

## **РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Статья посвящена разработке интеллектуальной системы контроля энергетической эффективности электрооборудования, представляющей собой программно-аппаратный комплекс и предназначенной для последующего использования на предприятиях промышленности и транспорта. Целью данной системы является устранение нерационального потребления электроэнергии и установление периодичности проведения технического обслуживания и ремонта электрооборудования, что позволит продлить его ресурс. Представлены результаты лабораторных испытаний по выбору характеристик электронных компонентов и разработке конструкции элементов предлагаемой системы. Полученные результаты подтверждают возможность практического применения такой системы.

**Ключевые слова:** электрооборудование, энергетическая эффективность, время работы, температура, освещенность, прогнозирование.

Потребление электроэнергии на предприятиях РФ является одной из основных категорий затрат при производстве, а повышение энергетической эффективности в современных условиях является одним из направлений, способствующих повышению конкурентоспособности предприятия.

Одним из инструментов повышения энергоэффективности является организация системы непрерывного контроля объема потребления электрической энергии цехами и производственными участками предприятия с привязкой к производственным показателям и климатическим факторам [1]. Для реализации такой системы необходимы специальное оборудование и алгоритмы управления, позволяющие выполнить полноценное исследование процесса электропотребления на предприятии, что давало бы возможность разработки управляющих воздействий по снижению нерационального потребления электроэнергии [2].

В настоящей статье представлены результаты разработки интеллектуальной системы контроля энергетической эффективности эксплуатации электрооборудования предприятий. Применение такой системы позволит, с одной стороны, снизить объем потребления электрической энергии на предприятии за счет устранения нерационального ее потребления в цехах и на производственных участках и, с другой стороны, достичь продления ресурса

электрооборудования предприятий за счет возможности установления периодичности проведения технического обслуживания и ремонта электрооборудования и своевременного осуществления этих мероприятий [3, 4].

Предлагаемая интеллектуальная система включает в себя следующие основные элементы (рис. 1):

1. Блок учета времени наработки электрооборудования.
2. Блок сбора данных о расходе электроэнергии.
3. Блок сбора данных о климатических показателях.
4. Блок сбора данных об объеме производственной деятельности объекта.
5. Программный блок оценки энергетической эффективности и ресурса электрооборудования.

Блок учета времени наработки электрооборудования в различных режимах (отключено, холостой ход, включено при различных нагрузках) является ключевым блоком всей системы, поскольку в расчетах энергетической эффективности непосредственно фигурирует время работы электрооборудования. Известным техническим решением является способ и устройство для контроля времени наработки электроэнергетического оборудования, при использовании которого производится измерение тока в питающем кабеле контактным способом [5]. В большинстве случаев это требует вмешатель-

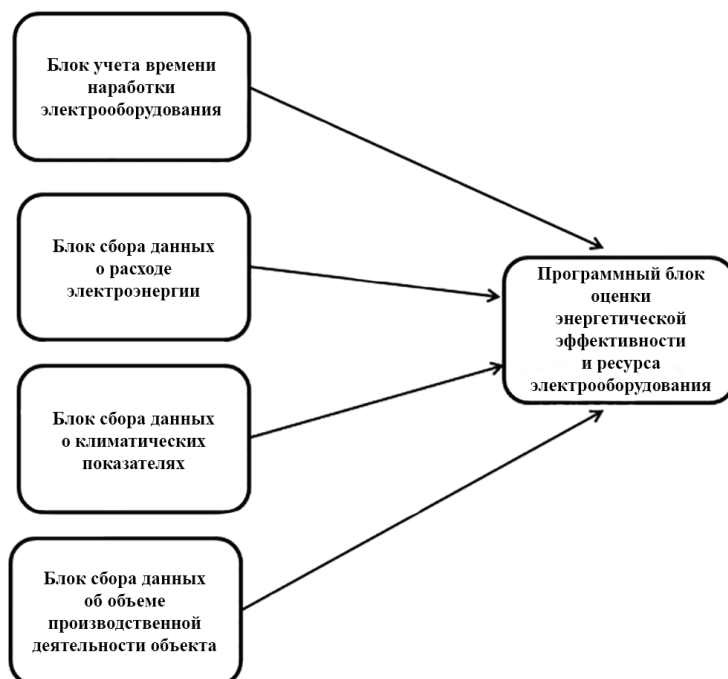


Рис. 1. Структурная схема интеллектуальной системы контроля энергетической эффективности

