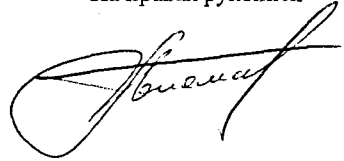


На правах рукописи



ПОНОМАРЕВ Антон Витальевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА АПРИОРНОЙ ОЦЕНКИ РАСХОДА  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ  
ПРОЦЕССЫ РЕМОНТА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

Специальность 05.22.07 – «Подвижной состав железных дорог,  
тяга поездов и электрификация»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

ОМСК 2009



Работа выполнена в Омском государственном университете путей сообщения (ОмГУПС).

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор  
ЧЕРЕМИСИН Василий Титович.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор  
ХАРЛАМОВ Виктор Васильевич;

кандидат технических наук, доцент  
ОСИПОВ Дмитрий Сергеевич.

Ведущая организация:

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Защита диссертации состоится 20 ноября 2009 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 218.007.01 при Омском государственном университете путей сообщения по адресу: 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35, ауд. 219.

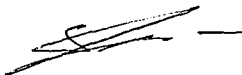
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Омского государственного университета путей сообщения.

Автореферат разослан 15 октября 2009 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения, просим направлять в адрес диссертационного совета Д 218.007.01.

Тел./факс: (3812) 31-13-44; e-mail: nauka@omgups.ru

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук,  
профессор



О. А. Сидоров.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Железнодорожный транспорт является одним из наиболее энергоемких потребителей, на осуществление деятельности которого ежегодно расходуется около пяти процентов вырабатываемой в стране электрической энергии. Согласно «Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 г.» одним из главных общетранспортных ориентиров является повышение производительности и рентабельности транспортных систем. Выявление случаев нерационального использования электрической энергии (ЭЭ) открывает широкие возможности по повышению эффективности использования топливно-энергетических ресурсов.

Одним из важнейших условий обеспечения эффективного использования электрической энергии является соблюдение удельных норм ее расхода на выпуск единицы продукции, которыми в настоящее время большинство структурных подразделений железнодорожного транспорта не располагают. Имеющиеся удельные нормы получены на основании фактических данных об электропотреблении и не позволяют достоверно учесть планируемые изменения в организации производства.

Действующая на сети железных дорог «Методика анализа и планирования расхода электрической энергии на нетяговые нужды в ОАО «РЖД» использует данные об электропотреблении за прошедший период и принята на переходный период, к концу которого должны быть разработаны методы получения обоснованных удельных норм ее расхода на выпуск единицы продукции на основе характеристик и режимов работы потребителей электрической энергии. Аналогичная ситуация сложилась и с нормированием расхода электрической энергии на технологические процессы (ТП) ремонта подвижного состава (РПС).

Важнейшей задачей текущего периода является создание метода, позволяющего априорно определять расход электрической энергии на ТП РПС; выполнять оценку эффективности внедрения новых технологий; выявлять участки ТП с повышенными потерями электрической энергии; определять эффективность управляющих воздействий по снижению энергоемкости основных ТП; проводить оценку эффективности мероприятий по получению графика нагрузки, приближенного к равномерному, как по структурным подразделениям, так и по конкретным ТП.

**Целью диссертационной работы** является разработка и внедрение метода априорной оценки расхода электрической энергии на технологические про-

цессы ремонта подвижного состава путем использования результатов имитационного моделирования для определения предельно допустимого потребления и получения удельных норм расхода электрической энергии на выпуск единицы продукции в рамках существующей организации производства.

Для достижения указанной цели в работе поставлены следующие задачи:

провести систематизацию существующих методов определения расхода электрической энергии на выполнение заданного объема ремонтных работ для разработки способов определения предельно допустимого потребления на технологические процессы ремонта подвижного состава и получения возможности оценки эффективности организационно-технических мероприятий (ОТМ) по экономии электроэнергии;

разработать метод априорной оценки расхода электрической энергии на технологические процессы ремонта подвижного состава с использованием результатов имитационного моделирования в рамках существующей организации производства;

предложить метод и разработать программный модуль выявления отклонений в процессе электропотребления квазидетерминированных технологических процессов в условиях применения микропроцессорных счетчиков электрической энергии;

разработать имитационные модели действующих технологических процессов вагонного и локомотивного ремонтных депо и подтвердить адекватность полученных моделей на основании данных об электропотреблении за рассматриваемый период;

выполнить апробацию разработанного метода априорной оценки расхода электрической энергии для исследуемых технологических процессов на планируемом периоде и определить экономический эффект от внедрения предлагаемого метода.

