

дрой «Электрические машины и общая электротехника».

SPIN-код: 5093-8463

AuthorID (РИНЦ): 465264

**МОСКАЛЕВ Юрий Владимирович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника».

SPIN-код: 1422-1951

AuthorID (РИНЦ): 657144

**ЛЫСЕНКО Виктор Сергеевич**, аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника».

SPIN-код: 7433-7885

AuthorID (РИНЦ): 978018

Адрес для переписки: emoe@omgups.ru

#### Для цитирования

Харламов В. В., Москалев Ю. В., Лысенко В. С. Повышение эффективности использования трехфазных асинхронных электродвигателей при питании от однофазной сети // Омский научный вестник. 2018. № 3 (159). С. 27–31. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-159-27-31.

Статья поступила в редакцию 05.03.2018 г.

© В. В. Харламов, Ю. В. Москалев, В. С. Лысенко

УДК 621.311.001.57:519.25

DOI: 10.25206/1813-8225-2018-159-31-36

**А. А. КОМЯКОВ**  
**А. В. ПОНОМАРЕВ**  
**В. В. ЭРБЕС**

Омский государственный  
университет путей сообщения,  
г. Омск

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ УСТРОЙСТВ И ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ПРОЦЕССЕ ПРЕДПРИЯТИЯ

Статья посвящена разработке программного модуля, позволяющего выполнять непрерывный мониторинг энергоэффективности производственного процесса, а также определять фактическую эффективность применения внедряемых электроустановок, современных энергосберегающих устройств и технологий на основе нечетких нейросетевых моделей производственного процесса. Программный модуль реализует статистическую обработку данных об электропотреблении и объемах выполненной работы, и удобные механизмы по работе с нейросетевыми моделями технологического процесса.

**Ключевые слова:** энергоэффективность производственного процесса, энергосбережение, нечеткие нейронные сети, корреляционный анализ.

В современных условиях производства продукции и услуг между российскими предприятиями растет уровень конкуренции. Для обеспечения конкурентоспособности предприятиям приходится снижать издержки производства. К одной из основных категорий издержек на производстве относится потребление электроэнергии. Для снижения потребления данного вида ресурса предприятия внедряют современные устройства с повышенной энергетической эффективностью и технологии, направленные на снижение потребления электроэнергии. Однако эффективность внедрения данных устройств и технологий на предприятиях в условиях эксплуатации не оценивается, а принимается из данных, заявленных производителем. В боль-

шинстве случаев заявленная эффективность внедрения энергосберегающих устройств и технологий может отличаться от реальности, так как на работу электрооборудования влияет большое количество факторов, как производственных, так и климатических. Также нельзя забывать о человеческом факторе, когда режим работы электроустановок и объем электропотребления на единицу выполненной работы зависит от специалиста, использующего оборудование [1].

Для решения данного типа задач на предприятии требуется специалист со знаниями в области обработки статистических данных, современных методов моделирования процесса электропотребления и производства, что в большинстве случаев

невозможно реализовать из-за отсутствия времени на обучение и т.д. Поэтому авторами разработан программный модуль, позволяющий обрабатывать большие объемы данных по расходу электрической энергии и объему выполненной работы с целью определения энергетической эффективности использования электроустановок, внедрения современных энергосберегающих устройств и технологий и непрерывного мониторинга энергоэффективности производственного процесса.

Программа разработана в качестве модуля автоматизированной системы мониторинга энергетической эффективности производственных процессов. В настоящем программном модуле реализованы три основные функции:

- определение рекомендуемого объема загрузки выборок;
- загрузка и корреляционный анализ выборок;
- оценка энергетической эффективности производственного процесса.

