

С. А. Лунев, Д. В. Борисенко, Р. Ш. Аюпов

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

В статье рассмотрены теоретические направления, перспективные с точки зрения автоматизации управления технологическими процессами и проектирования технологических комплексов на железнодорожном транспорте.

Общими требованиями для технологических процессов предприятий железнодорожного транспорта являются непрерывность, безопасность, контролируемость. Обеспечить выполнение этих требований часто оказывается трудной задачей в силу объективных причин, обусловленных природными явлениями, технологическими процессами предприятий других отраслей, социальными явлениями. Очевидно, что решение подобной задачи требует поиска не только новых перспективных методов, применяемых при управлении технологическими процессами, но и новых методов проектирования технологических комплексов, создаваемых на железнодорожном транспорте.

Как правило, при управлении технологическими процессами на железнодорожном транспорте требуется анализ показаний большого числа датчиков различной природы, а при проектировании – учет не меньшей совокупности разнородных факторов. Несмотря на проводимый в последнее десятилетие курс на информатизацию и автоматизацию железнодорожной отрасли, задача автоматизированного анализа состояния технологических процессов и принятия решений в подавляющем большинстве случаев не решена.

Задачи автоматизации управления технологическими процессами и проектирования технологических комплексов на железнодорожном транспорте, по мнению авторов, могут быть решены с применением следующих перспективных теоретических направлений.

1. Графовые изображения, предназначенные, как правило, для визуализации информационных моделей, обладающих семантикой и иерархической структурой. Существуют различные методы генерации статических графов, которые применимы к задачам автоматизации построения надежных и безопасных систем инфраструктуры железных дорог, непосредственно определяющих бесперебойную работу транспортного конвейера.

2. Аппарат конформных отображений, базирующийся на простейших функциях с весьма простыми и наглядными законами и имеющий существенные преимущества по сравнению с эквивалентным классическим матричным аппаратом. Это позволяет оперативно реагировать на аварийную или предостерегающую ситуацию, особенно при больших объемах вычислений, в системах контроля и управления.

3. Теория нечетких множеств, нечеткая логика и нейронные сети, получившие мировое признание, как инструмент для решения сложных, плохо формализуемых задач, в том числе и при построении различных систем управления. Принятие решений на основании анализа большого объема разнородной информации, классификация, распознавание образов, фильтрация – задачи, с успехом решаемые с помощью данного теоретического аппарата, относящегося к области искусственного интеллекта [1]. Однако до настоящего времени эти методы практически не применяются на железнодорожном транспорте, где с их помощью можно не только повысить безопасность движения поездов, но и улучшить экономические показатели.

В настоящее время авторами исследуются возможности применения указанных теоретических направлений в следующих областях.

1. Повышение эффективности системы пропускания обратного тягового тока в электротехническом комплексе электроснабжения железных дорог достигается за счет рационального выбора места установки и количества междупутных и междурельсовых перемычек, а также

за счет автоматизации рутинных проектных операций и сокращения доли ручного труда при внесении изменений в схемы канализации обратного тягового тока (КОТТ) в случае капитального ремонта или реконструкции [2].

Вместе с тем обеспечение выполнения нормативных требований при построении систем пропуска обратного тягового тока является актуальной, направленной на повышение безопасности движения поездов, и трудоемкой, особенно в период проведения реконструкции путевого развития тяговых рельсовых сетей, задач. Как показывает опыт, во многих случаях данные системы содержат ошибки, допущенные при их синтезе. В связи с этим возникает необходимость автоматизировать этап разработки и построения данных систем. В качестве решения предлагается формализовать данный процесс на основе применения теории графов, путем синтеза по системе пропуска обратного тягового тока соответствующего ей графа, который затем анализируется на предмет соответствия нормативным документам:

количество двухниточных рельсовых цепей (РЦ) в простом контуре (при отсутствии параллельных ветвей для протекания тягового тока) или в эквивалентном контуре (при наличии таких ветвей) должно быть не менее 10 при частоте сигнального тока 25 Гц или не менее шести при частоте сигнального тока 50 Гц. При этом в расчете учитываются только двухниточные РЦ;

для тональных РЦ длина обходной цепи для сигнального тока по замкнутому контуру (простому или эквивалентному) должна быть не менее четырехкратной длины самой длинной рельсовой цепи, входящей в этот контур.