**Методы исследования.** В диссертационной работе применялись методы имитационного моделирования (ИМ), основанные на использовании аппарата временных стохастических сетей Петри, теории массового обслуживания и теории вероятностей. Для подтверждения адекватности полученной модели используется непараметрический критерий однородности типа  $\omega^2$  Лемана-Розенблатта.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

произведена адаптация существующих алгоритмов создания имитационных моделей к описанию технологических процессов ремонта подвижного состава;

разработан метод априорной оценки расхода электрической энергии на технологические процессы ремонта подвижного состава с использованием результатов имитационного моделирования в рамках существующей организации производства, позволяющий с высокой достоверностью планировать расход электрической энергии на технологические процессы и выполнять априорную оценку эффективности организационно-технических мероприятий по экономии электроэнергии;

предложен метод выявления отклонений в процессе электропотребления квазидетерминированных технологических процессов в условиях применения микропроцессорных счетчиков электрической энергии.

**Достоверность научных положений и выводов** диссертационной работы обоснована теоретически и подтверждена положительными результатами апробации метода априорной оценки расхода электрической энергии на технологические процессы ремонта подвижного состава в структурных подразделениях Западно-Сибирской железной дороги. Отклонение оценок расхода электрической энергии, выполненных на основании разработанного метода, от фактических значений не превысило пяти процентов. Адекватность разработанных моделей подтверждена при уровне значимости 0,05.

**Практическая ценность** работы заключается в следующем.

Адаптация алгоритма построения имитационных моделей к описанию ТП РПС повышает эффективность работы специалиста за счет формирования четкой структуры создаваемых моделей, необходимых исходных данных и указания оптимальной последовательности действий.

Разработанный метод априорной оценки расхода электрической энергии на ТП РПС предоставляет возможность получения оценки эффективности планируемых к внедрению ОТМ, определения участков ТП, требующих модернизации, выявления отклонений действующего ТП от установленного, определения потребности во всех видах топливно-энергетических ресурсов и необходимых затратах (временных, трудовых, ресурсах).

Разработанный программный модуль позволяет выявлять отклонения в процессе электропотребления от установленного ТП в отчетных данных за пре-

дыдущий период и оперативно реагировать на текущие отклонения в процессе электропотребления для квазидетерминированных ТП.

**Реализация результатов работы.** На основе предложенного алгоритма построены имитационные модели ТП заливки баббитом вкладышей моторно-осевых подшипников (МОП) и среднего ремонта электровозов ВЛ10 в локомотивном ремонтном депо, а также модель ТП ремонта тележки грузового вагона в вагонном ремонтном депо Западно-Сибирской железной дороги. На основании разработанного метода выполнена оценка расхода электрической энергии на рассматриваемые ТП. Осуществлена апробация метода априорной оценки расхода электрической энергии в рассматриваемых структурных подразделениях. На основании разработанного программного модуля выявлены отклонения в процессе электропотребления от установленного ТП в отделении баббитозаливки локомотивного ремонтного депо.

**Апробация работы.** Основные положения работы докладывались и обсуждались на тринадцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» в Московском энергетическом институте (Москва, 2007); на всероссийской научно-практической конференции «Транспорт-2007» в Ростовском государственном университете путей сообщения (Ростов-на-Дону, 2007); на научно-практической конференции «Энерго- и ресурсосбережение в структурных подразделениях Западно-Сибирской железной дороги» в Омском государственном университете путей сообщения (Омск, 2008); на научно-техническом семинаре «Повышение эффективности работы железнодорожного транспорта, объектов промышленной теплоэнергетики, телекоммуникационно-информационных систем, автоматики и телемеханики» в Омском государственном университете путей сообщения (Омск, 2009).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 12 печатных работ, в том числе девять статей (из них три – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ) и три тезиса докладов на научных конференциях, получено одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов, библиографического списка и четырех приложений. Работа изложена на 126 страницах основного текста, содержит 27 иллюстраций, 18 таблиц и библиографический список из 122 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, определены научная новизна и практическая ценность работы, основные направления исследования.