ства в систему электроснабжения оборудования, что является недостатком указанного устройства. Поэтому целесообразным будет являться техническое решение, позволяющее расширить возможности контроля и регистрации рабочего и нерабочего времени работы электрооборудования за счет применения бесконтактных методов контроля переменного магнитного поля, создаваемого токоведущими жилами питающего кабеля.

В результате ранее проведенных исследований было установлено, что бесконтактный контроль наличия нагрузки в линии, питающей электрооборудование, может быть осуществлен несколькими способами. При наличии одножильного кабеля, питающего рассматриваемое электрооборудование, целесообразно применять токоизмерительные клещи. Во всех остальных случаях следует использовать индуктивные датчики с усилителем [6].

На рис. 2 представлена структурная схема устройства, реализующего блок учета времени наработки электрооборудования.

Устройство содержит блок измерений 1, часы реального времени 2 и блок управления 3, выходы которых соединены с микроконтроллером 4, в свою очередь соединенным с блоком индикации 5, запоминающим устройством 6 и блоком вывода информации 7. Блок измерений 1 включает в себя последовательно соединенные датчик переменного магнитного поля 8, блок усиления и фильтрации 9, компаратор 10, детектор переменного напряжения 11, блок сравнения 12, при этом компаратор и блок сравнения связаны с источником опорного напряжения 14, выход компаратора соединен со световым индикатором 13, а выход блока сравнения соединен с входом микроконтроллера. Датчик переменного магнитного поля 8 реализован на основе кольцевого магнитопровода из магнитомягкого ферромагнитного материала, имеющего разрыв с магнитодиэлектрической вставкой, на который намотана сигнальная обмотка, выводы которой под-

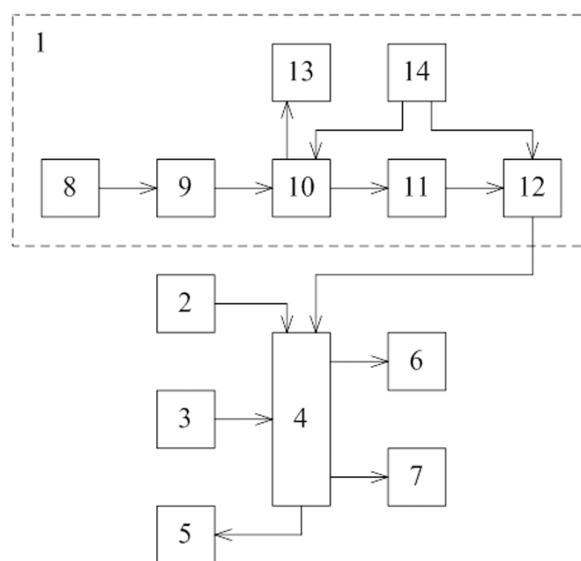


Рис. 2. Блок-схема устройства учета времени работы электрооборудования

ключены к входу блока усиления и фильтрации 9. Схема блока усиления и фильтрации представлена на рис. 3. Для усиления сигнала применяется четыре усилительных каскада на операционных усилителях с коэффициентом усиления 10, выполненных на двух микросхемах AD8542. После первого и второго каскада предусмотрены RC-фильтры для снижения шумов (они обозначены на схеме соответственно R5, C4 и R8, C7).

Внешний вид предлагаемого устройства представлен на рис. 4.