Проверку указанных требований следует выполнять для всех элементарных ветвей (не имеющих параллельных ответвлений), входящих в сложный разветвленный контур.

Авторами разработаны универсальные алгоритмы анализа схем КОТТ при рассмотрении трех или более параллельных между собой ветвей.

На основании изложенного выше создана автоматизированная система анализа схем КОТТ (АСКОТТ), имеющая свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Эта программа и метод расчета прошли апробацию на Западно-Сибирской, Красноярской и Забайкальской железных дорогах. Данный программный продукт может использоваться для упрощения работы со схемами КОТТ в период развития и реконструкции железнодорожного транспорта [3].

2. Анализ исправности, безопасности функционирования, а также распространения сигнала по рельсовым линиям в условиях функционального влияния множества факторов, изменяющихся с течением времени, предполагает разработку эффективного диагностического комплекса на основе современной микропроцессорной элементной базы с применением специализированного, быстрого и точного математического аппарата [4]. В качестве такого математического аппарата для непрерывного контроля состояния тяговой рельсовой сети авторами предлагается использование аппарата конформных отображений.

Рельсовая сеть, состоящая из отдельных рельсовых линий, выполняет функции по обеспечению безопасности движения и непрерывному пропуску обратного тягового тока, при этом функционируя в достаточно жестких и динамично изменяющихся условиях (зависимость от сопротивления изоляции, сопротивления рельсов, поездной ситуации, температурных условий и т. д.).

Основным преимуществом математического аппарата конформных отображений для непрерывного контроля технического состояния рельсовой линии является его универсальность к виду рельсового четырехполюсника (РЧП), а также наглядное номографическое представление изменения состояния в конкретный момент времени. В качестве критерия дискретности измерения рассматривается единичный, настраиваемый пользователем интервал времени для осуществления поиска постепенных отказов. Естественно, что с увеличением интервала времени нагрузка на вычислительные ресурсы программно-аппаратного комплекса уменьшается, но также уменьшается и вероятность фиксации внезапного отказа в любой момент времени. Очевидно что предлагаемый комплекс должен представлять собой сис-

тему реального времени как со стороны аппаратной части, так и со стороны реализации программного обеспечения. Для осуществления непрерывного контроля технического состояния каждой отдельной рельсовой линии необходимо иметь, как минимум, три информационных буфера: один для обслуживания процесса поиска постепенных отказов и два, с учетом особенностей обработки информации в системах реального времени, для обслуживания процесса поиска внезапных отказов.

Отображение множества выходных параметров РЧП Z на множество входных W выполняется с использованием дробно-линейного преобразования [5]:

$$W = \frac{A \cdot Z + B}{C \cdot Z + D}, \quad (1)$$

где A, B, C, D – коэффициенты рельсового четырехполюсника.

Для пассивного четырехполюсника, каковым является рельсовая линия, имеем: $A \cdot D - B \cdot C = 1$.

Необходимо отметить, что станционная обратная тяговая сеть представляет собой достаточно сложную, разветвленную структуру, но имеет явное преимущество перед перегонной обратной тяговой сетью – точки измерения входных параметров (напряжение и ток на выходе источника питания и напряжение на входе путевого приемника) сосредоточены на посту электрической централизации, что облегчает снятие диагностической информации. Для перегонных сетей, с этой точки зрения, удобны системы с централизованным размещением аппаратуры. Тем не менее существует возможность доставки информации с перегона для классических систем с применением высокоскоростных модемов, выполненных по технологии SHDSL [6].

Важной особенностью разработанного диагностического комплекса является учет всех факторов влияния на техническое состояние рельсовой сети, большинство из которых имеют вероятностный характер. Воздействие всех видов помех может быть совмещенным во времени, а может проявляться и в разные моменты.