В первом разделе выполнен анализ существующих методов определения расхода электрической энергии нетяговыми потребителями для выявления возможных путей повышения эффективности использования электрической энергии.

Вопросам повышения эффективности использования электроэнергии в системе электроснабжения тяговых и нетяговых потребителей посвящены работы В. Д. Авилова, Б. А. Аржанникова, М. П. Бадера, В. Д. Бардушко, А. С. Бочева, А. Т. Буркова, А. Г. Галкина, Л. А. Германа, В. Л. Григорьева, Б. Е. Дынькина, Д. В. Ермоленко, А. В. Ефимова, Ю. И. Жаркова, А. Б. Косарева, А. В. Котельникова, А. В. Крюкова, Р. Р. Мамошина, А. Н. Митрофанова, Ю. П. Неугодиной, А. Н. Поплавского, В. Н. Пупынина, Е. П. Фигурнова, В. Т. Черемисина и других ученых.

Выполнен обзор существующих подходов к планированию расхода электрической энергии, среди которых рассмотрен перспективный подход, заключающийся в использовании аппарата искусственных нейронных сетей и нечеткой логики.

Для структурных подразделений железнодорожного транспорта выполнен анализ текущего состояния планирования расхода электрической энергии и определены возможные пути повышения эффективности ее использования. В результате сделан вывод о необходимости разработки метода, позволяющего производить

- априорную оценку расхода электрической энергии на ТП РПС;
- оценку эффективности внедрения новых технологий;
- выявление участков ТП РПС с повышенными потерями электрической энергии и оценку эффективности возможных решений по их снижению;
- оценку эффективности управляющих воздействий по снижению энергоемкости основных ТП;
- снижение неравномерности потребления электроэнергии за счет уменьшения пиковых нагрузок путем получения графика нагрузки, приближенного к равномерному, как по структурным подразделениям, так и по конкретным ТП.

В качестве основы разрабатываемого метода предложено использовать дискретно-событийное ИМ.

Во втором разделе представлен разработанный метод априорной оценки расхода электрической энергии на ТП РПС с использованием результатов имитационного моделирования в рамках существующей организации производства.

Существующий алгоритм построения имитационных моделей адаптирован к описанию ТП РПС путем определения структуры исходных данных и последовательности действий, которые необходимо предпринять для построения модели ТП, и за счет введения трехуровневой системы проверки адекватности полученной модели.

Общая схема полученного алгоритма приведена на рис. 1. В качестве основных критериев выбора необходимого уровня детализации описания ТП предложено использовать поставленную задачу моделирования различных составляющих (энергетической, технологической, материально-технической) ТП РПС и принятый уровень агрегатного описания исследуемого ТП. В зависимости от выбранного уровня детализации описания ТП определяются перечень технологических операций (ТО), наименование и количественные характеристики обслуживаемых единиц, образующие совокупность статических и динамических объектов.

На основании полученных данных и анализа внутренних структурных, логических и транспортных связей выполняется построение структурно-алгоритмической модели в виде ориентированного графа ( $G^p, G^T, F^G$ ), где  $G^p$  – множество статических объ-

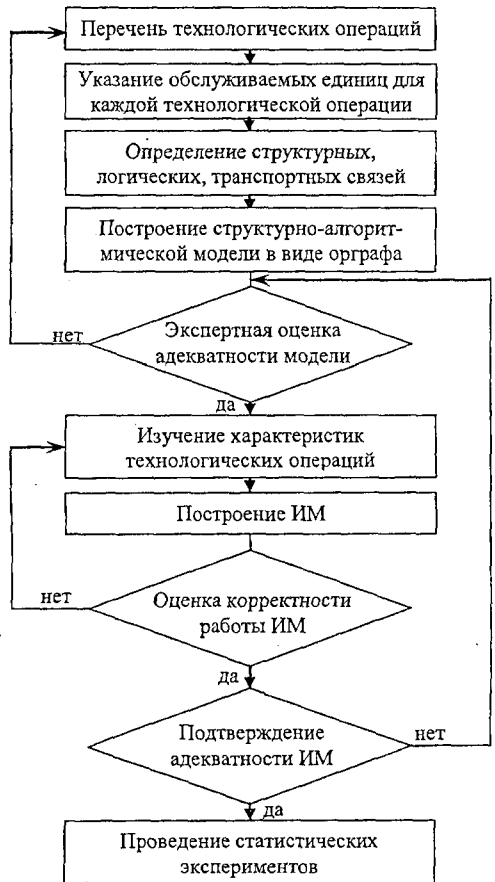


Рис. 1. Адаптированный алгоритм построения моделей ТП



ектов – обслуживающих устройств, отображающих выполнение ТО;  $G^T$  – множество переходов между статическими объектами;  $F^G$  – функция инцидентности.