Данное устройство позволит расширить возможности контроля и регистрации времени работы электрооборудования за счет применения бесконтактного метода контроля переменного магнитного

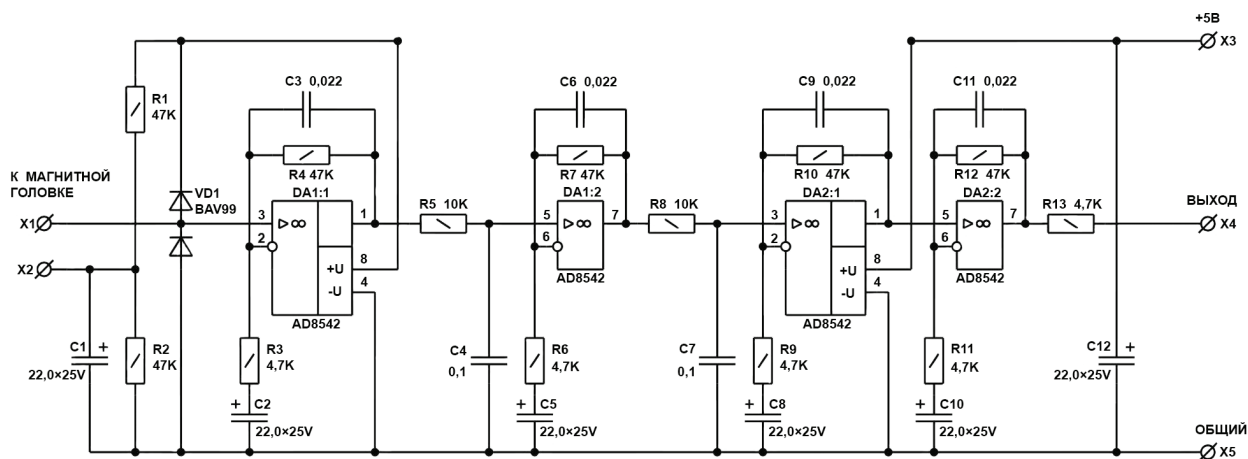


Рис. 3. Электрическая схема блока усиления и фильтрации

поля, индуцируемого током в питающем кабеле, поскольку оно применимо при отсутствии технической возможности рассечки жил кабеля с целью установки оборудования для подключения датчиков тока и напряжения.

При выборе технического решения по реализации блока сбора данных о расходе электроэнергии были рассмотрены следующие варианты:

1. При наличии прибора учета электроэнергии на объекте возможно применение существующего интерфейса передачи данных (например, с помощью измерительной головки). В этом случае необходимо иметь соответствующее программное обеспечение, что не всегда доступно с учетом широкой номенклатуры применяемых в системах электропитания счетчиков электроэнергии. Этот метод предпочтительно применять, когда исследуемый объект имеет прибор учета, включенный в АИИС КУЭ.

2. Возможно оборудование объекта отдельным прибором учета электроэнергии. В этом случае необходимо вмешательство в систему электроснабжения объекта. Данный способ целесообразно применять в случае установки постоянно действующей системы контроля энергетической эффективности объекта.

3. Возможно применение портативных устройств для измерения параметров электропотребления (например, анализаторов качества электроэнергии), синхронизированных по времени с другими блоками системы. Данный подход эффективен в случае периодического контроля энергоэффективности исследуемого объекта.

Таким образом, конструктивное исполнение блока сбора данных о расходе электроэнергии следует выбирать в зависимости от задач, которые планируется решать с применением разрабатываемого программно-аппаратного комплекса. В настоящей работе для целей испытания разработанного устройства предполагается использование третьего варианта исполнения.

Блок сбора данных о климатических показателях может быть реализован следующими способами:

1. С помощью известных в промышленности датчиков учета изменения климатических факторов (температуры, продолжительности светового дня и облачности).

2. С применением существующих метеорологических информационных систем.

