

УДК 681.5

В. Н. ГАЛУШКО, кандидат технических наук, А. В. ДРОБОВ, магистр технических наук, С. И. БАХУР, магистр технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель; А. И. ГОРБАЧ, Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ И АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ

В статье рассмотрен программно-технологический инструментарий повышения энергоэффективности электрооборудования, позволяющий обоснованно принимать решения по обеспечению требуемой надежности и безопасности электроснабжения потребителей.

Особенность электроснабжения современного железнодорожного комплекса с тяговыми подстанциями заключается в том, что потребление электроэнергии имеет резкопеременный характер нагрузки. Резкие колебания нагрузки с большой индуктивной составляющей негативно сказываются на качестве электроэнергии для потребителей, подключённых к шинам подстанции железнодорожного предприятия. Изменения нагрузки вызывают глубокие провалы напряжения и мерцания освещённости, которые не удовлетворяют требованиям ГОСТ по качеству электроэнергии, делая подключение невозможным без ряда специальных устройств, сглаживающих колебания питающего напряжения. Учитывая отмеченную актуальность, целью исследования является разработка рекомендаций по повышению надежности электроснабжения и качества электроэнергии для железнодорожной отрасли.

Для реализации поставленных целей, разработан программно-технологический инструментарий (ПТИ), реализация которого основывается на моделях надежности [1], электрических расчетах и анализе технических мероприятий.

Перечислим основные задачи, решаемые с помощью ПТИ:

- рассчитывать и прогнозировать надежность электрооборудования; оценивать величину необходимого резерва и сроки службы электрооборудования с учетом влияния различных факторов;
- принимать решения по результатам расчетов с целью повышения энергоэффективности предприятий на основании разработанных форм, внедренных в практику энергоаудитов;
- автоматизировать процессы выбора защитной аппаратуры, расчет потерь мощности и электроэнергии в элементах системы электроснабжения, выбор сечения проводов или жил кабеля, определения мощности электродвигателей для различных режимов работы привода, расчета трансформаторов, асинхронных двигателей и машин постоянного тока для ускорения расчета и устранения ошибок исследователя.

Перечислим основные положения, используемые при разработке приложения ПТИ, позволяющего рассчитывать системы электроснабжения. Современная система электроснабжения промышленного предприятия должна удовлетворять следующим *основным требова-*

*ниям:* экономичности; надежности; безопасности; удобству эксплуатации; обеспечению надлежащего качества электроэнергии; необходимой гибкости, обеспечивающей возможность расширения при развитии предприятия.

Важные *дополнительные требования* к системам электроснабжения предъявляют электроприемники: с резкопеременной циклически повторяющейся ударной нагрузкой; непрерывного производства, требующие бесперебойности питания при всех режимах системы электроснабжения.

При реконструкции и проектировании системы электроснабжения учитывают многочисленные факторы, к числу которых относятся: потребляемая мощность; категория надежности питания отдельных потребителей электроэнергии; графики нагрузок крупных потребителей; характер нагрузок; размещение электрических нагрузок на генеральном плане предприятия; число и мощность подстанций и других пунктов потребления электроэнергии; напряжение потребителей и другие факторы.

Одной из самых главных проблем в промышленной энергетике является энергосбережение, которое напрямую зависит от потерь электроэнергии во всех звеньях системы электроснабжения и в самих электроприемниках. Основными путями снижения потерь электроэнергии в промышленности являются следующие:

- 1) рациональное построение системы электроснабжения при ее реконструкции и проектировании, включающее в себя применение рациональных напряжений, числа и мощности силовых трансформаторов, общего числа трансформаций, места размещения подстанций, схемы электроснабжения, компенсации реактивной мощности и др.;
- 2) снижение потерь электроэнергии в действующих системах электроснабжения, включающее в себя управление режимами электропотребления, регулирование напряжения, ограничение холостого хода электроприемников, модернизацию существующего и применение нового, более экономичного и надежного технологического и электрического оборудования, применение экономически целесообразного режима работы силовых трансформаторов, замену асинхронных двигателей (АД) на синхронные (СД), где это возможно, автоматическое управление освещением в течение суток, повышение качества электроэнергии и др.;

3) нормирование электропотребления, разработка научно обоснованных норм удельных расходов электроэнергии на единицу продукции; нормирование электропотребления предполагает наличие на предприятиях надежных систем учета и контроля расхода электроэнергии;

4) организационно-технические мероприятия, которые разрабатываются конкретно на каждом предприятии с учетом его специфики.