Разработан и зарегистрирован в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам программный комплекс «Сетевое планирование при организации ремонта подвижного состава» (свидетельство № 2008610475), который может применяться для построения структурно-алгоритмической модели ТП РПС.

Для построенной структурно-алгоритмической модели определяются характеристики технологических операций, включающие в себя перечень используемого электрооборудования (ЭО), режимы его работы, вероятность и продолжительность выполнения технологических операций.

По полученным данным выполняется построение имитационной модели ТП РПС в терминах выбранного языка ИМ.

Наиболее актуальной проблемой при определении расхода электрической энергии на ТП РПС является определение продолжительности работы и значений нагрузок используемого ЭО. В настоящее время эти величины вычисляются по усредненным данным, лишенным достаточной привязки к реальной производственной ситуации.

В рамках предложенного алгоритма продолжительность работы ЭО определяется исходя из продолжительности выполнения соответствующих ТО.

Априорная оценка расхода электрической энергии на моделируемый ТП РПС определяется по формуле:

$$W = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m k_{i,j}^{\text{н.н.т}} \cdot k_{i,j}^{\text{н.м.т}} \cdot K_j^{\text{util}} \cdot P_i^{\text{ном}} \cdot T_s, \quad (1)$$

где  $k_{i,j}^{\text{н.н.т}}$  и  $k_{i,j}^{\text{н.м.т}}$  – коэффициенты использования нагрузки и мощности  $i$ -го ЭО  $j$ -ой ТО;  $K_j^{\text{util}}$  – коэффициент использования обслуживающего устройства, имитирующего выполнение  $j$ -й ТО;  $P_i^{\text{ном}}$  – номинальная мощность  $i$ -го ЭО;  $T_s$  – общее время моделирования  $s$ -го блока, содержащего описание выполнения  $j$ -й ТО.

Коэффициент использования обслуживающего устройства, имитирующего выполнение  $j$ -й технологической операции, является функцией:

$$K_j^{\text{util}} = f(t_{j,1}^{06}, \dots, t_{j,k}^{06}, \dots, t_{j,n_j}^{06}, n_j, t), \quad (2)$$

где  $t_{j,k}^{06}$  – время выполнения  $j$ -й ТО при  $k$ -й реализации,  $k = 1..n_j$ ;  $n_j$  – количество реализаций  $j$ -й ТО;  $t$  – модельное время.

Время выполнения ТО является случайной величиной, закон распределения которой указывается при создании имитационной модели ТП РПС.

Количество реализаций технологической операции зависит от внешних и внутренних параметров имитационной модели и модельного времени:

$$n_j = f_n(X, M, t), \quad (3)$$

где  $X$  – множество внешних параметров, влияние которых предусмотрено при создании имитационной модели;  $t$  – модельное время;  $M$  – структура имитационной модели, которая является множеством:

$$M = (G^P, G^T, F^G, G_{н.в.}^P, G_{об.}^t, G^W), \quad (4)$$

здесь  $G_{н.в.}^P$  – множество вероятностей выполнения ТО;  $G_{об.}^t$  – множество времен обслуживания;  $G^W$  – множество кратностей переходов.

Общее время моделирования  $s$ -го блока  $T_s$  также является функцией внешних и внутренних параметров имитационной модели и модельного времени:

$$T_s = f_T(X, M, t). \quad (5)$$

Аналитические решения могут быть получены для простых моделей, имеющих ограничения, накладываемые на количество статических объектов, характеристики входного потока, правила обслуживания транзактов. Для имитационных моделей ТП РПС, имеющих сложную структуру,  $K_j^{util}$  и  $T_s$  определяются на основании операционного анализа результатов статистических имитационных экспериментов с построенными моделями  $M$  при заданных внешних параметрах  $X$ .