Основными источниками помех в рельсовой линии являются тяговый ток; посторонние блуждающие токи, создаваемые заземленными источниками электрической энергии, к которым относятся цепи питания разъединителей, постов секционирования и пунктов параллельного соединения; заземляющие устройства, соединенные с рельсовыми нитями.

Принципы построения распознающих классификаторов состояния рельсовых линий следующие: микропроцессорный классификатор с помощью обученной решающей функции предварительно разделяет множество образов, характеризующихся совокупностью первичных информативных признаков, на непересекающиеся классы, соответствующие режимам функционирования, а затем в каждый дискретный момент времени достоверно определяет принадлежность предъявляемого образа к конкретному состоянию. И в этой связи определение состояния рельсовой линии в основном связано с решением задач выделения информативных признаков и синтезом правил, на основе которых будет осуществляться разделение множества образов на классы.

На основе сказанного выше авторами разработано общее словесное описание алгоритма функционирования программной части диагностирующего комплекса.

Шаг 1. Получение значений информативных признаков.

Шаг 2. Формирование системы A -параметров исследуемого РЧП.

Шаг 3. Выборка образа номографических решений для исследуемого РЧП из базы номографических образов.

Шаг 4. Проецирование полученного значения выходного сопротивления на основе текущих измерений с использованием аппарата конформных отображений на область общих решений [6].

Шаг 5. Определение положения текущего измерения по отношению к области общих решений.

Шаг 6. Формирование выводов о текущем состоянии исследуемого РЧП.

Диагностический комплекс позволяет производить следующие операции: мониторинг состояния системы пропуска обратного тягового тока в реальном масштабе времени; обработку полученной информации с применением математического аппарата конформных отображений и дробно-линейных преобразований для выявления продольных и поперечных неоднородностей (дефектов); определение текущего состояния рельсовой линии, подготовку рекомендаций по устранению выявленных предотказных ситуаций [4].

3. Большое число железнодорожных потребителей электроэнергии являются потребителями первой категории. Это означает, что для каждого такого потребителя актуальна задача оперативного выбора одного из нескольких имеющихся источников электроэнергии. Сложная, географически распределенная система электроснабжения на железнодорожном транспорте предполагает многообразие протекающих в ней процессов и явлений. Постоянно расширяющийся спектр электротехнического оборудования ответственных потребителей определяет разнообразие требований к качеству электроэнергии в системе электроснабжения. Повысить эффективность оперативного выбора источника электроэнергии можно за счет комплексной оценки ее качества по совокупности наиболее важных для потребителей параметров.

Согласно ГОСТ 23875-88 под качеством электроэнергии следует понимать «степень соответствия параметров электрической энергии их установленным значениям». Такое определение не учитывает возможности специфических требований, предъявляемых электроприемниками к параметрам электроэнергии. В работе [7] под качеством электроэнергии предлагается понимать «...совокупность параметров (свойств), обуславливающих пригодность электроэнергии предлагается удовлетворять определенные потребности электроприемников в соответствии с их назначением». Анализ нормативных документов показывает, что это определение синтезировано на основе терминологии ГОСТ 15467-79. Оба эти определения имеют как положительные стороны, так и недостатки. В официальном определении качества электроэнергии не учитывается возможность специфических требований, предъявляемых электроприемниками к ее параметрам, тогда как определение, данное в работе [5], плохо согласуется с нормами качества электроэнергии, вводимыми отраслевыми и общегосударственными стандартами, такими, например, как ГОСТ 13109-97.

Для удобства формализации и использования этих понятий при построении вычислительных структур авторами предлагается следующее. На основе определений «комплексный показатель качества» из ГОСТ 15467-79 и «качество электроэнергии» из ГОСТ 23875-88 и из работы [5] ввести понятие «комплексный показатель качества электроэнергии». Комплексный показатель качества электроэнергии (КПКЭ) целесообразно определить как функцию нескольких переменных, определенную на декартовом произведении множеств возможных значений параметров, используемых для оценки качества электроэнергии, и принимающую значения на интервале $[0,1]$. Значение КПКЭ интерпретируется как степень соответствия всех контролируемых параметров установленным значениям, обуславливающая пригодность электроэнергии удовлетворять определенные потребности электроприемников в соответствии с их назначением. Таким образом, оценка качества электроэнергии сводится к вычислению КПКЭ.

