. Прохождение участка с ухудшенными условиями сцепления

Приняты следующие обозначения: $\psi_{кп1}$ – коэффициент сцепления в месте контакта «колесо-рельс» для первой КП; M_{em1} – электромагнитный момент АТД; $\omega_{р1}$, $\omega_{к1}$ – угловые скорости ротора АТД и колесной пары (умножена на передаточное отношение тягового редуктора); $F_{х1л}$, $F_{х1п}$ – силы тяги левого и правого колес; $F_{т1}$, $F_{т2}$, $F_{т3}$ – усилия в наклонных тягах; $F_{тяги}$ – усилие на автосцепке электровоза.

Как видно из приведенных результатов, при движении электровоза на участке с нормальными условиями сцепления все колесные пары работают в пределах продуктивной ветви характеристики сцепления. При снижении коэффициента сцепления начинает развиваться процесс боксования. По мере ухудшения условий сцепления система управления поэтапно снижает моменты на валах АТД и возникшее боксование подавляется. После проезда участка с ухудшенными условиями сцепления система управления восстанавливает заданное значение момента.

Заключение. Анализ результатов показал, что разработанная система управления АТЭП позволяет выполнять регулирование потокоцепления и момента при пуске и разгоне электровоза с хорошими динамическими показателями. Качество регулирования остается высоким во всем диапазоне нагрузок и скоростей, начиная от стоповых и околостоповых режимов, вплоть до конструкционной скорости. Это подтверждает правильность принятых при ее разработке положений, в частности способа регулирования АТД, быстродействия, структуры и принципов синтеза.

Улучшение их тяговых свойств за счет более полного использования потенциальных условий сцепления в контакте «колесо – рельс» требует применения соответствующих комплексных моделей движения и современных методов управления подвижными объектами [12–14]. Решение этой задачи требует широкого применения средств автоматики, в частности, для регулирования силы тяги.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курбасов А.С. Электровозы нового поколения как фактор улучшения базовых показателей работы железных дорог // Железнодорожный транспорт. – 2003. – № 10. – С. 55-58.
2. Курбасов А.С., Шабалин Н.Г. О стратегической программе технического совершенствования и развития российских железных дорог // Железнодорожный транспорт. – 2004. – № 9. – С. 98-100.
3. Мугинштейн Л.А., Кучумов Л.А., Назаров О.Н. О выборе типа тягового электропривода электроподвижного состава // Железнодорожный транспорт. – 2005. – № 5. – С. 42-48.
4. Новый подвижной состав // Локомотив. – 2005. – С. 2-4.
5. Минов Д.К. Повышение тяговых свойств электровозов и тепловозов с электропередачей. – М.: Транспорт, 1965. – 267 с.
6. Менишутин Н.Н. Зависимость между силой сцепления и скоростью скольжения колесной пары локомотива // Вестник ЦНИИ МПС. – 1960. – № 6. – С. 12-16.
7. Исаев И.П. Случайные процессы и коэффициент сцепления. – М.: Транспорт, 1970. – 182 с.
8. Тулунов В.Д. Автоматическое регулирование сил тяги и торможения электроподвижного состава. – М.: Транспорт, 1978. – 368 с.
9. Петров П.Ю. Быстродействующая система управления тяговым электроприводом для улучшения сцепных свойств электроподвижного состава с асинхронными тяговыми двигателями: Дис. . . канд. техн. наук: 05.09.03 / Московский государственный университет путей сообщений (МИИТ). – М., 1998. – 197 с.
10. Колтахчян П.Г., Петров П.Ю. Анализ способов управления асинхронным тяговым двигателем на электроподвижном составе // Вестник Всерос. науч.-исслед. и проект.-конструкт. ин-та электровозостроения: науч. изд. / ОАО ВЭЛНИИ. – 2005. – № 2 (49). – С. 174-187.
11. Бахвалов Ю.А., Зарифьян А.А., Колтахчян П.Г. и др. Динамические процессы в асинхронном тяговом приводе магистральных электровозов. – М.: Маршрут, 2006. – 374 с.
12. Пищопов В.Х., Медведев М.Ю., Сиротенко М.Ю., Носко О.Э., Юрченко А.С. Проектирование систем управления роботизированных воздухоплавательных комплексов на базе дирижаблей // Известия ТРТУ. – 2006. – № 3 (58). – С. 160-167.
13. Пищопов В.Х., Медведев М.Ю. Блочный синтез робастных систем при ограничениях на управления и координаты состояния // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2011. – № 1. – С. 2-8.
14. Medvedev M.Y., Pshikhopov V.Kh. Robust control of nonlinear dynamic systems // Proc. of 2010 IEEE Latin-American Conference on Communications. September 14–17, 2010, Bogota, Colombia.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Р.А. Колосов.

Зарифьян Александр Александрович – ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный университет путей сообщения»; e-mail: zarifian_aa@mail.ru; 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2; тел.: 88632726466; кафедра «Локомотивы и локомотивное хозяйство»; д.т.н.; профессор.

Колпахчян Павел Григорьевич – e-mail: kolpahchyan@mail.ru; кафедра «Локомотивы и локомотивное хозяйство»; д.т.н.; доцент.

Пшихопов Вячеслав Хасанович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: pshichop@rambler.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371694; кафедра электротехники и мехатроники; зав. кафедрой; д.т.н.

Медведев Михаил Юрьевич – e-mail: medvmihal@gmail.com; кафедра электротехники и мехатроники; д.т.н.; профессор.

Zarifian Alexandr Alexandrovich – FSBEI HPE «Rostov state University of communications»; e-mail: zarifian_aa@mail.ru; 2, area Rostov Infantry Regiment of Militi, Rostov-on-Don, 344038, Russia; phone: +78632726466; the department of locomotives and locomotive economy; dr. of eng. sc.; professor.

Kolpahchyan Pavel Grigor'evich – e-mail: kolpahchyan@mail.ru; the department of locomotives and locomotive economy; dr. of eng. sc.; associate professor.

Pshikhopov Vyacheslav Khasanovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: pshichop@rambler.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371694; the department of electrical engineering and mechatronics; head the department; dr. of eng. sc.

Medvedev Mikhail Yur'evich – e-mail: medvmihal@gmail.com; the department of electrical engineering and mechatronics; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 681.513.2; 519.244.2

Г.В. Горелова, Э.В. Мельник

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАРИАНТОВ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМАХ С ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ ОРГАНИЗАЦИЕЙ*

Рассмотрена возможность повышения надежности распределенных информационно-управляющих систем (РИУС) с децентрализованной организацией за счет скользящего резервирования. В качестве скользящего резерва выступает резерв производительности процессорных устройств (ПУ) в отличие от традиционного способа скользящего резервирования только ПУ. Предложены варианты такого резервирования. Для оценки результативности этих вариантов проведено имитационное моделирование РИУС по разработанным моделям и алгоритмам. С целью сокращения числа опытов вычислительного эксперимента использовались методы планирования эксперимента. Выявлены конфигурации РИУС, в которых эффект от использования скользящего резервирования ресурсов максимален.

Надежность; программное устройство; скользящее резервирование; эффект; конфигурация; планирование вычислительных экспериментов; имитационное моделирование.

* Исследование выполнено при поддержке РФФИ, грант 11-07-00542-а «Разработка научных основ создания сетцентрических информационно-управляющих систем».