Коэффициент использования нагрузки  $i$ -го ЭО  $j$ -й ТО характеризует отличие продолжительности выполнения ТО и нахождения ЭО во включенном состоянии и определяется по формуле:

$$k_{i,j}^{и.н.т} = \frac{t_{i,j}^{об}}{t_j^{оп}}, \quad (6)$$

где  $t_{i,j}^{об}$  – время работы  $i$ -го ЭО при выполнении  $j$ -й ТО;  $t_j^{оп}$  – продолжительность  $j$ -й ТО.

Коэффициент использования мощности  $i$ -го ЭО  $j$ -й ТО характеризует неполную нагрузку ЭО при выполнении рассматриваемой ТО и определяется по выражению:

$$k_{i,j}^{\text{н.м.т}} = \frac{\overline{P}_{i,j}^{\text{факт}}}{P_{i,j}^{\text{ном}}}, \quad (7)$$

где  $\overline{P}_{i,j}^{\text{факт}} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p_{i,j}(t) dt$  – среднее фактическое значение мощности  $i$ -го ЭО при совершении  $j$ -й ТО;  $t_1$  и  $t_2$  – начало и конец рабочего интервала соответственно;  $p_{i,j}(t)$  – мгновенное значение активной мощности  $i$ -го ЭО.

Экспериментально среднее фактическое значение мощности  $i$ -го ЭО при совершении  $j$ -й технологической операции определяется по формуле:

$$\overline{P}_{i,j}^{\text{факт}} = \frac{W_{i,j}^{\text{факт}}}{\Delta t_j}, \quad (8)$$

где  $W_{i,j}^{\text{факт}}$  – фактическое значение потребленной электроэнергии  $i$ -м ЭО при выполнении  $j$ -й ТО;  $\Delta t_j$  – продолжительность выполнения  $j$ -й ТО.

Выражения (7) и (8) применяются для определения коэффициента использования мощности технологической операции на основе статистической обработки данных о потребленной электроэнергии, полученных от счетчика электрической энергии. При отсутствии статистических данных об электропотреблении по каждой единице ЭО значение коэффициента использования мощности технологической операции допускается принять равным единице.

Для подтверждения адекватности имитационных моделей ТП РПС предложено использовать непараметрический критерий однородности типа  $\omega^2$  Лемана-Розенблатта, преимущество применения которого заключается в отсутствии необходимости установления закона распределения значений выборки откликов исследуемой системы.

В третьем разделе проведена апробация разработанных методов на ТП РПС в структурных подразделениях Западно-Сибирской железной дороги.

В диссертационной работе осуществлено ИМ трех ТП разной степени детализации для рассмотрения особенностей применения метода априорной оценки расхода электрической энергии для каждого из них. Исследуемыми ТП являются заливка баббитом вкладышей МОП и средний ремонт электровозов ВЛ10 в локомотивном ремонтном депо, а также ремонт тележки грузового вагона в вагонном ремонтном депо. На основании анализа рассматриваемых ТП построены их структурно-алгоритмические модели, определены требуемые характеристики технологических операций, выполнено ИМ.

Структурно-алгоритмическая модель ТП заливки баббитом вкладышей МОП изображена на рис. 2, а соответствующий ей пооперационный перечень работ с указанными временными характеристиками и относительными частотами выполнения работ  $v_k$  представлен в табл.1.

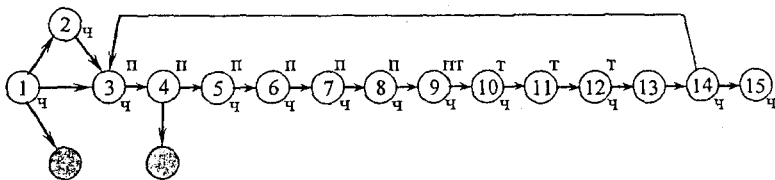


Рис. 2. Структурно-алгоритмическая модель ТП заливки баббитом вкладышей МОП: ⊗ – позиция выбраковки изделий; П – позиция работы печи; Т – позиция работы тигля; Ч – ТО, для выполнения которой необходимо участие человека.