Необходимость учета множества разнородных факторов делает задачу вычисления КПКЭ сложной и плохо формализуемой. Для ее решения может быть применен аппарат теории нечетких множеств и теории искусственных нейронных сетей, позволяющий получить алгоритмы вычисления КПКЭ.

Решение данной задачи с помощью теории нечетких множеств заключается в выражении КПКЭ через отдельные параметры электроэнергии путем введения для каждого из них отдельного нечеткого множества.

Показать применение этого метода можно на примере комплексной оценки качества электроэнергии по напряжению, частоте и коэффициенту одиннадцатой гармонической составляющей. Оценка по этим параметрам актуальна, в частности, для потребителей первой категории на железнодорожном транспорте, электрифицированном на постоянном токе.

На множествах возможных значений выбранных параметров и показателей качества электроэнергии необходимо задать по нечеткому множеству, которые позволят формализовать понятия «нормальное напряжение», «нормальная частота», «нормальный коэффициент 11-й гармоники»:

$$A_1 = \{(U, \mu_{A_1}(U)); U \in X_1\}; \quad (2)$$

$$A_2 = \{(f, \mu_{A_2}(f)); f \in X_2\}; \quad (3)$$

$$A_3 = \{(K_{U11}, \mu_{A_3}(K_{U11})); K_{U11} \in X_3\}, \quad (4)$$

где U, f – значения напряжения и частоты;

K_{U11} – значение коэффициента одиннадцатой гармонической составляющей;

X_1, X_2, X_3 – множества возможных значений соответственно напряжения, частоты и коэффициента одиннадцатой гармонической составляющей;

$\mu_{A_1}(U)$ – функция принадлежности значения U к нечеткому множеству A_1 ;

$\mu_{A_2}(f)$ – функция принадлежности значения f к нечеткому множеству A_2 ;

$\mu_{A_3}(K_{U11})$ – функция принадлежности значения K_{U11} к нечеткому множеству A_3 .

На множестве возможных значений комплексного показателя качества электроэнергии предлагается ввести нечеткое множество, с помощью которого формализовать понятие «качественная электроэнергия»:

$$M = f(U, f, K_{U11}); \quad (5)$$

$$K = \{(M, \mu_K(M)); M \in [0, 1]\}, \quad (6)$$

где M – комплексный показатель качества электроэнергии.

В качестве нечетких множеств, введенных формулами (1) – (4), могут быть использованы треугольные нечеткие числа и трапециевидные нечеткие интервалы. График функции принадлежности трапециевидного нечеткого интервала, формализующего понятие «нормальное напряжение», приведен на рисунке 1.

Использование указанных нечетких множеств с выпуклыми функциями принадлежности в алгоритме нечеткого вывода Мамдани [1] позволяет получить количественное значение КПКЭ. Алгоритм нечеткого вывода, используемый для вычисления значения КПКЭ, включает в себя следующую последовательность действий: фаззификация на основе измеренных значений параметров электроэнергии, агрегирование подусловий правила нечеткой продукции, активизация заключения в правиле нечеткой продукции, дефаззификация на основе нечеткого множества, полученного в заключении правила нечеткой продукции.

Согласно второму предлагаемому подходу комплексную оценку качест-

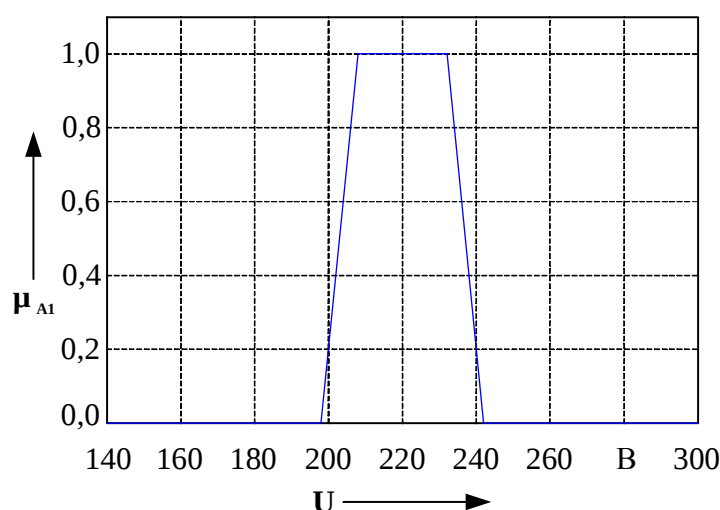


Рисунок 1 – Графики функций принадлежности трапециевидного нечеткого интервала, формализующего понятие «нормальное напряжение»