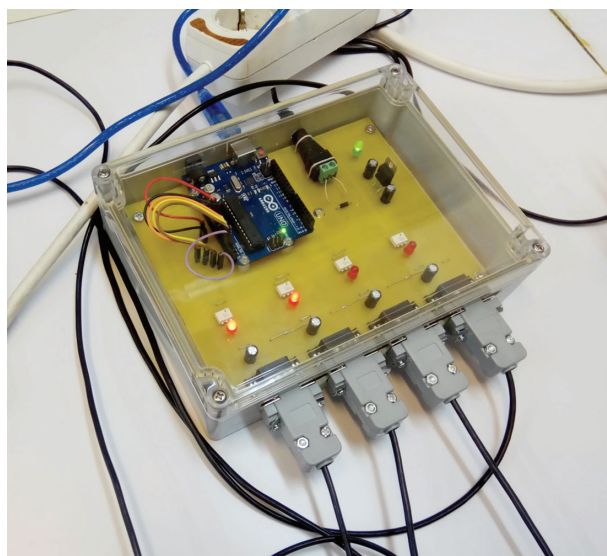


Рис. 4. Внешний вид устройства учета времени работы электрооборудования

В данном случае предполагается применение первого способа.

Блок сбора данных об объеме производственной деятельности объекта может предусматривать следующие варианты реализации:

1. Автоматический сбор данных при наличии системы контроля объема производственной деятельности (например, на котельной, оборудованной приборами учета выработанной тепловой энергии, на компрессорной с приборами учета сжатого воздуха). Однако для большинства объектов такой учет в автоматическом режиме не ведется.

2. Сбор данных с помощью оператора. Данный подход применим к большинству объектов, однако недостатком его являются возможные ошибки, связанные с человеческим фактором.

В настоящей работе предполагается введение данных в упомянутый блок оператором.

Программный блок оценки энергетической эффективности и ресурса электрооборудования устанавливается на персональном компьютере. Основными его элементами являются блок анализа первичных исходных данных расхода электроэнергии и влияющих факторов (БАПИД), блок разработки

математических моделей процесса электропотребления и времени работы электрооборудования (БРММ) и блок определения энергетической эффективности эксплуатации электрооборудования (БОЭЭ).

Принцип функционирования программного блока оценки энергетической эффективности и ресурса электрооборудования следующий. Данные с микроконтроллерной платы Arduino-Uno в БАПИД передаются в формате Excel расширением .xlsx, а затем по полученным данным выполняется расчет рекомендуемого объема выборки для формирования математической модели процесса электропотребления с учетом погрешности полученных данных о расходе электроэнергии. Интерфейс программы отображает график расхода электроэнергии, по которому производился расчет.

Из загруженных данных для разработки математических моделей формируются три выборки: обучающая, тестовая и проверочная. Анализ связей между расходом электроэнергии и влияющими факторами выполняется с помощью расчета парных и частных коэффициентов корреляции. С целью выбора наилучшего набора факторов для разработки математической модели процесса электропотребления выполняется оценка мультиколлинеарности между влияющими факторами. Граничное значение частного коэффициента корреляции, при котором выполняется исключение фактора, задается в интерфейсе программы на усмотрение оператора.

Интерфейс БАПИД позволяет сохранить результаты корреляционного анализа расхода электроэнергии и влияющих факторов в виде отчета. Файлы с данными о расходе электроэнергии и влияющих факторах для разработки математических моделей процесса электропотребления и времени работы оборудования, собранными в виде таблиц, сохраняются с расширением .dat.

В БРММ для разработки математических моделей используется разработанный ранее алгоритм выбора параметров структуры, обучения и оценки нечеткой нейронной сети [7–9]. Непосредственное формирование математических моделей производится при помощи программного пакета MATLAB, и в частности — его приложений для работы с нечеткими нейронными сетями и нечеткими системами. С помощью разработанной математической модели процесса электропотребления [10–12] моделируется расход электроэнергии за рассматриваемые сутки с учетом влияющих факторов.

Далее используется БОЭЭ. В данном блоке ежедневно определяется энергетическая эффективность производственного процесса электрооборудования. При выполненном расчете интерфейс программы отображает график сравнения фактических и смоделированных значений расхода электроэнергии, ежедневную оценку энергетической эффективности производственного процесса со значением экономии электроэнергии (в абсолютных и относительных значениях от общего потребления электрической энергии) и суммарную экономию электроэнергии за весь рассматриваемый период. В случае изменения производственного процесса интерфейс программы позволяет определить, какое оборудование работало с экономией или перерасходом электроэнергии. Для этого загружаются данные по фактическому и смоделированному времени работы электрооборудования. Расчет выполняется ежедневно для каждого комплекса электрооборудования.

Результатом работы является формирование отчета об энергетической эффективности производственного процесса электрооборудования.

Создание интеллектуальной системы контроля энергетической эффективности эксплуатации электрооборудования предприятий в виде программно-аппаратного комплекса, целью применения которой является достижение снижения электропотребления и продления ресурса электрооборудования, что в итоге будет способствовать повышению энергетической эффективности предприятия.

#### Библиографический список

1. Зажирко В. Н., Никифоров М. М., Пашков Д. В. [и др.]. Принципы построения АСУ ТЭР // Железнодорожный транспорт. 2005. № S11. С. 23–25.
2. Черемисин В. Т., Никифоров М. М. Система контроля и оперативного управления потреблением топливно-энергетических ресурсов // Железнодорожный транспорт. 2010. № 11. С. 64–65.
3. Черемисин В. Т., Зажирко В. Н., Никифоров М. М. [и др.]. Разработка подсистемы анализа и систематизации составляющих расхода электроэнергии на эксплуатационные нужды в общей системе мониторинга потребления и потерь электроэнергии // Исследование процессов взаимодействия объектов железнодорожного транспорта с окружающей средой: сб. науч. ст. / ОмГУПС. Омск, 2003. С. 174–186.
4. Никифоров М. М., Пашков Д. В. Принципы разработки автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии с функциями оперативного управления // Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте: материалы Всероссийской науч.-техн. конф. с междунар. участием: в 2 т. / Красноярск: Изд-во «Гротеск», 2005. Т. 1. С. 50–54.
5. Пат. 2534704 Российская Федерация, МПК G 01 R 19/00. Способ контроля состояния и учета времени наработки электроэнергетического оборудования и устройство для его реализации / Бартенев В. Г. № 2013113662/28; заявл. 27.03.13; опубл. 10.12.14, Бюл. № 34.
6. Комяков А. А., Эрбес В. В. Применение лабораторной станции NI ELVIS II для проведения натурных испытаний датчиков контроля режимов работы электрооборудования // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: материалы II Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / ОмГУПС. Омск, 2016. С. 190–195.
7. Комяков А. А., Иванченко В. И., Эрбес В. В. Разработка математической модели объема потребления электрической энергии в системе тягового электроснабжения на основе нечетких нейронных сетей // Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем: материалы Междунар. науч.-практ. конф. / ОмГУПС. Омск, 2014. С. 129–134.
8. Комяков А. А., Эрбес В. В., Сидаунов Д. О. Анализ влияния типа и количества функций принадлежности нечеткой нейронной сети на точность моделирования процесса электропотребления // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: материалы III Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием: в 3 ч. / ОмГУПС. Омск, 2015. Ч. 3. С. 153–158.
9. Cheremisin V. T., Komyakov A. A., Erbes V. V. Simulation of Power Consumption in Railway Power Supply Systems with of Artificial Intelligence Aids // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), May 16–19, 2017. St. Petersburg, 2017. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076242.
10. Шумилова Г. П., Готман Н. Э., Старцева Т. Б. Прогнозирование электрических нагрузок при оперативном управлении электроэнергетическими системами на основе

нейронных структур. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 85 с. ISBN 5-7691-1977-2.

