

Электротехника

УДК 621.365

ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПЛАСТИЧЕСКИХ МАСС

Л.С. Зимин, А.Г. Сорокин

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Проведен анализ методов моделирования электромагнитных и тепловых полей. С помощью метода конечных элементов, реализованного программно, смоделирована электротепловая модель системы индукционного нагрева для производства пластмассы методом литья и исследованы электромагнитные и тепловые поля. Приведены результаты расчета на численной модели. Представленная математическая модель системы индукционного нагрева может быть использована при проектировании технологических комплексов производства пластмассы. Предложена оригинальная система индукционного нагрева для производства пластмассы методом литья. Определены основные энергетические показатели и алгоритмы работы, которые обеспечивают требуемое температурное распределение в нагреваемом полимерном материале.

Ключевые слова: производство пластмассы, литьевая машина, электротепловая модель, методы моделирования, энергетические параметры.

За последнее время перспектива применения изделий из пластических масс очень возросла. Это наблюдается в автомобилестроении и при производстве электротехнической продукции. Производство большинства таких материалов является сложным технологическим процессом, который экономически целесообразен только при осуществлении его в промышленном масштабе. Высокая техническая сложность и значительные капиталовложения послужили стимулом для поиска способов повышения энергоэффективности процесса производства пластических масс.

Индукционный нагрев по сравнению с другими видами нагрева обеспечивает более высокую точность поддержания температуры нагрева и возможности полной автоматизации, а также, что не менее важно, более высокие санитарно-гигиенические условия и возможности проведения технологических процессов на более высоком уровне. Кроме этого при использовании индукционного нагрева имеется возможность получения избирательного и равномерного нагрева и существенно снижается пожарная опасность.

Лев Сергеевич Зимин (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Алексей Григорьевич Сорокин (к.т.н.), доцент кафедры «Теоретическая и общая электротехника».

Поэтому целесообразно для нагрева пластмассы использовать индукционный нагреватель, устанавливаемый непосредственно на литьевой машине (рис. 1).

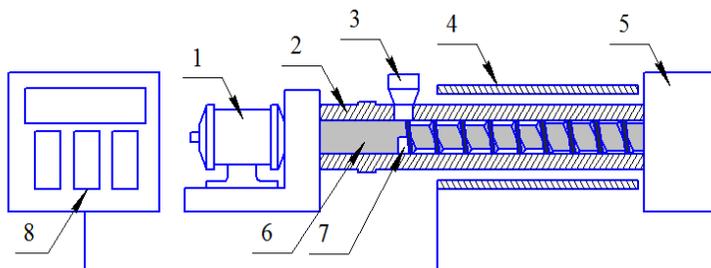


Рис. 1. Комплекс индукционного нагрева для производства пластмассы

Принцип работы заключается в следующем: двигатель (1) приводит во вращение шнек (6) с помощью которого осуществляется распределение исходного материала (7), поступившего из приемного бункера (3) по длине цилиндра (2) и через сопло выливается в пресс-форму штамповочного устройства (5). С помощью рабочей станции (8) осуществляется управление индуктором (4).

Установки индукционного нагрева предназначены для выполнения определенных технических операций и при их проектировании технологические требования являются определяющими. Задача проектирования это создание системы индукционного нагрева, которая обеспечивает данный технологический процесс с максимальным использованием возможности технологической линии и минимальные приведенные затраты, создает условия для наибольшей производительности труда обслуживающего персонала, соответствует правилам техники безопасности и правилам устройства и эксплуатации электроустановок.

При всем многообразии схем индукционного нагрева в данном случае выбрана схема, при которой индуктор (4) охватывает цилиндр пластикации (2), находящийся в нем исходный материал (7) и шнек (6). Аппарат прост в исполнении (рис. 2).