Таблица 1  
Перечень работ по заливке вкладышей МОП

Наименование операции	Временные характеристики, мин		$v_k$
	$t_{cp} \pm \Delta t_{cp}$		
<i>Равномерное распределение</i>			
Замер диаметров вкладышей МОП	0,46 ± 0,04		1
Нанесение клейма на вкладыши МОП	0,33 ± 0,17		0,22
<i>Нормальное распределение</i>			
Загрузка вкладышей МОП в печь	0,67	0,08	1
Нагрев вкладышей МОП в печи	30,14	4,93	1
Извлечение одного вкладыша из печи	0,34	0,07	1
Обработка первого вкладыша МОП	1,3	0,09	1
Загрузка обработанного вкладыша МОП в печь и извлечение из печи второго вкладыша	0,26	0,02	1
Обработка второго вкладыша МОП	1,3	0,09	1
Загрузка двух вкладышей МОП в центробежный стенд	1,84	0,12	1
Заливка вкладышей МОП баббитом	0,82	0,06	1
Вращение вкладышей МОП на центробежном стенде	5,93	0,19	1
Извлечение вкладышей МОП из центробежного стенда	1,68	0,1	1
Охлаждение вкладышей МОП	29,1	1,41	1
Разделение вкладышей МОП и обстучивание их молотком	1,29	0,26	1
Механическая обработка вкладышей МОП	2,44	0,27	1

Для подтверждения адекватности построенной модели выборка ее откликов сравнивается с выборкой откликов исследуемой системы, полученной на

основании данных об электропотреблении за прошедший период. Выборки откликов модели получены на основании 100 запусков имитационных моделей с параметрами, повторяющими условия функционирования реальных систем. Выборки откликов систем получены на основании данных об электропотреблении соответствующих производственных участков.

В качестве критерия однородности используется состоятельный непараметрический критерий типа  $\omega^2$  Лемана-Розенблатта, расчетное значение которого определяется по выражению:

$$A = \frac{1}{mn(m+n)} \left[ m \sum_{i=1}^m (r_i - i)^2 + n \sum_{j=1}^n (s_j - j)^2 \right] - \frac{4mn-1}{6(m+n)}, \quad (9)$$

где  $m$  и  $n$  – объем выборок откликов исследуемой системы и имитационной модели соответственно;  $r_i$  и  $s_j$  – ранг  $i$ -го и  $j$ -го элементов выборок откликов модели и системы в общем вариационном ряду.

Вычисленные по формуле (9) расчетные значения критерия согласия  $\omega^2$  Лемана-Розенблатта для соответствующих участков ТП представлены в табл. 2.

Таблица 2  
Расчетные значения критерия согласия  $\omega^2$  Лемана-Розенблатта

Моделируемый производственный участок	$\omega^2_{расч}$
<i>ТП заливки баббитом вкладышей МОП</i>	
Отделение баббитозаливки	0,154
<i>ТП ремонта тележки грузового вагона</i>	
Нагрев вкладышей МОП в печи	0,101
<i>ТП среднего ремонта электровозов ВЛ10</i>	
Испытательная станция	0,379
Отделение по ремонту токоприемников	0,152
Отделение по ремонту кожухов зубчатой передачи	0,191
Цех среднего ремонта	0,186
Аккумуляторное отделение	0,121
Сварочное отделение	0,094
Отделение по ремонту гидравлических гасителей колебаний	0,381
Отделение по ремонту стержней	0,263
Автоматный цех	0,199

Для всех построенных имитационных моделей ТП вычисленные расчетные значения критериев оказались ниже критического значения, которое со-

ставляет 0,461 при заданном уровне значимости 0,05, что говорит об адекватности созданных моделей.

Для снижения влияния случайной составляющей процесса электропотребления и исключения ее из рассмотрения данных, описывающих случаи нерационального использования электрической энергии, в диссертационной работе предложен метод выявления отклонений в процессе электропотребления квазидетерминированных ТП при использовании микропроцессорных счетчиков электрической энергии. На основе предложенного метода разработан программный модуль, алгоритм работы которого представлен на рис. 3. Под квазидетерминированным понимается ТП, имеющий условно-постоянный режим работы, достаточно жестко привязанный ко времени. При соблюдении ТП суточный график поинтервально усредненных мощностей имеет одинаковую структуру. Возможные временные сдвиги и отклонения отдельных значений графика по мощности обусловлены различными моментами включения используемого ЭО, прилагаемыми нагрузками, колебаниями напряжения в питающей сети и другими факторами.

Выявление отклонений в процессе потребления электрической энергии позволяет частично исключить из рассмотрения случаи нерационального ее использования при анализе данных за прошедший период. Исключение отклонений осуществляется путем двухуровневого выявления статистических промахов: по среднесуточным и поинтервально усредненным значениям.