При нажатии на кнопку «Определить рекомендуемый объем выборки» программа запрашивает *Excel*-файл с данными об электропотреблении. Рекомендуемый объем выборки рассчитывается для решения задачи по определению объема данных для разработки математической модели процесса электропотребления, выполняющей моделирование с достаточной точностью. Так как при малом объеме выборки точности математической модели может быть недостаточно, а при большом объеме исследование становится слишком продолжительным по времени и в некоторых случаях дорогостоящим. Данная математическая модель разрабатывается с целью прогнозирования расхода электроэнергии предприятия и моделирования процесса электропотребления. При этом загружается  $n$  значений расхода электроэнергии  $w_i$ . В зависимости от значения допустимой погрешности полученных данных  $\delta_1$ , указываемой в процентах, математического

ожидания  $\bar{w} = \sum_{i=1}^n w_i / n$  и среднеквадратического отклонения  $S = \sqrt{\sum_{i=1}^n (w_i - \bar{w})^2 / n - 1}$  программой

автоматически вычисляется рекомендуемый объем выборки по формуле [2]:

$$N_{\text{рек}} = \left( \frac{1,96S}{k_1} \right)^2, \quad (1)$$

где  $k_1 = \bar{w} \frac{\delta_1}{100}$ .

Графическое отображение загруженных данных [3, 4] выполняется в виде множества точек на плоскости (рис. 1).

Таким образом, на основании выполненного расчета получаем рекомендуемый объем выборки значений расхода электроэнергии, позволяющий достоверно оценить изменения потребления электроэнергии и разработать математическую модель потребления электроэнергии с достаточной точностью.

При нажатии на кнопку «Загрузить выборку для моделирования» открывается *Excel*-файл с тремя выборками рекомендуемого объема — обучающей, тестирующей и проверочной [5, 6]. Объем обучающей выборки должен соответствовать рекомендуемому объему выборки, а тестирующая и проверочная выборки составлять не менее 10 % от обучающей. Каждая из выборок находится на отдельном листе файла и содержит данные о расходе электрической энергии, значениях контролируемых факторов и продолжительности работы основных групп электрооборудования.

Непосредственно после открытия файла выполняется корреляционный анализ загруженных данных. Программа автоматически определяет количество рассматриваемых факторов, размеры обучающей, тестирующей и проверочной выборок. Рассчитываются коэффициенты корреляции между факторами и расходом электрической энергии (общие и частные), а также между парами факторов. Рассмотрим один из способов расчета частного коэффициента корреляции. Для начала рассмотрим пример, когда требуется найти коэффициент корреляции между зависимой переменной  $w$  (расходом электроэнергии) и влияющим фактором  $x_1$  без учета влияния фактора  $x_2$  [7]:

$$r_{wx_1 \cdot x_2} = \frac{r_{wx_1} - r_{wx_2} \cdot r_{x_1x_2}}{\sqrt{1 - r_{wx_2}^2} \sqrt{1 - r_{x_1x_2}^2}}, \quad (2)$$

где  $r_{wx_1 \cdot x_2}$  — частный коэффициент корреляции величин  $w$  и  $x_1$  без учета влияния фактора  $x_2$ ;  $r_{wx_1}$ ,  $r_{wx_2}$ ,  $r_{x_1x_2}$  — парные коэффициенты корреляции между переменными  $w$ ,  $x_1$  и  $x_2$ , рассчитываемые по формуле:

$$r_{wx} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(w_i - \bar{w})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (w_i - \bar{w})^2}}, \quad (3)$$

где  $x_i (i=1, 2, \dots, k)$  — значения влияющего фактора;  $\bar{x}$  — среднее значение влияющего фактора.