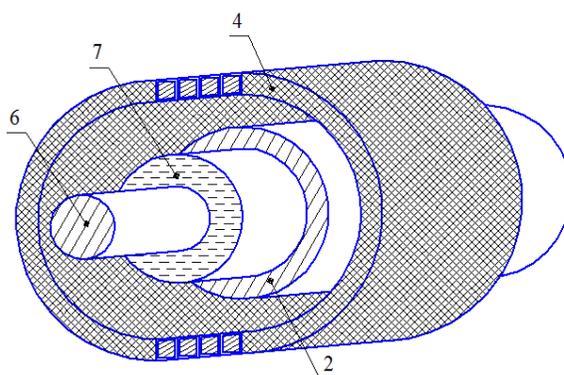


Рис. 2. Общий вид теплообменного аппарата

На основании этой электротепловой модели, которая учитывает соблюдение температурного режима, проводится анализ процессов теплообмена в системе «индуктор – металл – пластмассовая масса».

Эскиз такой модели показан на рис. 3. Такие модели дают исчерпывающую характеристику индукционного устройства с точки зрения потребления энергии от внешнего источника питания и выделения ее в нагрузку. Тепловой расчет проводят с целью определения технических данных установок (мощности, температуры, интенсивности теплоотдачи), которые обеспечивают технологические требования. Электрический расчет очень тесно связан с тепловым расчетом и состоит в выборе напряжения питания, рода тока, частоты, в определении геометрических параметров нагревателя, электрического к.п.д. и коэффициента мощности, разработке схемы управления и способа регулирования.

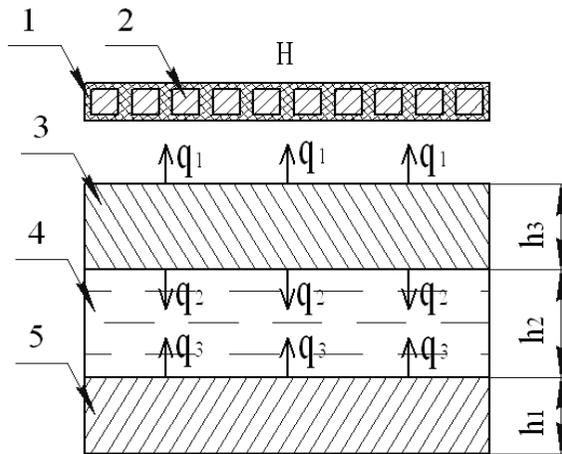


Рис. 3. Эскиз электротепловой модели :
 1 – изоляция витков индуктора; 2 – индуктор;
 3 – стенка цилиндра пластика; 4 – пластическая масса; 5 – шнек

С помощью программы, построенной на основе метода конечных элементов, составляется геометрическая модель системы, которая содержит все объекты, имеющие тепловой контакт.

Следующим шагом является задание условий теплообмена, величины плотности внутренних источников тепла и времени нагрева.

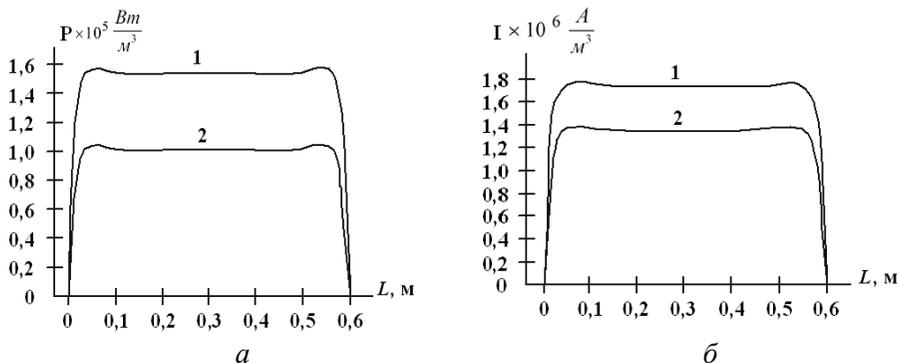


Рис. 4. Распределение удельной объемной мощности и тока по длине объекта:
 а – распределение удельной объемной мощности по длине цилиндра (кривая 1) и шнека (кривая 2);
 б – распределение плотности тока по длине цилиндра (кривая 1) и шнека (кривая 2)

В ходе моделирования получены решения электромагнитной задачи. Результаты расчета представлены на рис. 4: *а* – график распределения удельной объемной мощности по длине цилиндра (кривая 1) и шнека (кривая 2); *б* – график распределения плотности тока по длине цилиндра (кривая 1) и шнека (кривая 2).