ва электроэнергии можно осуществить путем аппроксимации экспертных данных, которые могут быть получены различными путями – как непосредственно от экспертов, так и на основе альтернативных методов оценки качества электроэнергии. Одним из видов аппроксимации, применимых в данном случае, является стохастическая аппроксимация путем обучения нейросетевой модели [8]. Обученная на ограниченном количестве данных нейронная сеть способна обобщать полученную информацию и показывать хорошие результаты на данных, не использовавшихся в процессе обучения [2]. Кроме того, многослойная структура, позволяющая вести параллельную обработку информации, делает применение искусственных нейронных сетей перспективным подходом при решении задач сложной обработки информации, в том числе и при комплексной оценке качества электроэнергии, особенно с учетом возможностей современной вычислительной техники.

Для комплексной оценки качества электроэнергии на основе нейросетевой модели предлагается использовать нейроны с сигмоидальной функцией активации. Размер нейросетевой модели прямого распространения может быть оценен согласно теореме Колмогорова [7] и уточнен на основе численных экспериментов. В результате проведенных численных экспериментов установлено, что для комплексной оценки качества электроэнергии по напряжению, частоте и коэффициенту одиннадцатой гармонической составляющей достаточно использовать нейросетевую модель прямого распространения со структурой 3-7-1, что означает три входа, семь нейронов скрытого слоя и один нейрон выходного слоя. Каждый нейрон состоит из сумматора взвешенных входных сигналов (Σ) и элемента, реализующего сигмоидальную функцию активации (Φ), аргументом которой является значение, вычисленное сумматором. Граф рассматриваемой нейросетевой модели представлен на рисунке 2. Для обучения нейросетевой модели с такой структурой наиболее подходящим является алгоритм Левенберга-Марквардта [8].