11. Орлов А. И. Эконометрика. М.: Экзамен, 2014. 573 с. ISBN 5-472-00035-1.

12. Яновский Л. П., Буховец А. Г. Введение в эконометрику / под ред. Л. П. Яновского. 2-е изд., доп. М.: КноРус, 2007. 254 с. ISBN 978-5-85971-270-0.

**ИВАНЧЕНКО Владимир Иванович**, аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог».

Адрес для переписки: ivanchenko-v.i@yandex.ru

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

Адрес для переписки: tskom@mail.ru

**ПЛОТНИКОВ Юрий Викторович**, инженер-исследователь Научно-исследовательской части (НИЧ).

Адрес для переписки: omgups\_lab@mail.ru

**ЭРБЕС Виктор Владимирович**, кандидат технических наук, инженер-проектировщик НИЧ.

Адрес для переписки: erbes-viktor@mail.ru

#### Для цитирования

Иванченко В. И., Комяков А. А., Плотников Ю. В., Эрбес В. В. Разработка интеллектуальной системы контроля энергетической эффективности эксплуатации электрооборудования предприятий // Омский научный вестник. 2018. № 1 (157). С. 54–58. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-157-54-58.

Статья поступила в редакцию 24.11.2017 г.

© В. И. Иванченко, А. А. Комяков, Ю. В. Плотников, В. В. Эрбес

УДК 621.313.33

DOI: 10.25206/1813-8225-2018-157-58-62

**В. А. КОПЫРИН**  
**О. В. СМИРНОВ**

Тюменский  
индустриальный университет,  
г. Тюмень

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПОГРУЖНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

В статье представлены разработанная имитационная модель погружного асинхронного электродвигателя и результаты исследования режимов его работы. В качестве объекта исследования выбран электродвигатель номинальной мощностью 63 кВт. Построение модели проведено в программном комплексе Matlab/Simulink. Получены рабочие характеристики электродвигателя.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, энергия, нефтяная скважина, имитационная модель, погружной электродвигатель.

**Введение.** В настоящее время свыше 75 % всей нефти в России добывается установками электроцентробежных насосов, что составляет 410,4 млн т [1, 2]. Погружной асинхронный электродвигатель (ПЭД), входящий в состав электротехнического комплекса установки электроцентробежного насоса для добычи нефти, является одним из основных его элементов. Из-за конструктивных особенностей ПЭД построение адекватной имитационной модели, описывающей с достаточной степенью точности электромеханические процессы в машине, является сложной задачей [3–5].

В работах [6, 7] приведены результаты моделирования ПЭД в составе установок электроцентробежных насосов как асинхронного двигателя специфической конструкции. Предложенные математические модели позволяют исследовать электрические и механические характеристики электродвигателя.

В свою очередь, использование метода имитационного моделирования, как частного случая математического, позволяет наглядно исследовать процессы функционирования технических и техно-

логических объектов при минимальных материальных и трудовых затратах.

Целью публикации является сообщение о разработанной уточненной имитационной модели погружного асинхронного электродвигателя.

**Теоретическая часть.** В качестве объекта исследования выбран асинхронный электродвигатель ЭД-Я 63-117 М5В5 мощностью 63 кВт.

Для построения имитационной модели использованы готовые блоки электротехнических устройств, входящих в библиотеку Matlab/Simulink SimPowerSystem: three-phase programmable voltage source; asynchronous machinesquirrel cage. Для измерения мгновенных значений токов и напряжений участков цепи использован блок three-phase U-I.

Модель механической части асинхронной машины описывается выражениями [8]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} \omega_m &= \frac{1}{2H} (T_e - F \cdot \omega_m - T_m) \\ \frac{d}{dt} \theta_m &= \omega_m \end{aligned} \right\} \quad (1)$$