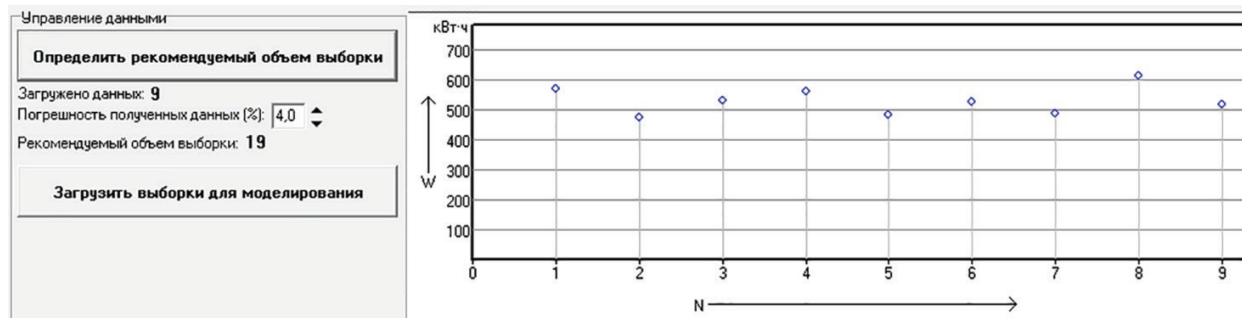


Рис. 1. Определение рекомендуемого объема выборки

Шкала Чеддока

Коэффициент корреляции	Качественная характеристика силы связи
0,1–0,3	Слабая
0,3–0,5	Умеренная
0,5–0,7	Заметная
0,7–0,9	Высокая
0,9–0,99	Весьма высокая

Если требуется устранить влияние на расход электроэнергии двух факторов  $x_2$  и  $x_3$ , то по формуле (5) вычисляем предварительно коэффициенты  $r_{wx_1 \cdot x_2}$ ,  $r_{wx_3 \cdot x_2}$  и  $r_{wx_3 \cdot x_2}$ , а затем коэффициент:

$$r_{wx_1 \cdot x_2 \cdot x_3} = \frac{r_{wx_1 \cdot x_2} - r_{wx_3 \cdot x_2} \cdot r_{x_1 x_3 \cdot x_2}}{\sqrt{1 - r_{wx_3 \cdot x_2}^2} \sqrt{1 - r_{x_1 x_3 \cdot x_2}^2}}, \quad (4)$$

который отражает зависимость между  $w$  и  $x_1$  без учета влияния фактора  $x_2$  и  $x_3$ . Аналогичный расчет производится в случае любого числа влияющих факторов.

В результате появляется возможность исключить из рассмотрения факторы, не влияющие на расход электрической энергии, и зависимые факторы, значения которых имеют сильную корреляционную связь с другими факторами. В первом случае фактор исключается из дальнейшего рассмотрения. Во втором случае исключается тот фактор, у которого корреляционная связь с расходом электроэнергии слабее.

Граничное значение коэффициента корреляции, при превышении которого два фактора будут считаться зависимыми, устанавливается пользователем. При этом качественно охарактеризовать силу связи можно по шкале Чеддока (табл. 1).

Данный анализ позволяет определить зависимости потребления электроэнергии предприятия и факторов производственных (объем работы машин для транспортировки, двигателей и станков) и климатических (продолжительность светового дня, температура и освещенность), а также исключить слабые зависимости. В результате получаем связи с требуемой зависимостью для разработки математической модели с лучшей точностью.

Например, на рис. 2 показан результат обработки загруженных выборок. Два параметра исключены из рассмотрения: «Тпар1», имеющий заметную связь с параметром «Пар1», и «Тпар2», практически не влияющий на расход электрической энергии.

После обработки загруженных данных программа позволяет сформировать отчет о результатах корреляционного анализа с указанием исключенных факторов и причин, по которым они исключены, а также подготовить данные для моделирования. При этом автоматически генерируются файлы с обучающей, тестирующей и проверочной выборками, пригодные для загрузки и последующего нейросетевого моделирования в среде *MatLab* с четкой логикой. Для разработки математической модели прогнозирования расхода электроэнергии предприятия и моделирования процесса электропотребления лучшей точности моделирования разработан алгоритм [8–10], представленный на рис. 3.