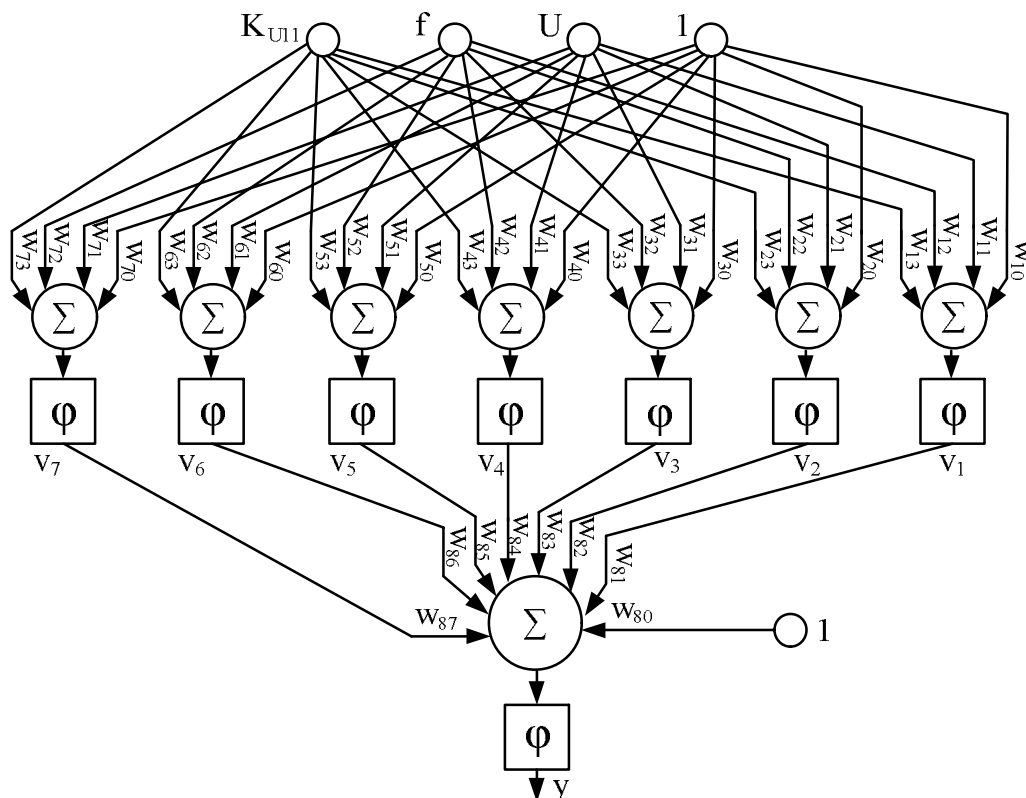


Рисунок 2 – Граф нейросетевой модели, оценивающей качество электроэнергии по напряжению, частоте и коэффициенту одиннадцатой гармонической составляющей

Задача оперативного выбора источника электроэнергии при использовании второго метода комплексной оценки ее качества может быть решена следующим образом. Несколько

идентичных нейронных сетей по числу имеющихся источников оценивают качество предоставляемой ими электроэнергии. Далее результаты оценки сравниваются, что дает возможность осуществить оперативный выбор источника, обеспечивающего в текущий момент более высокое качество электроэнергии. Структурная схема разработанного авторами устройства автоматического переключения источников электропитания [9], реализующего данный принцип, представлена на рисунке 3.

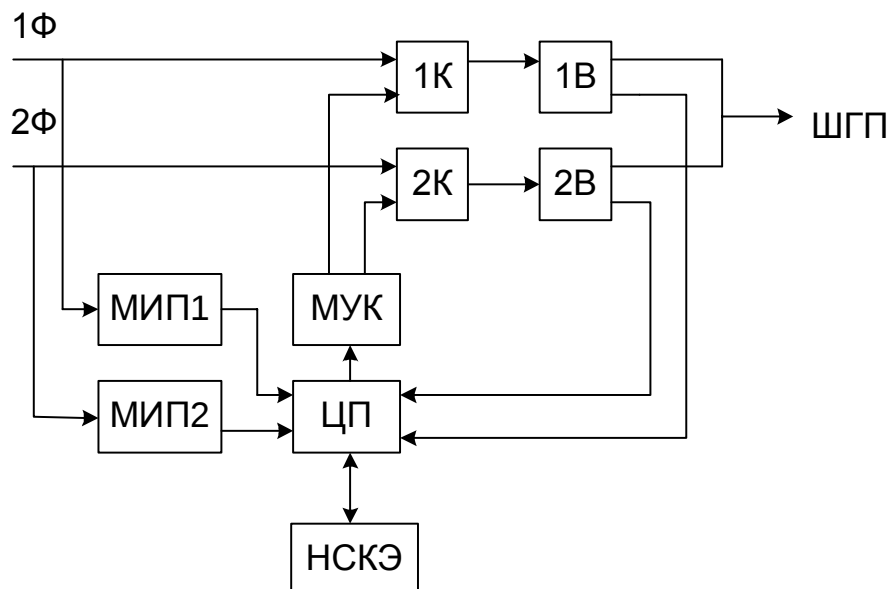


Рисунок 3 – Структурная схема устройства автоматического переключения источников электропитания

Устройство автоматического переключения источников электропитания функционирует следующим образом. Модули измерения параметров электроэнергии МИП1 и МИП2 подключаются к фидерам 1Ф и 2Ф от источников электропитания и выполняют масштабное преобразование сигналов, их оцифровку и обработку, предоставляя центральному процессору (ЦП) параметры электроэнергии и показатели ее качества для каждого источника электропитания. Центральный процессор передает эти параметры и показатели в нейросетевой контроллер электропитания (НСКЭ), реализующий нейросетевые модели, аналогичные приведенной на рисунке 2. НСКЭ передает в ЦП номер фидера, обеспечивающего в настоящий момент лучшее качество электроэнергии. В соответствии с рекомендацией от НСКЭ, а также после выполнения алгоритма исключения частых переключений ЦП через модуль управления контакторами (МУК) воздействует на контакторы 1К и 2К, подключая к шине гарантированного питания (ШГП) соответствующий фидер через выключатели 1В и 2В.