Наличие программного модуля позволяет оперативно реагировать на возникающие отклонения от установленного ТП за счет автоматизированного сравнения текущих данных об электропотреблении с «обучающей» выборкой, полученной на основании предложенного метода.

В четвертом разделе выполнено сравнение результатов расчета расхода электроэнергии на рассматриваемые ТП, полученных на основании действующей по сети железных дорог «Методики анализа и планирования расхода электрической энергии на нетяговые нужды в ОАО «РЖД» и предлагаемого метода,

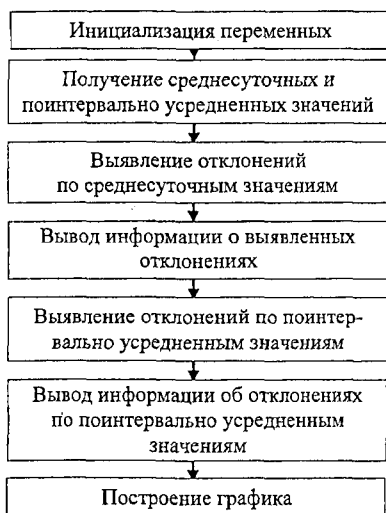


Рис. 3. Графическая схема алгоритма обработки данных об электропотреблении

основанного на использовании результатов имитационных экспериментов. Результаты сравнения отображены на рис. 4, где на позиции *a* представлены фактические и расчетные значения расхода электрической энергии на рассматриваемые ТП, на позиции *б* – относительные отклонения оценок расхода электрической энергии, выполненных на основании действующего и предлагаемого методов.

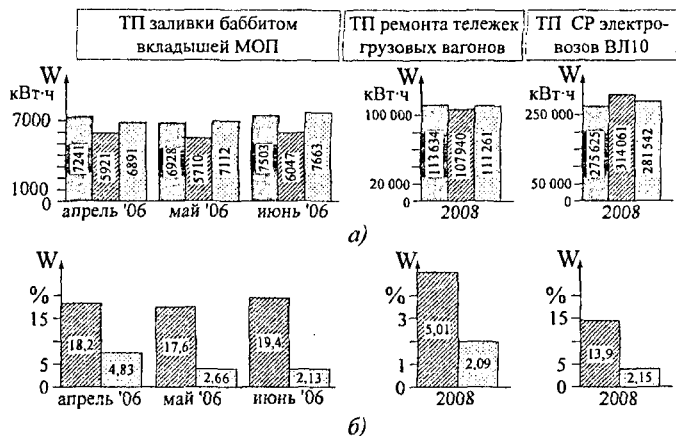


Рис. 4. Сравнение результатов оценки расхода электрической энергии на ТП с помощью действующего и предлагаемого методов: – фактическое значение; – действующая методика; – предложенный метод.

Экономический эффект от применения предложенного метода достигается за счет снижения погрешности определения планируемых затрат компании на приобретение электроэнергии и снижения упущенной выгоды ОАО «РЖД» из-за недополученного эффекта в результате возможного использования освобожденных средств в других сферах деятельности компании.

В результате проведенных расчетов интегральный экономический эффект (ЧДД) от внедрения метода априорной оценки расхода электрической энергии на ТП среднего ремонта электровазов ВЛ10 в локомотивном ремонтном депо Западно-Сибирской железной дороги за расчетный период, равный 10 годам, составляет 162,2 тыс. р., индекс доходности при этом – 3,6. Расчетный срок окупаемости не превышает двух лет.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Выполнена систематизация существующих методов определения расхода электрической энергии на выполнение заданного объема ремонтных работ

и проведен анализ перспективных подходов к решению этого вопроса, в результате которого предложено использовать методы имитационного дискретно-событийного моделирования для получения оценки ее предельно допустимого потребления на технологические процессы ремонта подвижного состава и получения возможности оценки эффективности ОТМ по экономии электроэнергии.

2. Произведена адаптация существующих алгоритмов создания имитационных моделей к описанию технологических процессов ремонта подвижного состава за счет определения структуры исходных данных и последовательности действий, которые необходимо предпринять для построения модели ТП, и за счет введения трехуровневой системы проверки адекватности полученной модели.