На рисунке 1 приведен внешний вид web-приложения программы электрических расчетов и про-

грамма расчета систем электроснабжения. Одним из преимуществ реализации расчета с помощью web-приложения является тот факт, что клиенты не зависят от конкретной операционной системы пользователя, а также удовлетворяются требования надежности данных (полный доступ к базе данных защищен паролем), контролируется правильность и непротиворечивость данных, вводимых пользователем. Ниже приведено описание и обзор основных возможностей реализованных программ.

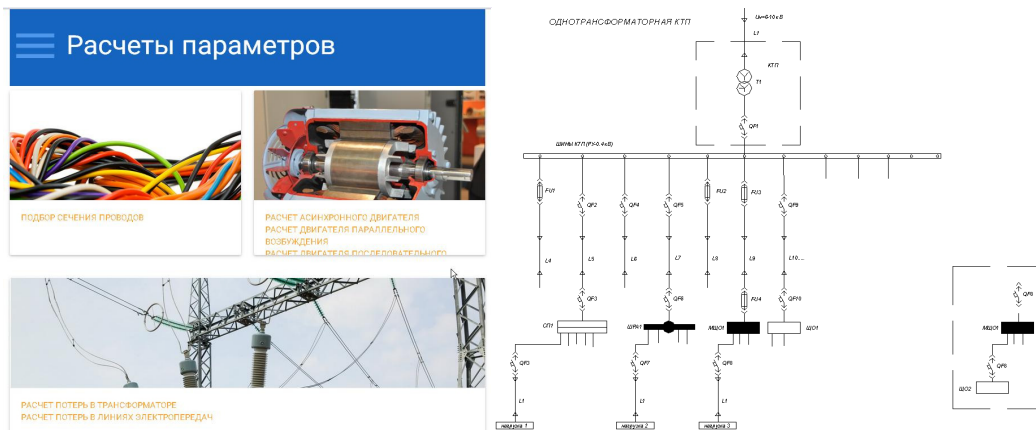


Рисунок 1 – Пример реализации web-приложения электрических расчетов

*Используемые технологии и средства при реализации web-приложения.*

1 Фреймворк ASP.NET MVC – универсальная технология, которая позволяет использовать себя как для небольших проектов, так и для крупных высоконагруженных систем.

ASP.NET MVC, реализуя шаблон MVC, облегчает управление сложными структурами путем разделения приложения на модель, представление и контроллер. Платформа ASP.NET MVC предоставляет следующие возможности:

- разделение задач приложения (логика ввода, бизнес-логика и логика пользовательского интерфейса). Все основные контракты платформы MVC основаны на интерфейсе и подлежат тестированию с помощью макетов объекта, которые имитируют поведение реальных объектов приложения;

- расширяемая и дополняемая платформа. Разработчик может подключать собственный механизм представлений, изменять политику маршрутизации URL-адресов, сериализацию параметров методов действий и другие компоненты;

- расширенная поддержка маршрутизации ASP.NET.

2 Шаблон MVC – это конструкционный шаблон, который описывает способ построения структуры приложения, сферы ответственности и взаимодействие частей в данной структуре.

3 Средства создания интерфейса взаимодействия с пользователем. Razor – интеллектуальный обработчик программного кода динамических web-страниц на ASP.NET.

Одним из действенных путей уменьшения потерь электроэнергии является компенсация реактивной мощности (КРМ) потребителей с помощью местных источников реактивной мощности. Причем весьма важное значение имеет правильный выбор типа, мощ-

ности, местоположения и способа автоматизации источников реактивной мощности.

С целью расширения возможностей ПТИ создан дополнительный элемент редактора, позволяющий оценить эффективность мероприятия по компенсации реактивной мощности, основные теоретические предпосылки которого описываются ниже.