Список литературы

1. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский; Пер. с польского И. Д. Рудинского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.
2. Осовский, С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский; Пер. с польского И. Д. Рудинского. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
3. Применение теории графов для автоматизации процесса анализа схем канализации обратного тягового тока / С. А. Лунев, Р. Ш. Аюпов и др. // Вестник Ростовского гос. ун-та путей сообщения. Ростов-на-Дону, 2008. – № 4. – С. 77 – 84.
4. Пат. 78580 Российская Федерация, МПК G 01 R 17/02. Устройство непрерывного контроля технического состояния рельсовых цепей / С. А. Лунев, Р. Ш. Аюпов, С. С. Сероштанов,

М. М. Соколов, И. А. Колесников (Россия). – № 2008131276/22; Заявлено 29.07.2008; Опубл. 27.11.2008. Бюл. № 33.

5. Лаврентьев, М. А. Методы теории функций комплексного переменного / М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат. – М: Лань., 2002. – 688 с.

6. Пат. 88158 Российская Федерация, МПК G 01 R 17/02. Устройство контроля качества электрической энергии / С. А. Лунев, Р. Ш. Аюпов, Д. В. Борисенко, С. А. Сушков, М. М. Соколов, С. В. Гришечко, К. А. Петров (Россия). – № 2009127021/22; Заявлено 14.07.2009; Опубл. 27.10.2009. Бюл. № 30.

7. Аввакумов, В. Г. Техничко-экономическая оценка качества электроэнергии в промышленности / В. Г. Аввакумов, Г. Л. Багиев, Д. М. Воскобойников / Ленинградский гос. ун-т. – Л., 1977. – 132 с.

8. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс. 2-е изд.: Пер. с англ. / С. Хайкин. М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.

9. Пат. 78579 Российская Федерация, МПК G 01 R 17/02. Устройство автоматического переключения источников электропитания / С. А. Лунев, Д. В. Борисенко, М. М. Соколов (Россия). – № 2008131275; Заявлено 29.07.2008; Опубл. 27.11.2008. // Открытия. Изобретения. – 2008. – № 33.

УДК 656.25+621.396.9

А. А. Любченко

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ

В статье приведены возможные варианты структуры системы определения местоположения подвижной единицы (СОМП) на основе Глобальной навигационной спутниковой системы, полученные в результате анализа зарубежных проектов по исследованию возможности применения спутниковой навигации на железнодорожном транспорте, а также представлены требования, предъявляемые к СОМП со стороны железнодорожного сектора для различных областей применения.

Применение технологий Глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) является одним из наиболее активно развивающихся направлений во всем мире, что обусловлено преимуществами глобальной спутниковой навигации и постоянно улучшающимся качеством навигационного сервиса.

Стратегия развития железнодорожного транспорта России до 2030 г. определяет использование средств спутниковой навигации как одно из наиболее перспективных направлений разработки систем интервального регулирования с технологией «подвижного» блок-участка, в том числе и для малодеятельных участков железной дороги, часто имеющих стратегическое значение. Стремление использовать подобный принцип регулирования может объясняться более низкой стоимостью внедрения и обслуживания системы, что является актуальным в последние десятилетия для таких участков дорог, когда много линий с низкой интенсивностью движения было закрыто ввиду высоких затрат на их содержание. В данном случае речь идет о системах, связанных с обеспечением безопасности движения, где определение местоположения подвижной единицы осуществляется с помощью только бортовых устройств.

Реализация такого подхода на практике и его интеграция в систему централизованной автоблокировки может способствовать

– сокращению затрат как на развертывание системы, так и на ее обслуживание, что обусловлено возможностью сокращения или даже, возможно, полной замены традиционных систем оборудования железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ);