

УДК 622.23.08

РАЗРАБОТКА WEB-ПРИЛОЖЕНИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

А. Г. УС, А. В. ДРОБОВ

Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь

В. Н. ГАЛУШКО

Учреждение образования «Белорусский государственный
университет транспорта», г. Гомель

Введение

Целью данной работы является создание программно-технологического инструментария повышения энергоэффективности электрооборудования, реализация которого основывается на моделях надежности, электрических расчетах и анализе технических мероприятий по экономии электроэнергии (рис. 1).



Рис. 1. Схема этапов реализации программно-технологического инструментария повышения энергоэффективности оборудования, установок, систем

Основная часть

Реализация программно-технологического инструментария повышения энергоэффективности электрооборудования предполагает создание и использование приложений, позволяющих:

– рассчитывать показатели надежности: прогнозировать надежность оборудования и установок; рассчитывать величину необходимого резерва и сроки службы электрооборудования и установок; оценивать влияние различных факторов (колебаний и несимметрии напряжения, отклонения частоты сети и т. д.) [1]–[3];

– принимать решения по результатам расчетов технических мероприятий по повышению энергоэффективности на основании разработанных форм, внедренных в практику энергоаудитов;

– анализировать предлагаемые мероприятия по повышению энергоэффективности с помощью дополнительных программ: выбора защитной аппаратуры; расчета потерь мощности и электроэнергии в элементах системы электроснабжения; выбора сечения проводов или жил кабеля; определения мощности электродвигателя для раз-

личных режимов работы привода; расчета трансформаторов, асинхронных двигателей и машин постоянного тока.

Программно-технологический инструментариум реализован в виде Web-приложения и отдельной программы для персонального компьютера. 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 и целостности данных, контролируется правильность и непротиворечивость данных, вводимых пользователем (рис. 2).

Web-приложения программ электрических расчетов

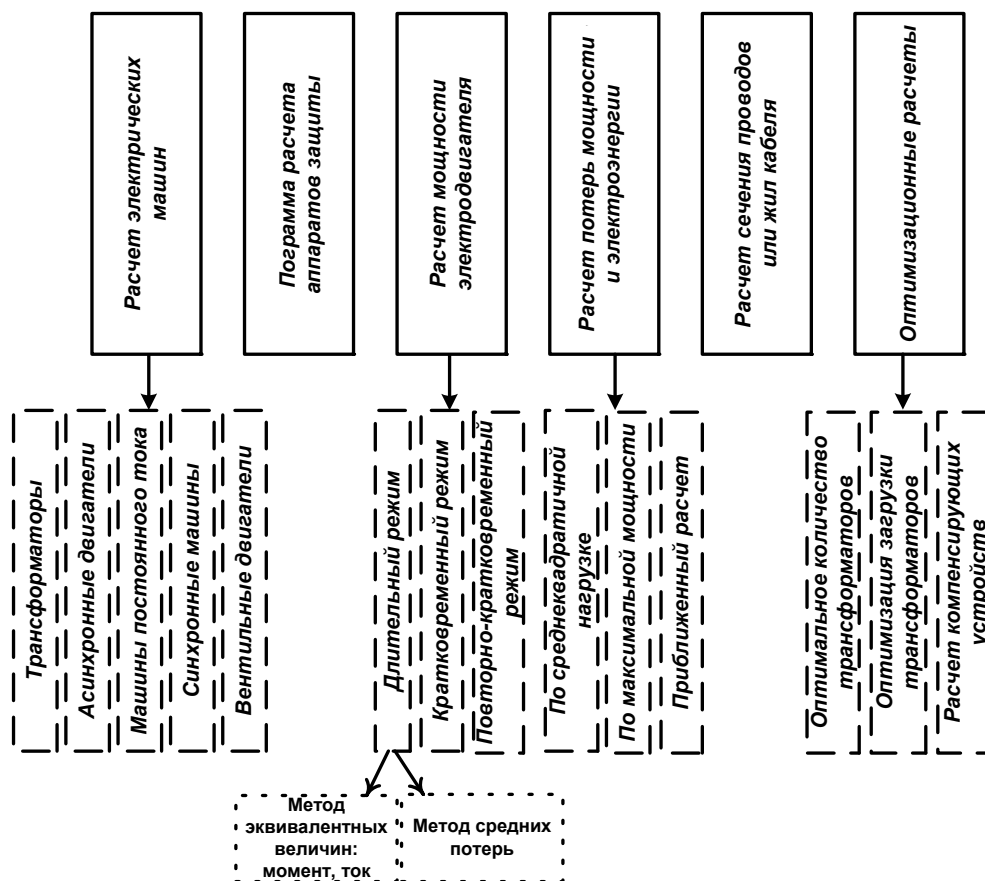


Рис. 2. Web-приложения программ электрических расчетов

Ниже приведены описание и обзор основных возможностей реализованных программ.

1. Программа *расчета трансформаторов, асинхронных двигателей и машин постоянного тока* позволяет рассчитывать:

– по паспортным данным трансформатора: номинальные токи первичной и вторичной обмоток; графики зависимости КПД от коэффициента нагрузки для различных коэффициентов мощности $\eta = f(\beta)$; графики процентного изменения вторичного напряжения и вторичного напряжения от коэффициента нагрузки для различных коэффициентов мощности $U_2 = f(\beta)$; мощность электродвигателя для различных режимов работы привода с возможностью выбора из каталога технических данных электродвигателя;

– по паспортным данным асинхронного двигателя: активную мощность, потребляемую из сети; номинальный и критический моменты; номинальный и пусковой токи; зависимости электромагнитного момента от скольжения $M = f(s)$ и $n = f(M)$; значения пускового и критического моментов при изменении напряжения сети;

– по паспортным данным двигателя постоянного тока параллельного возбуждения: номинальный момент; номинальный ток якоря; обмотки возбуждения и ток, потребляемый из сети при различной нагрузке; сопротивление цепи возбуждения и цепи обмотки якоря; сопротивление пускового реостата; зависимости $n = f(I_a)$, $n = f(M)$, $\eta = f(I_a)$; изменение частоты вращения двигателя при изменении добавочного сопротивления;

– по паспортным данным двигателя постоянного тока последовательного возбуждения: мощность, потребляемую из сети; номинальный ток двигателя; номинальный момент; сопротивление якорной цепи и обмотки возбуждения; зависимости $n = f(I_a)$, $M = f(I_a)$ и $n = f(M)$. При расчетах используется зависимость, учитывающей нелинейный характер изменения магнитного потока от тока возбуждения $\Phi = f(I_B)$.

Результаты расчетов можно импортировать в программу выбора аппаратуры защиты и управления, а также в программу анализа суммарных электрических потерь.

2. Программа *определения мощности электродвигателя для различных режимов работы привода*. Реализован следующий выбор режимов работы привода: длительный переменный, кратковременный и повторно-кратковременный; расчеты выполнены в соответствии с рекомендациями, приведенными в [4].

Если режим работы двигателя – продолжительный при переменной нагрузке, то предварительный выбор мощности производится из условия $P_{\text{ном}} \geq P_{\text{ср}}$, а затем выполняется проверочный расчет. Мощность электродвигателя определяется методами эквивалентных величин и средних потерь в зависимости от исходных данных.

Для метода эквивалентных величин существует возможность использовать один из двух методов: эквивалентного тока или моментов на валу электродвигателя. В случае использования метода моментов на валу электродвигателя исходные данные можно представить в табличной форме или с помощью нагрузочной диаграммы.

Эквивалентный момент (ток) для различной формы участков нагрузочной диаграммы рассчитывается по следующим формулам:

– для горизонтальных

$$M_{\text{эКВ}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}}; \quad (1)$$

– для треугольных

$$M_{\text{эКВ}_i} = \frac{M_i}{\sqrt{3}}; \quad (2)$$

– для трапецидальных

$$M_{\text{эКВ}_{i,i+1}} = \sqrt{\frac{(M_i^2 + M_i^2 M_{i+1}^2 + M_{i+1}^2)}{3}}. \quad (3)$$

После процедуры выбора технических данных электродвигателя из каталога (в ручном режиме или по алгоритму) производится проверка на перегрузочную способность с учетом возможного снижения питающего напряжения (указывается пользователем в процентах снижения от номинального напряжения). Проверка двигателя по перегрузочной способности производится путем сравнения с наибольшим моментом нагрузки M_{\max} .

Согласно методу средних потерь, для каждого уровня нагрузки двигателя (на каждом участке диаграммы) вычисляется мощность $P_i = M_i \omega_i$, по кривой $\eta(P/P_n)$ определяется значение η_i и рассчитываются потери $\Delta P_i = \frac{P_i(1-\eta_i)}{\eta_i}$. Затем

вычисляются средние потери: $\Delta P_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta P_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}$. Если $\Delta P_{\text{cp}} < \Delta P_n$, где ΔP_n – номиналь-

ная мощность потерь, $\Delta P_n = \frac{P_n(1-\eta_n)}{\eta_n}$, то двигатель выбран правильно.

Метод средних потерь требует знания кривой КПД двигателя в функции его нагрузки и предварительного определения потерь на каждом из участков графика, что вносит некоторые усложнения в расчет.

Для поторно-кратковременного режима работы электродвигателя на основании

исходных данных определяется эквивалентная мощность $P_{\text{эkv}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}}$. Подсчи-

тывается действительная величина продолжительности включения

$\text{ПВ} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n t_{\text{раб}i}}{\sum_{i=1}^n t_{\text{раб}i} + \sum_{j=1}^m t_{0j}}}$, пересчитывается мощность для стандартного ПВ = 60 % и за-

тем электродвигатель проверяется на перегрузочную способность.

На основании выполненных расчетов и проверки на перегрузочную способность предлагаются технические данные электродвигателей по различным справочникам, включенным в библиотеку программного инструментария.

3. Программа *расчета сечения проводов или жил кабеля* трехфазной четырехпроводной или однофазной линии с различным напряжением на основании допустимой потери напряжения и экономической плотности тока. Сечение жил проводников и кабелей напряжением до 1 кВ по нагреву определяется по таблицам длительно-допустимых токов, составленных для нормальных условий прокладки.

В качестве исходных данных указываются следующие параметры: род тока; номинальное напряжение электроустановки; характер и мощность приемников электрической энергии, материал проводника и его тип, способ прокладки, тип изоляции, оболочки, количество жил, протяженность проводов линии и пр.

Программа позволяет определить потерю напряжения в линии по известному сечению проводов, или по заданной потере рассчитать необходимое сечение проводов. Сечение токопроводящих жил выбирается для 1 и 2 классов жил по допустимой длительной токовой нагрузке на провода и кабели.

Также данная программа позволяет выбрать сечение проводов или жил кабеля трехфазной четырехпроводной линии с различным напряжением на основании допустимой потери напряжения.

Для достижения результатов расчета дополнительно требуется указать допустимые потери напряжения в процентах.

4. Программа *расчета потерь мощности и электроэнергии в элементах системы электроснабжения*. Определение расхода электроэнергии необходимо для осуществления расчетов за электропотребление с энергоснабжающей организацией, для оценки удельного расхода электроэнергии на единицу выпускаемой продукции и с целью контроля энергоэффективности. В настоящее время 10–15 % электрической энергии теряется при ее транспортировке и трансформации. Поэтому актуальной является задача воздействия на факторы, определяющие потери электроэнергии, для их снижения. Основные потери электрической энергии в системах электроснабжения имеют место в линиях электропередачи и трансформаторах.

Определение потерь мощности и энергии в системах электроснабжения реализуется следующими способами:

- по средней (среднеквадратичной) нагрузке;
- по максимальной мощности нагрузка (метод времени максимальных потерь);
- путем приближенного расчета потерь мощности в линиях электропередачи и трансформаторах.

В качестве исходных данных вводятся следующие: каталожные данные трансформаторов; расчетная полная мощность нагрузки; номинальная мощность трансформатора; количество трансформаторов; удельное сопротивление воздушных и кабельных линий; длина линий; время максимальных потерь; время использования максимума нагрузки.

В качестве *дополнительной опции, расширяющей возможности программно-технологического инструментария* в программах анализа технических мероприятий по экономии электроэнергии предлагается анализ мероприятий, позволяющих снизить потери мощности и энергии. В качестве таких путей снижения потерь реализованы следующие:

- Определение оптимального количества работающих трансформаторов. В общем случае при количестве трансформаторов n и граничной мощности нагрузки потребителя электроэнергии S_r :

$$S_r = S_{нт} \sqrt{\frac{n(n-1) \Delta P_{xx}}{\Delta P_{кз}}} \quad (4)$$

- Оптимизация загрузки трансформаторов потребителя осуществляется таким образом, чтобы КПД установленных трансформаторов был максимальным, что имеет место при выполнении условия $\Delta P_m = \Delta P_{ст}$, откуда следует уравнение

$$\frac{1}{n} \left(\frac{S_0}{S_{нт}} \right)^2 \Delta P_{кз} = n \Delta P_{xx}; \quad S_0 = n S_{нт} \sqrt{\frac{\Delta P_{xx}}{\Delta P_{кз}}}$$

- Расчет потерь мощности и напряжения при применении компенсирующих устройств.

В настоящее время энергетическая система не устанавливает ограничения на потребление реактивной энергии, поэтому предприятия не платят за реактивную мощность и энергию, но проблема компенсации реактивной энергии остается актуальной.

Мероприятия по компенсации реактивной мощности на предприятии позволяют:

- уменьшить электрическую нагрузку на трансформаторы, увеличить срок их службы;
- уменьшить нагрузку на провода и кабели, использовать меньшее их сечение или увеличить пропускную способность по активной мощности;
- улучшить качество электроэнергии у электроприемников (за счет уменьшения искажения формы напряжения и потерь напряжения);
- уменьшить нагрузку на коммутационную аппаратуру за счет снижения токов в цепях.

Для выбора мощности компенсирующих устройств на таких предприятиях целесообразно принять критерий минимума потерь электроэнергии.

Вследствие применения компенсирующих устройств на подстанции при неизменной мощности нагрузки реактивные мощности и ток в линии уменьшаются – линия разгружается по реактивной мощности. При этом в линии уменьшаются потери мощности и потери напряжения, так как:

$$\Delta P_{л} = \frac{P_{н}^2 + (Q_{н} - Q_{к})^2}{U_{н}^2} r_{л}; \quad \Delta U_{л} = \frac{P_{н} + (Q_{н} - Q_{к})}{U_{н}} x_{л}, \quad (5)$$

где $Q_{к}$ – мощность компенсирующих устройств, вар.

В качестве исходных данных программы используются: расчетные нагрузки линий; удельные сопротивления; мощности компенсирующих устройств, номинальные напряжения.

5. Программа *расчета годового расхода активной и реактивной энергии потребителя*. Данная программа позволяет рассчитать расход электроэнергии (активной и реактивной) для одиночных объектов, а также крупных функциональных комплексов.

В качестве исходных данных вводятся: установленная мощность объекта; коэффициенты спроса и мощности; время использования максимальной активной и реактивной нагрузки.

6. Программа *расчета аппаратов защиты*. Правильное определение проектом аппаратов защиты и сечения проводов (кабелей) электрической сети зданий позволяет избежать пожаров или взрывов во взрывоопасных помещениях, поэтому актуально проверять используемую или подбирать новую защитную аппаратуру.

Аппараты защиты (автоматические выключатели и предохранители) в сетях с глухозаземленной нейтралью напряжением 380/220 В должны:

- согласно ПУЭ, по своей отключающей способности соответствовать максимальному значению тока КЗ (и обеспечивать надежное отключение одно- и многофазных замыканий);
- соответствовать расчетному току сети (учитывать пусковые токи различных электроприемников и напряжение сети);
- не отключать установку при перегрузках (одновременном включении нескольких электродвигателей, групп ламп, пиках технологических нагрузок и т. п.);
- соответствовать требованиям селективности.

Программа позволяет в сетях до 1 кВ переменного тока выбирать групповые и вводные аппараты защиты групповых щитков исходя из параметров источника питания и нагрузки.

В качестве исходных данных в программе используются следующие сведения:

- 1) род тока и тип тока;
- 2) номинальное напряжение электроустановки;

- 3) расчетная мощность нагрузки;
- 4) наименование и тип аппарата защиты;
- 5) место установки (групповой или индивидуальный).

Заключение

Весь реализованный программный инструментарий может использоваться с целью планирования и нормирования потерь электроэнергии. Совместно с программами расчета надежности и оптимальных сроков замены и ремонта появляется возможность более точно оценить различные технические мероприятия повышения энергоэффективности предприятий с учетом различных влияющих факторов.

Литература

1. Моделирование параметров надежности электрооборудования на предприятиях железнодорожной отрасли / Т. В. Алферова [и др.] // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2014. – № 3 (15). – С. 56–65.
2. Маслович, С. Ф. Математическое моделирование параметров надежности и электропотребления / С. Ф. Маслович, В. Н. Галушко, С. И. Бахур // Проблемы физики, математики и техники. – 2014. – № 2 (19). – С. 77–84.
3. Галушко, В. Н. Надежность электроустановок и энергетических систем : учеб.-метод. пособие / В. Н. Галушко, С. Г. Додолев ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т транспорта. – Гомель : БелГУТ, 2014. – 154 с.
4. Москаленко, В. В. Электрический привод / В. В. Москаленко. – М. : Высш. шк., 1991. – 429 с.

Получено 15.12.14 г.