Снизить потребление реактивной мощности, то есть уменьшить потери активной мощности, можно без применения и с применением компенсирующих устройств.

Качество электроэнергии влияет не только на технологический процесс производства и производительность труда и механизмов, но и на потери электроэнергии, надёжную работу релейной защиты и системной автоматики и т. п. Разные показатели качества электроэнергии различным образом влияют на надёжность работы электротехнических комплексов. С другой стороны, режимы работы потребителей, особенно потребителей с резкопеременным характером нагрузки, влияют на качество электроэнергии не только самого потребителя, но и близлежащего промышленного района.

В нормальном режиме работы системы электроснабжения потребители показатели качества электроэнергии (ПКЭ) не должны выходить за пределы допустимых значений, которые приведены в ГОСТ [2].

Крупные потребители с резкопеременным графиком нагрузки и большой составляющей реактивной мощности вызывают резкие колебания напряжения, что приводит к возникновению фликера, снижению мощности работы электродвигателей не только на самом предприятии, но и близлежащем промышленном районе, и снижают надёжность электроснабжения электротехнических комплексов. Таким образом, остро встает вопрос компенсации реактивной мощности у таких потребителей.

Реактивная мощность в электрических сетях вызывает дополнительные активные потери (на покрытие которых расходуется энергия на электростанциях) и потери напряжения (ухудшающие условия регулирования напряжения). Для устранения перегрузок и повышения коэффициента мощности электрических установок осуществляется компенсация реактивной мощности.

Компенсация может достигаться с помощью специализированных устройств – синхронных конденсаторов, которые представляют собой синхронные двигатели без нагрузки на валу, а также с использованием уже имеющихся двигателей в режиме перевозбуждения или путем перевода генераторов в режим синхронных конденсаторов. Таким приемом пользуются промышленные потребители, имеющие собственные блок-станции и синхронные двигатели.

Статические компенсаторы тоже бывают двух видов: продольные и поперечные. Продольная компенсация применяется для высоковольтных линий электропередач. Дело в том, что высоковольтные ЛЭП обладают собственным ёмкостным сопротивлением и генерируют реактивную мощность, основным негативным следствием которой являются не столько потери электроэнергии, сколько потери напряжения и, следовательно, снижение качества электроснабжения. Для предотвращения этих последствий в схему последовательно включают компенсирующее устройство, которое уменьшает реактивное сопротивление линии.

Но наиболее распространено использование статических компенсаторов, которые представляют собой батарею конденсаторов и включаются на шины подстанций. Такая компенсация применяется в различных узлах электрических сетей и для различных классов напряжения.

Решение задач, связанных с наличием в системе электропотребления реактивных нагрузок, идет по пути компенсации реактивной мощности. Это обусловлено проведением двух взаимно дополняющих групп мероприятий: снижение потребления реактивной мощности электроприемниками; установка непосредственно у потребителей и в узлах сетей специальных источников реактивной мощности – компенсирующих устройств.

На основании выше сказанного, можно сделать вывод о том, что в сетях со специфическими нагрузками (нелинейные, несимметричные и резкопеременные нагрузки) существуют определенные особенности компенсации реактивной мощности, которые заключаются в следующем:

1) из-за низкого коэффициента мощности потребителей и резкопеременного характера нагрузки необходимо осуществлять компенсацию как постоянной, так и переменной составляющей реактивной мощности. Компенсация постоянной составляющей реактивной мощности необходима для улучшения  $\cos\varphi_2$  и для уменьшения отклонений напряжения в питающей сети. Компенсация переменной составляющей реактивной мощности преследует цель уменьшения колебания напряжения в питающей сети;

2) из-за быстрых изменений потребляемой реактивной мощности необходимо применение быстродействующих компенсирующих устройств, способных изменять регулируемую реактивную мощность со скоростью, соответствующей скорости наброса и сброса потребляемой реактивной мощности. Необходимое

быстродействие таких компенсирующих устройств можно ориентировочно определить как с 100–2000 Мвар/с;

3) из-за неравномерного потребления реактивной мощности по фазам необходимо и пофазное управление компенсирующими устройствами;

4) ограничивается применение батарей конденсаторов для компенсации постоянной составляющей реактивной мощности в сети с резкопеременной вентильной нагрузкой. Это обусловлено наличием в сети высших гармоник тока и напряжения при работе нелинейных нагрузок.

Высшие гармоники приводят к значительным перегрузкам батарей конденсаторов по току.

Основными техническими средствами компенсации реактивной мощности и улучшения спектров токов и напряжений на преобразовательных подстанциях являются: а) синхронные конденсаторы; б) тиристорные конденсаторы реактивной мощности; в) пассивные фильтрокомпенсирующие устройства; г) активные фильтры; д) параметрические источники тока; е) выпрямительные агрегаты с повышенными энергетическими показателями.

Особое внимание в настоящее время уделяется также совершенствованию схемных решений, методам расчёта и вопросам практического применения фильтрокомпенсирующих устройств.

Современными методами компенсации реактивной мощности у потребителей с резкопеременной нагрузкой является использование статических тиристорных конденсаторов реактивной мощности, представляющих собой комбинированную электроустановку, содержащую одну или несколько тиристорно-реакторных групп, фильтрокомпенсирующих устройств, конденсаторные установки.

Анализ параметров надежности электрооборудования и электрических систем с помощью ПТИ.

Наиболее значительное влияние на надежность работы приемников электроэнергии и технологических установок оказывают такие ПКЭ, как отклонения, несимметрия и несинусоидальность напряжения. Основными факторами, вызывающими отклонения напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий, являются следующие: изменение режимов работы приемников электроэнергии (резкопеременный характер нагрузки); изменение режима работы источника питания; неравномерная загрузка различных фаз при подключении однофазных и ударных нагрузок к элементам системы электроснабжения.

Изменение напряжения на зажимах приемника электроэнергии даже в пределах, установленных ГОСТ, вызывает изменение его технико-экономических показателей. Кроме того, отклонения напряжения влияют на показатели питающей сети за счет изменения потерь мощности и электроэнергии.

Существенное влияние оказывают отклонения напряжения на надежность работы асинхронных двигателей (АД), которые являются наиболее распространенным промышленным приемником электроэнергии.

Для двигателей, работающих с полной нагрузкой, понижение напряжения приводит к уменьшению частоты вращения. Если производительность механизмов зависит от частоты вращения двигателя, то на зажимах таких двигателей рекомендуется поддерживать напряжение не ниже  $n_{ном}$ .

Опыт эксплуатации показал, что при отжиге заготовок в печах сопротивление при незначительном снижении напряжения технологический процесс удлиняется, а при снижении напряжения на 10 % процесс отжига производить невозможно. У машин точечной сварки при отклонениях напряжения более  $\pm 15\%$  получается 100%-ный брак продукции. На каждый процент понижения напряжения световой поток ламп накаливания уменьшается почти на 4 %, вызывая изменение освещенности.

Несимметрия напряжения отрицательно сказывается на режиме работы механизмов электропривода, уменьшая срок службы, и снижает надежность электродвигателей. Так, несимметрия напряжения в 1 % вызывает значительную несимметрию токов в обмотках (до 9 %). Токи обратной последовательности накладываются на токи прямой последовательности и вызывают дополнительный нагрев статора и ротора, что приводит к ускоренному старению изоляции и уменьшению располагаемой мощности двигателя.

Магнитное поле токов обратной последовательности статора синхронных машин индуцирует в массивных металлических частях ротора значительные вихревые токи, вызывающие повышенный нагрев ротора и вибрацию вращающейся части машины. При значительной несимметрии вибрация может оказаться опасной для машины. Несимметрия напряжения не оказывает заметного влияния на работу кабельных и воздушных линий, однако у трансформаторов наблюдается сокращение срока службы.

Токи нулевой последовательности постоянно проходят через заземлители, вызывая высыхивание грунта, что увеличивает его удельное сопротивление и, соответственно, сопротивление растекания тока на землю. Увеличение сопротивления заземления увеличивает число грозовых отключений ЛЭП, снижая надёжность ЛЭП.

Несинусоидальные режимы, обусловленные протеканием токов высших гармоник по элементам системы электроснабжения электротехнических комплексов,

вызывают дополнительные потери активной мощности и электроэнергии. Наибольшие потери имеют место в трансформаторах, электрических двигателях и синхронных генераторах.

Наличие высших гармоник тока приводит к повышению вероятности перехода однофазных замыканий на землю в двухфазные КЗ в кабельных линиях сетей с изолированной нейтралью. Следовательно, высшие гармоники в кривой напряжения питающей сети приводят к сокращению срока службы силовых кабелей, повышению аварийности в кабельных сетях, увеличению числа необходимых ремонтов. Опыт эксплуатации показал, что при несинусоидальности 5–10 % суммарные амортизационные отчисления и стоимость текущих ремонтов кабелей возрастают на 15–20 %.

С проблемой надежности в электроэнергетике связаны следующие практические задачи: прогнозирование надежности оборудования и установок; нормирование уровня надежности; испытания на надежность; расчет и анализ надежности; оптимизация технических решений по обеспечению надежности при создании и эксплуатации электротехнического оборудования, установок, систем; экономическая оценка надежности.

Целью рассматриваемого программного инструментария анализа надежности электроустановок и электрических систем. Программный инструментарий реализован в виде web-приложения (рисунок 2) и отдельной программой для персонального компьютера. Основные преимущества разработанного программного инструментария заключаются в отсутствии необходимости установки большого числа специализированных программ; наличии широкой встроенной базы данных справочно-информационной поддержки, включающей современную обширную теоретическо-образовательную, нормативную и справочную информацию; гибкость программ расчета к различным исходным данным, возможность "усредненного" расчета или подбор наиболее вероятных параметров.

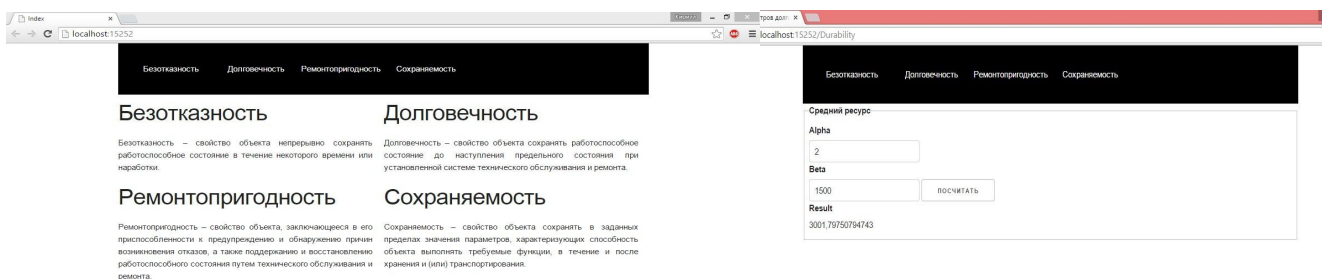


Рисунок 2 – Пример реализации web-приложения расчета параметров надежности

Практическое применение программного инструментария заключается в оптимизации (в некотором смысле) технических решений по обеспечению надежности при проектировании и эксплуатации электротехнического оборудования, установок, систем. Результаты исследования позволяют: прогнозировать показатели надежности электрооборудования в зависимости от условий эксплуатации; установить "узкие места" в

обеспечении надежности; разработать мероприятия по повышению эффективности функционирования электрооборудования, автоматизации электрических расчетов, повышении их надежности и достоверности при выборе и конструктивном исполнении электрических сетей, определении электрических нагрузок, компенсации реактивной мощности, выборе защитных аппаратов и сечений проводников, учете электроэнергии и пр.

Получено 30.09.2015

**V. N. Galushko, A. V. Drovov, S. I. Bahur, A. I. Gorbach.** More efficient use of electrical energy by means of software electrical calculations and analysis of reliability.

In this article describes the software and technology tools to improve energy efficiency of electrical equipment to reasonably make decisions to ensure the reliability and safety of electricity consumers.