Характер распределения удельной объемной мощности и тока по сечению объекта нагрева представлен на рис. 5.

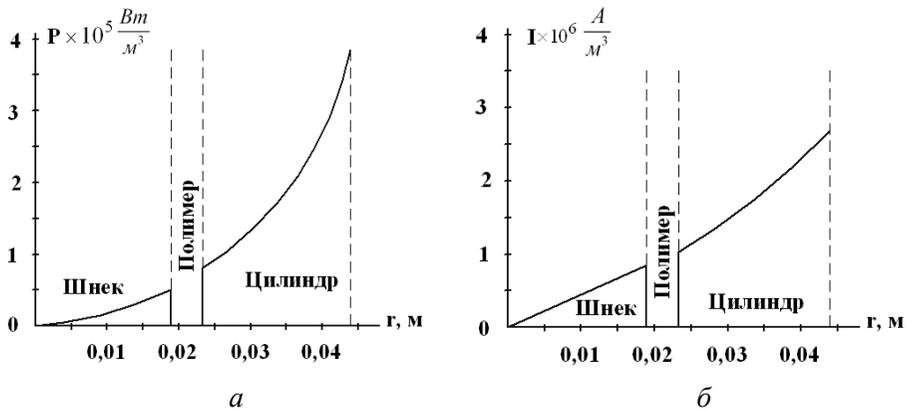


Рис. 5. Распределение удельной объемной мощности и тока по сечению объекта:
а – распределение удельной объемной мощности по радиусу объекта нагрева;
б – распределение плотности тока по радиусу объекта нагрева

Из представленных графиков, отчетливо наблюдается, что удельная объемная мощность по сечению максимальна на поверхности цилиндра и шнека, уменьшаясь по мере проникновения вглубь.

Алгоритм работы осуществляется следующим образом: производим разогрев балластного материала в течение 1800 с; затем его удаляем и производим уточненное догревание шнека до установленной температуры в течение 600 с;

Рабочий цикл состоит из последовательного нагрева трех порций сырья, время нагрева одной порции – 600 с, а после третьей порции происходит подогрев системы до заданной температуры.

Результаты расчета тепловой задачи на каждом из этапов представлены на рис. 6, 7.

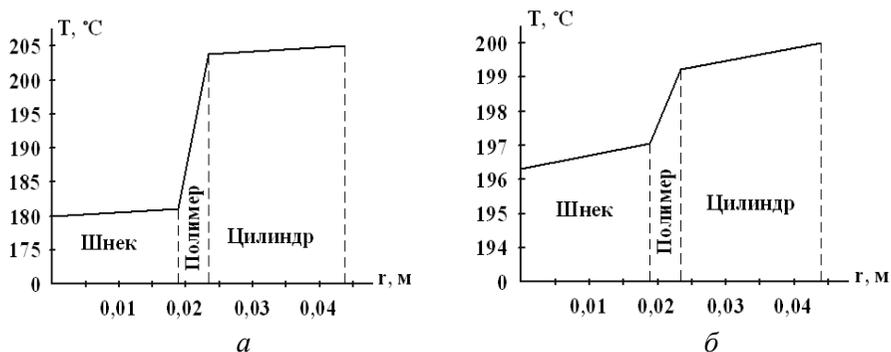


Рис. 6. Результаты расчета тепловой задачи:
а – температурное распределение на первом этапе нагрева;
б – температурное распределение на втором этапе

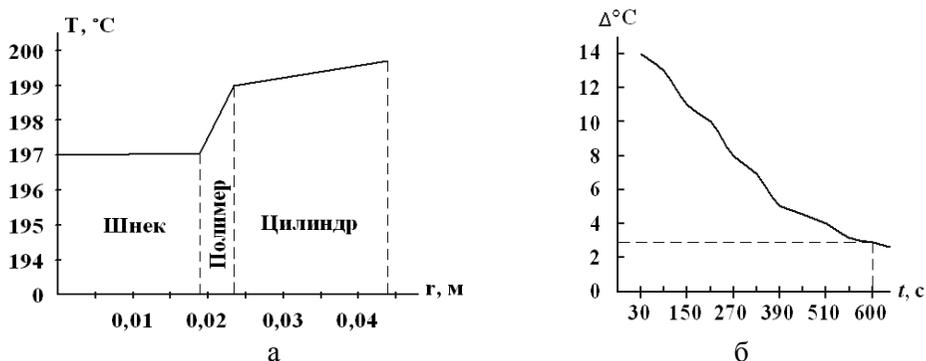


Рис. 7. Перепад температуры по времени нагрева:
a – температурное распределение на третьем этапе;
б – зависимость перепада температуры от времени нагрева

На основе анализа полученных решений определяем энергетические показатели, а именно частоту тока, к.п.д. и $\cos\varphi$ [4].

С увеличением частоты глубина ее проникновения уменьшается и поэтому регулируя частоту электромагнитных колебаний можно регулировать глубину проникновения. Поэтому при удачном выборе частоты можно осуществлять нагрев от цилиндра и шнека.

Зависимость электрического к.п.д. и коэффициента мощности от частоты представлена на рис. 8.

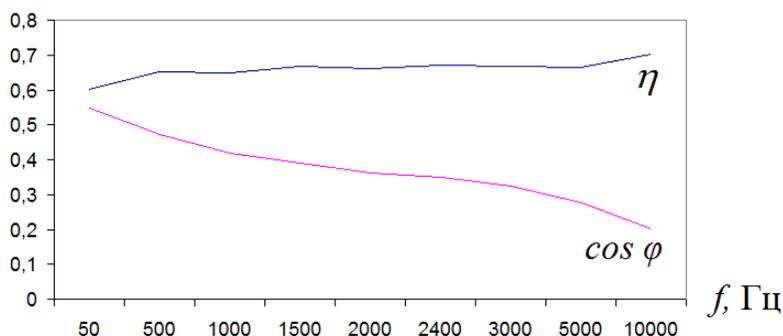


Рис. 8. Зависимость η и $\cos\varphi$ от частоты

Из приведенных зависимостей можно сделать вывод, что на частоте 50 Гц значения к.п.д. и коэффициента мощности являются оптимальными.

Поэтому, учитывая ряд конструктивных требований к индукционной системе, в частности минимизацию размеров индуктора и условия согласования параметров индуктора с источником питания, в качестве энергетических параметров следует выбрать частоту $f = 50$ Гц, $\eta = 0,602$, $\cos\varphi = 0,549$.

Проведенный поиск конструкции и алгоритма управления определил, что при нагреве до 600 °С наиболее рациональной является конструкция однослойного цилиндрического индуктора, который выполнен медным проводом ПОЖ 6,3×2. Число витков индуктора 110, полная мощность индуктора 20 кВт, напряжение 220 В, частота 50 Гц, внешний диаметр цилиндра 0,088 м, внутренний диаметр цилиндра 0,046 м, толщина стенки цилиндра 0,021 м, диаметр шнека 0,036 м, толщина слоя полимерного материала 0,005 м [5].

Определенные параметры и алгоритмы работы позволяют производить контроль температуры в изделии, а также учитывать влияние того или иного возмущающего воздействия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бернхардт Э. Переработка термопластичных материалов. – М.: Госхимиздат, 1962. – 747 с.
2. Слухоцкий А.Е., Немков В.С. Установки индукционного нагрева. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 328 с.
3. Шамов А.Н., Бодажков В.А. Проектирование и эксплуатация высокочастотных установок. – М.: Машиностроение, 1974. – С. 280.
4. Сорокин А.Г., Зимин Л.С. Частота тока индуктора при производстве пластмассы методом литья // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. – Вып. 1(29). – С. 166–169.
5. Сорокин А.Г., Горбачевский Н.И., Мифтахова Л.Х. Энергетические параметры индуктора для технологического комплекса производства пластмассы методом литья // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Вып. 1 (Т17). – С. 254–256.

Статья поступила в редакцию 6 сентября 2016 г.

INDUCTION HEATING BY PRODUCTION PLASTICS

L.S. Zimin, A.G. Sorokin

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russian Federation

The analysis of modeling methods of electromagnetic and thermal fields is carried out. By means of the finite-element method realized programmatically the electro thermal model of system of induction heating for plastic production is simulated by method of casting. Electromagnetic and thermal fields are studied. Results of calculation are given in numerical model. The provided mathematical model of system of induction heating can be used when designing technological complexes of plastic production. The original system of induction heating for plastic production is offered by a casting method. The main energy indicators and algorithms of work which provide required temperature distribution in the heated polymeric material are determined.

Keywords: plastic production, molding machine, electrothermal model, modeling methods, energy parameters.

*Lev S. Zimin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Aleksey G. Sorokin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

УДК 620.9.001.5

ВЫБОР МОЩНОСТИ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ УРОВНЕЙ ПОТЕРЬ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Ю.П. Кубарьков, К.А. Голубева, Я.В. Макаров

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Одной из основных задач в электрических сетях является задача оптимизации режима и сокращения потерь мощности. Для ее решения применяются статические конденсаторные батареи, мощность которых необходимо определять в каждом конкретном случае. Рассматривается оптимизация режима работы радиальной схемы электрической сети. Методом нелинейного программирования произведен расчет мощности компенсирующих устройств, которые устанавливаются в местах расположения нагрузок. Выполнен анализ потерь активной и реактивной мощности для линий электропередач (ЛЭП) и трансформаторов.

Ключевые слова: оптимизация, потери мощности, батареи статических конденсаторов, метод нелинейного программирования.

Введение

Оптимизацией называется задача, которая выявляет оптимальный процесс из ряда других по критерию оптимальности.

Общую задачу управления режимами электроэнергетической системы подразделяют на составляющие – а именно отдельные системы управления.

Управление режимами энергосистемы – это сложная комплексная задача, решаемая в среде постоянно меняющихся нагрузок. Уменьшение потерь мощности при управлении режимами работы электроэнергетической системы – одна из главных целей оптимизации.

При оптимизации решают следующие задачи:

- определяют оптимальную стратегию развития энергосистемы (ее проектирование или реконструкция) и отдельных объектов (выбор места расположения, мощности, установка сроков введения в работу новых электростанций, линий электропередач, подстанций);
- выбирают наилучшую конфигурацию электрической сети;
- распределяют нагрузки между отдельными электростанциями;
- выбирают стратегию, обеспечивающую лучшее использование материальных ресурсов (виды топлива и т. д.).

Во время оптимизации в результате возможности изменения параметров режима производят выбор таких значений параметров, которые обеспечивают меньшие общие потери активной мощности в сети или меньший общий расход условного топлива.

С целью оптимизации режима работы и снижения потерь мощности возможно использование батарей статических конденсаторов (БСК). БСК обеспе-

Юрий Петрович Кубарьков (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электрические станции».

Ярослав Викторович Макаров, аспирант.

Кристина Анатольевна Голубева, аспирант.

чивают поддержку параметров качества электроэнергии за счет уменьшения потерь в электрических сетях и увеличения величины напряжения на шинах потребителей [1, 2, 3].

Достоинствами конденсатора в качестве компенсатора реактивной мощности являются небольшие потери активной мощности (в диапазоне 0,3–0,4 % Вт/вар) и удобство в обслуживании. Недостатком можно считать отсутствие возможности плавного регулирования реактивного сопротивления, так как коммутация позволяет давать лишь ступенчатое изменение общей емкости. Однако этот недостаток может быть устранен применением тиристорной системы управления.

При любом допустимом режиме должны обеспечиваться условия качества электрической энергии и надежности электроснабжения. При расчете допустимого режима условия надежности и качества учитывают по типу ограничений (равенств и неравенств) на контролируемые параметры режима.

Существует много методов оптимизации расчетов режима в энергосистеме [4]. В данной работе рассматривается метод нелинейного программирования.

Метод нелинейного программирования

Общим для различных методов нелинейного программирования является то, что целевая функция – нелинейная. В свою очередь, налагаемые ограничения возможны и линейные, и нелинейные.

Задачу нелинейного программирования можно сформулировать так: необходимо произвести минимизацию целевой функции $\psi(x_1, x_2, \dots, x_n)$ при наличии линейных или нелинейных ограничений в виде равенств $f_i(x) = 0$ или неравенств $q_j(x) \leq 0$.

Методы нелинейного программирования различны. При выборе нужного метода необходимо иметь в виду следующие факторы: надежность отыскания оптимума, скорость его достижения, удобство подготовки начальных данных, возможность учета ограничивающих параметров, наличие имеющихся алгоритмов и программ для использования метода на компьютере.

Исследования и расчеты

В качестве примера применения метода нелинейного программирования была рассмотрена радиальная схема электрической сети (рис. 1). Электрическая сеть состоит из 7 подстанций с трансформаторами Т1-Т7, мощность которых отмечена на рисунке, и 14 линий электропередач (W1-W14).

Марка и длина каждой линии электропередач указаны на рисунке. Нагрузки подстанций (N1-N7) приведены в таблице.

Нагрузки потребителей

| № узла | 4 (N1) | 7 (N2) | 10 (N3) | 13 (N4) | 16 (N5) | 19 (N6) | 22 (N7) |
|---------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| P, кВт | 150 | 250 | 250 | 70 | 65 | 80 | 160 |
| Q, квар | 80 | 130 | 130 | 40 | 35 | 45 | 72 |

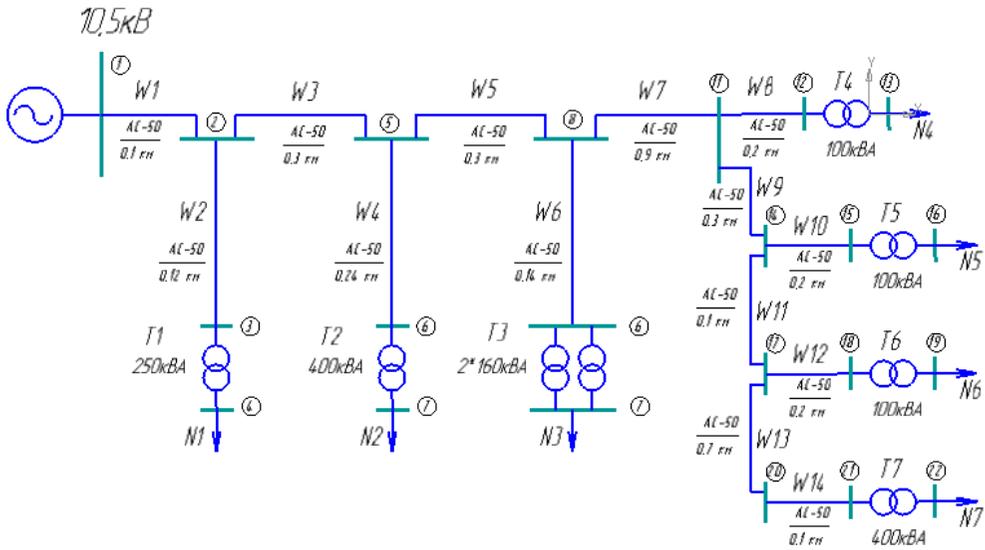


Рис. 1. Схема электрической сети

В местах расположения нагрузок предполагается установка компенсирующих устройств БСК1-БСК7, расчет мощности которых осуществляется методом нелинейного программирования. Для этого рассмотрим участок цепи, состоящий из линий электропередач W13–W14 (узлы 17→20→21→22) и нагрузки N7. Целевая функция в этом случае будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\Sigma} = & \Delta P_{W1} + \Delta P_{W2} + \Delta P_{W3} + \Delta P_{W4} + \Delta P_{W5} + \Delta P_{W6} + \Delta P_{W7} + \\ & + \Delta P_{W8} + \Delta P_{W9} + \Delta P_{W10} + \Delta P_{W11} + \Delta P_{W12} + \Delta P_{W13} + \Delta P_{W14} + \\ & \Delta P_{T1} + \Delta P_{T2} + \Delta P_{T3} + \Delta P_{T4} + \Delta P_{T5} + \Delta P_{T6} + \Delta P_{T7}. \end{aligned} \quad (1)$$

Потери мощности в трансформаторе T7:

$$\Delta P_{T7} = \frac{P_{N7}^2 + (Q_{N7} - Q_{БСК7})^2}{U^2} \cdot R_{T7}. \quad (2)$$