3. Разработан метод априорной оценки расхода электрической энергии на технологические процессы ремонта подвижного состава с использованием результатов имитационного моделирования, позволяющий определять предельно допустимое потребление и получать удельные нормы расхода электрической энергии на выпуск единицы продукции в рамках существующей организации производства.

4. Предложен метод и разработан программный модуль выявления отклонений в процессе электропотребления квазидетерминированных ТП в условиях применения микропроцессорных счетчиков электрической энергии, апробированный на действующем ТП локомотивного ремонтного депо.

5. Построены структурно-алгоритмические модели и рассчитаны требуемые характеристики технологических операций для ТП заливки баббитом вкладышей МОП и среднего ремонта электровозов в локомотивном ремонтном депо, а также ТП ремонта тележки грузового вагона в вагонном ремонтном депо Западно-Сибирской железной дороги, позволяющие выполнять ИМ процесса электропотребления действующих ТП.

6. Подтверждена адекватность созданных имитационных моделей на основании непараметрического критерия однородности  $\omega^2$  Лемана-Розенблатта, расчетные значения которого не превысили критического значения 0,461 при уровне значимости 0,05.

7. Рассчитан экономический эффект от внедрения предложенного метода априорной оценки расхода электрической энергии на ТП среднего ремонта электровозов ВЛ10 в локомотивном ремонтном депо Западно-Сибирской железной дороги, который составляет 162,2 тыс. р. за расчетный период, равный 10 годам.



## Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Пашков Д. В. Программный модуль анализа данных об электропотреблении / Д. В. Пашков, А. В. Пономарев // Матер. междунар. науч.-техн. конф. / Московский энергетический ин-т. М., 2007. С. 451 – 452.
2. Пашков Д. В. Некоторые особенности анализа графиков электропотребления / Д. В. Пашков, А. В. Пономарев // Межвуз. сб. тр. молодых ученых, аспирантов и студентов / Сибирская гос. автомобильно-дорожная академия. Омск, 2007. С. 221 – 226.
3. Пашков Д. В. Влияние параметров измерительной системы на распознавание режимов работы контролируемого комплекса электропотребителей / Д. В. Пашков, А. В. Пономарев // Тр. всерос. науч.-практ. конф. / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. Ростов-на-Дону, 2007. С. 266 – 268.
4. Пашков Д. В. Выявление отклонений параметров электропотребления в рамках исследуемого технологического процесса от оптимальных значений / Д. В. Пашков, А. В. Пономарев // Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2008. С. 55 – 58.
5. Оценка практической эффективности внедренных ресурсосберегающих технологий на предприятиях Западно-Сибирской железной дороги / М. М. Никифоров, А. В. Пономарев и др. // Матер. науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2008. С. 119 – 126.
6. Комяков А. А. Возможности имитационного моделирования для исследования технологических процессов / А. А. Комяков, Д. В. Пашков, А. В. Пономарев // Матер. II Съезда инженеров Сибири / Омский гос. технический ун-т. Омск, 2008. Ч. 1. С. 97 – 100.
7. Технологическая подготовка производства делового ремонта локомотивов / С. Г. Шантаренко, А. В. Пономарев и др. // Матер. II Съезда инженеров Сибири / Омский гос. технический ун-т. Омск, 2008. Ч. 1. С. 131 – 134.
8. Пашков Д. В. Планирование расхода электрической энергии на технологические нужды структурных подразделений ОАО «РЖД» с использованием имитационного моделирования / Д. В. Пашков, А. В. Пономарев // Транспорт Урала. Екатеринбург. 2008. № 3. С. 87 – 91.
9. Пашков Д. В. Повышение эффективности планирования и нормирования расхода электрической энергии на технологические нужды с применением имитационного моделирования / Д. В. Пашков, А. В. Пономарев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск. 2008. № 2. С. 261 – 263.

10. Сетевое планирование ремонта подвижного состава / С. Г. Шантаренко, А. В. Пономарев и др. // Железнодорожный транспорт. 2009. № 2. С. 48, 49.

11. Пашков Д. В. Принципы планирования расхода электрической энергии в ремонтном производстве железнодорожного транспорта с использованием имитационного моделирования / Д. В. Пашков, А. В. Пономарев // Матер. науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2009. С. 108 – 111.

12. Пономарев А. В. Имитационное моделирование технологических процессов ремонта подвижного состава на примере ремонта тележки грузового вагона / А. В. Пономарев // Матер. науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2009. С. 146 – 152.