Оценить энергетическую эффективность можно, получив данные о фактическом электропотреблении моделируемого участка, продолжительности работы электрооборудования и значениях контролируемых факторов. Проанализировав работу электропотребителей при тех же значениях внешних факторов в *MatLab*, получаем две выборки со значениями расхода электрической энергии: фактического и смоделированного. Выборка фактического расхода электроэнергии формируется на основании показаний счетчиков электроэнергии предприятия, а выборка смоделированного расхода электроэнергии на основании моделирования при подстановке значений влияющих факторов. Программный модуль позволяет сравнить эти выборки на основании критерия *RMSE*, задаваемого в процентах. Для это-

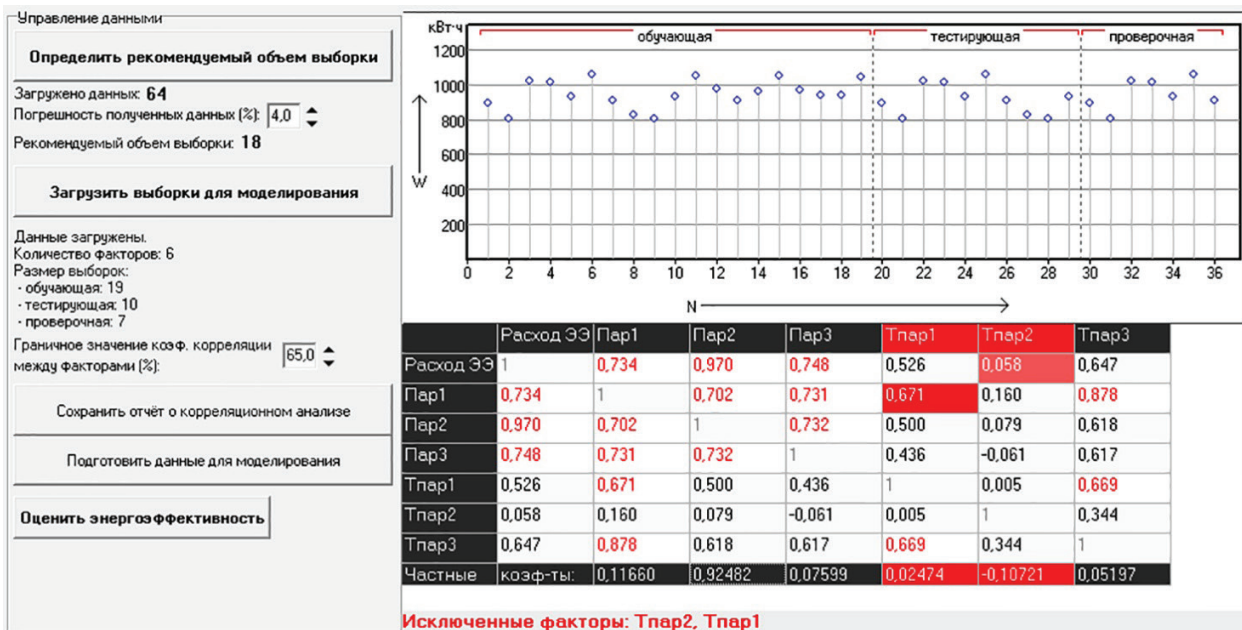


Рис. 2. Результат обработки выборок

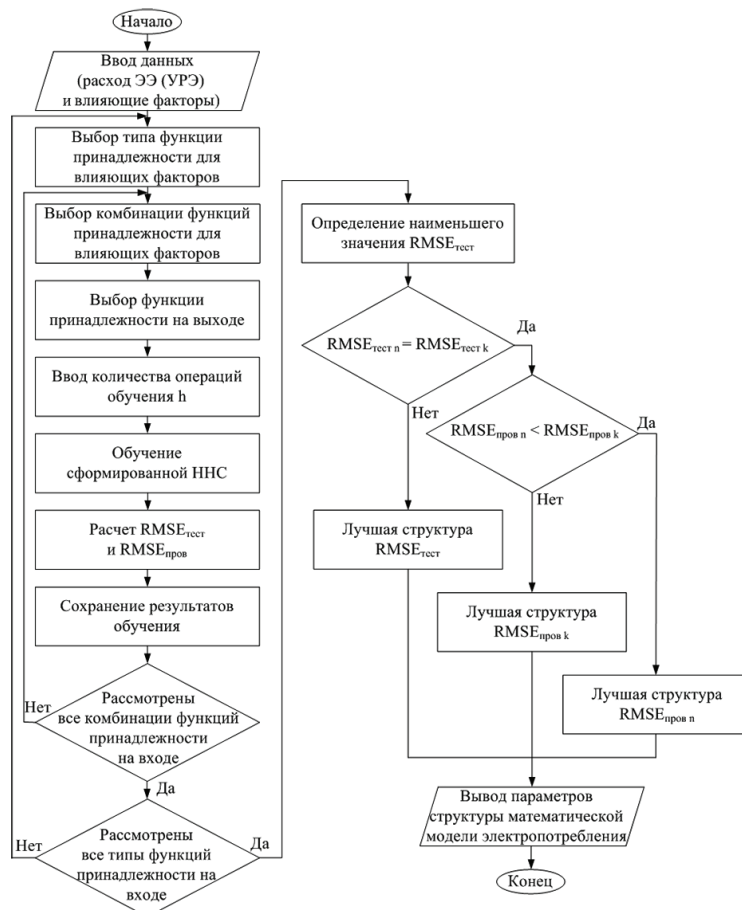


Рис. 3. Алгоритм выбора параметров структуры, обучения и оценки нечеткой нейронной сети

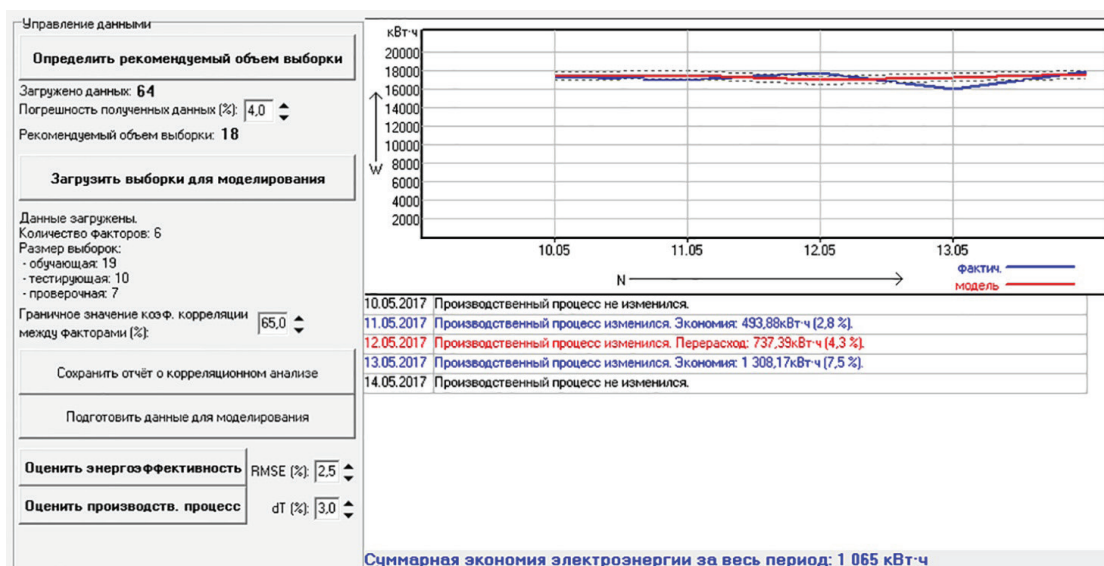


Рис. 4. Оценка энергоэффективности производственного процесса

го надо нажать кнопку «Оценить энергоэффективность».

Отображение фактического и промоделированного посуточного расхода электроэнергии выполняется автоматически в виде графика, а результаты сравнения — таблично (рис. 4). При этом за каждые сутки рассчитывается значение

$$k_2 = \frac{W_m - W_\phi}{W_\phi} \cdot 100\%, \quad (5)$$

которое сравнивается с установленным значением  $RMSE$ .

В случае если значение  $k_2$  по модулю оказывается меньше  $RMSE$ , то принимается, что в эти сутки производственный процесс не изменился. Если же значение  $k_2$  по модулю превышает  $RMSE$ , то производственный процесс изменился. Причем при положительном значении  $k_2$  — изменения производственного процесса привели к экономии электроэнергии (повышение энергоэффективности).

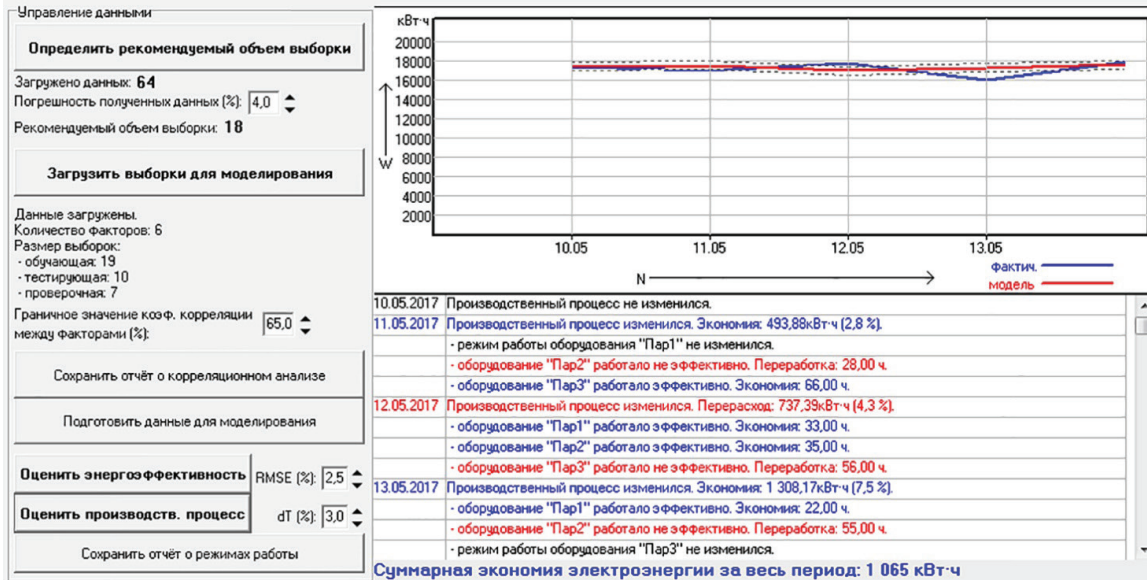


Рис. 5. Оценка эффективности работы электрооборудования

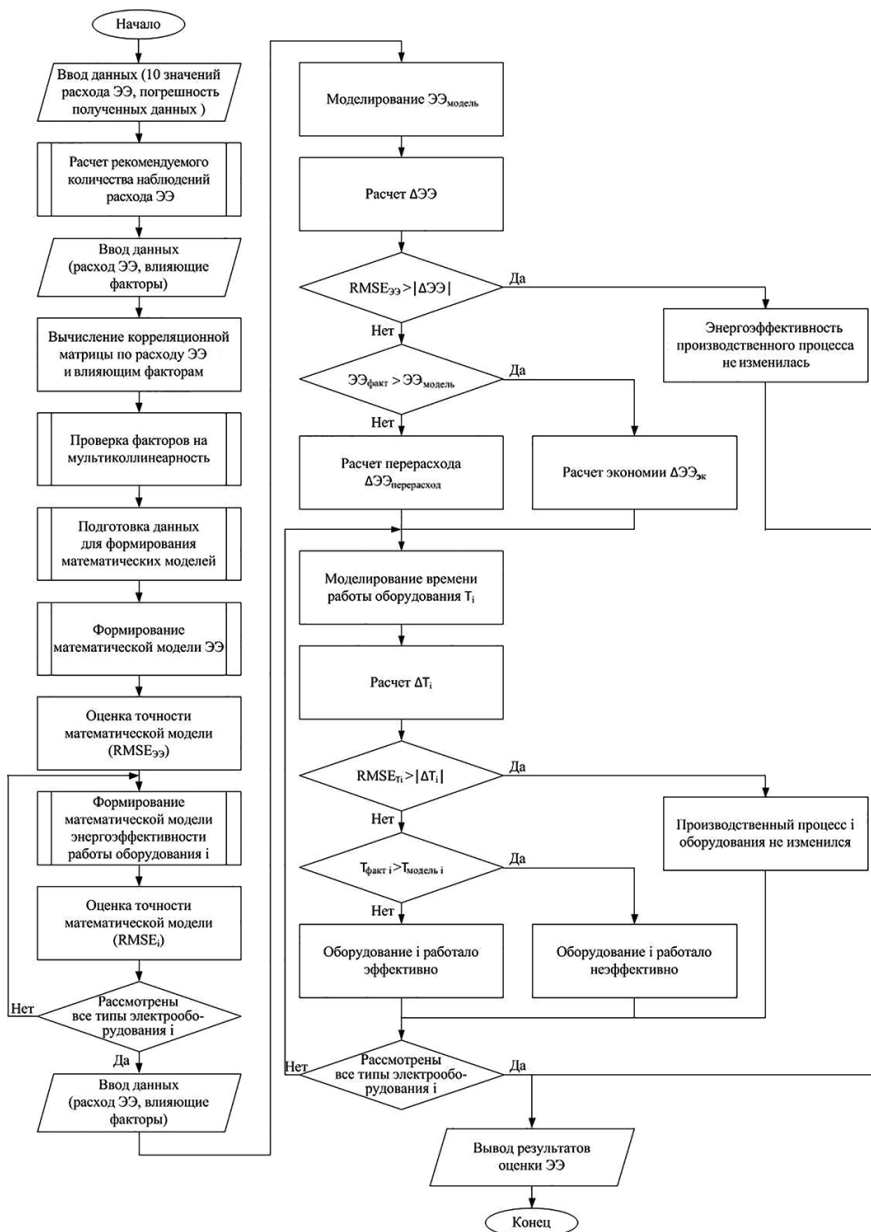


Рис. 6. Алгоритм программы для контроля электропотребления

При отрицательном значении коэффициента  $k_2$  речь идет о перерасходе электроэнергии (снижение энергоэффективности производственного процесса).

Более детально проанализировать изменения в производственном процессе можно, нажав кнопку «Оценить производственный процесс». При этом программа генерирует файлы с посуточными данными о фактическом времени работы оборудования и значениях влияющих факторов. Фактическое время работы оборудования определяется по счетчикам наработки времени, установленным на электроустановки. На основе этих данных и заранее созданных нейросетевых моделей в *MatLab* осуществляется имитация работы электрооборудования (моделируется продолжительность нахождения оборудования в рабочем состоянии при заданных значениях влияющих факторов). В итоге для каждой единицы электрооборудования сравнивается фактическое и смоделированное время работы (рис. 5).

Оценка режима работы оборудования выполняется на основании разности между смоделированным и фактическим временем работы каждой единицы электрооборудования:

$$\Delta t = t_m - t_f. \quad (6)$$

Отрицательное значение  $\Delta t$  означает, что оборудование работало неэффективно. Если же оборудование работало эффективно, то фактическое время работы окажется меньше смоделированного и  $\Delta t$  будет положительно. Однако не любое отклонение времени работы оборудования от модельного значения следует объяснять изменением режима его работы. В случае если разница  $\delta_t = \frac{\Delta t}{t_f} \cdot 100\%$  не превышает установленного значения, принимается, что режим работы рассматриваемого оборудования не изменился. Описанные ранее расчеты по определению энергетической эффективности производственного процесса можно представить в виде алгоритма (рис. 6).

Применение данного программного модуля открывает огромные возможности для анализа эффективности вырабатываемых решений по оптимизации производственного процесса.

#### Библиографический список

1. Черемисин В. Т., Никифоров М. М. Система контроля и оперативного управления потреблением топливно-энергетических ресурсов // Железнодорожный транспорт. 2010. № 11. С. 64–66.
2. Комяков А. А., Эрбес В. В., Гателюк О. А. Апробация алгоритма оценки эффективности энергосберегающих устройств и технологий в системе тягового электроснабжения // Известия Транссиба. 2014. № 4 (20). С. 79–85.
3. Тейксейра С., Пачеко К. Delphi 5. Руководство разработчика. В 2 т. Т. 1. Основные методы и технологии про-

граммирования. М.: Вильямс, 2000. 832 с. ISBN 5-8459-0066-2, 0-672-31781-8.

4. Тейксейра С., Пачеко К. Delphi 5. Руководство разработчика. В 2 т. Т. 2. Разработка компонентов и работа с базами данных. М.: Вильямс, 2000. 992 с. ISBN 5-8459-0067-0, 0-672-31781-8.

5. Комякова О. А. Возможности искусственных нейронных сетей как аппарата для прогнозирования расхода электрической энергии на предприятиях железнодорожного транспорта // Омский научный вестник. 2013. № 2 (120). С. 264–266.

6. Горбань А. Н., Дунин-Барковский В. Л., Кирдин А. Н. [и др.]. Нейроинформатика: моногр. Новосибирск: Наука, 1998. 296 с.

7. Яновский Л. П., Буховец А. Г. Введение в эконометрику / под ред. Л. П. Яновского. 3-е изд., стер. М.: КНОРУС, 2013. 256 с. ISBN 978-5-406-00945-1.

8. Дьяконов В. П., Круглов В. В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник. СПб.: Питер, 2001. 480 с. ISBN 5-318-00004-5.

9. Комяков А. А., Эрбес В. В., Гателюк О. А. Сравнительный анализ структуры нечеткой нейронной сети для формирования модели электропотребления в системе тягового электроснабжения // Известия Транссиба. 2015. № 2 (22). С. 64–71.

10. Шумилова Г. П., Готман Н. Э., Старцева Т. Б. Прогнозирование электрических нагрузок при оперативном управлении электроэнергетическими системами на основе нейронных структур: моногр. Сыктывкар: КНЦ УрО РАН. 2008. 78 с.

**КОМЯКОВ Александр Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Теоретическая электротехника».

SPIN-код: 3775-1920

AuthorID (РИНЦ): 514132

Адрес для переписки: tskom@mail.ru

**ПОНОМАРЕВ Антон Витальевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Теоретическая электротехника».

SPIN-код: 8927-5050

AuthorID (РИНЦ): 514134

Адрес для переписки: antonyswork@gmail.com

**ЭРБЕС Виктор Владимирович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИЧ.

SPIN-код: 6438-6900

AuthorID (РИНЦ): 728432

Адрес для переписки: erbes-viktor@mail.ru

#### Для цитирования

Комяков А. А., Пономарев А. В., Эрбес В. В. Разработка программного комплекса для определения эффективности энергосберегающих устройств и технологий в производственном процессе предприятия // Омский научный вестник. 2018. № 3 (159). С. 31–36. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-159-31-36.

Статья поступила в редакцию 13.03.2018 г.

© А. А. Комяков, А. В. Пономарев, В. В. Эрбес