Тогда мощность перед трансформатором T7 будет составлять:

$$P_{T7} = P_{N7} + \Delta P_{T7}. \quad (3)$$

Потери мощности в линии W14:

$$\Delta P_{W14} = \frac{P_{T7}^2 + (Q_{N7} - Q_{БСК7})^2}{U^2} \cdot R_{W14}. \quad (4)$$

Мощность в начале линии W14:

$$P_{W14} = P_{T7} + \Delta P_{W14}. \quad (5)$$

Аналогичным образом рассчитываем потери и мощность в начале линии W13:

$$\Delta P_{W13} = \frac{P_{W14}^2 + (Q_{W14} - Q_{БСК7})^2}{U^2} \cdot R_{W13}. \quad (6)$$

Подставляя полученные выражения в целевую функцию, получим:

$$P_{W13} = P_{N7} + \frac{P_{N7}^2 + (Q_{N7} - Q_{БСК7})^2}{U^2} \cdot R_{T7} + \frac{P_{T7}^2 + (Q_{N7} - Q_{БСК7})^2}{U^2} \cdot R_{W14} + \frac{P_{W14}^2 + (Q_{W14} - Q_{БСК7})^2}{U^2} \cdot R_{W13}. \quad (7)$$

Продифференцировав целевую функцию по величине $Q_{БСК7}$, имеем:

$$-2(Q_{N7} - Q_{БСК7}) \cdot R_{T7} - 2(Q_{T7} - Q_{БСК7}) \cdot R_{W14} - (Q_{W14} - Q_{БСК7}) \cdot R_{W13} = 0; \quad (8)$$

$$-Q_{N7} \cdot R_{T7} - Q_{T7} \cdot R_{W14} - Q_{W14} \cdot R_{W13} + Q_{БСК7} (R_{T7} + R_{W14} + R_{W13}) = 0. \quad (9)$$

Упрощая, получим выражение для определения мощности БСК7:

$$Q_{БСК7} = \frac{Q_{N7} \cdot R_{T7} - Q_{T7} \cdot R_{W14} - Q_{W14} \cdot R_{W13}}{R_{T7} + R_{W14} + R_{W13}}; \quad (10)$$

$$Q_{БСК7} = \frac{170 \cdot 3,38 + 199 \cdot 0,065 + 200 \cdot 0,455}{3,38 + 0,065 + 0,455} = 174 \text{ Мвар}. \quad (11)$$

Расчетная мощность БСК7 ($Q_{БСК7}$) была скорректирована под стандартный номинал выпускаемого оборудования до 175 Мвар.

Далее аналогичным образом производится расчет для остальных участков сети с нагрузками N1-N6 для определения мощностей БСК1-БСК6.

С установкой БСК уровни напряжений на шинах потребителей повысились. Это видно из графика напряжений в узлах подключения нагрузки на рис. 2.

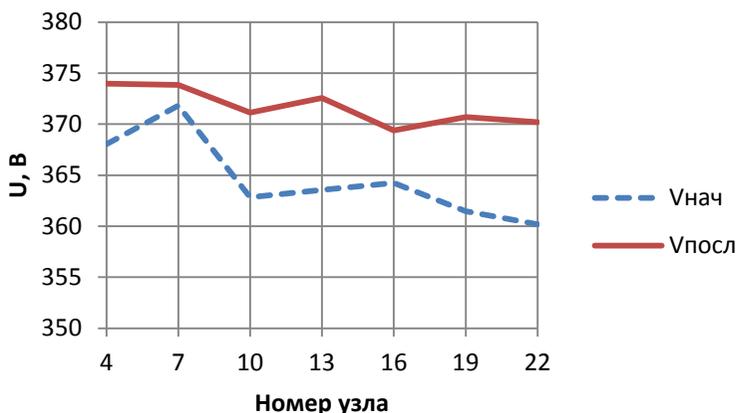


Рис. 2. График напряжений в узлах подключения нагрузки

Далее был проведен анализ потерь активной и реактивной мощности для линий электропередач (ЛЭП) и трансформаторов [5, 6].

Результаты анализа представлены на графиках (рис. 3).

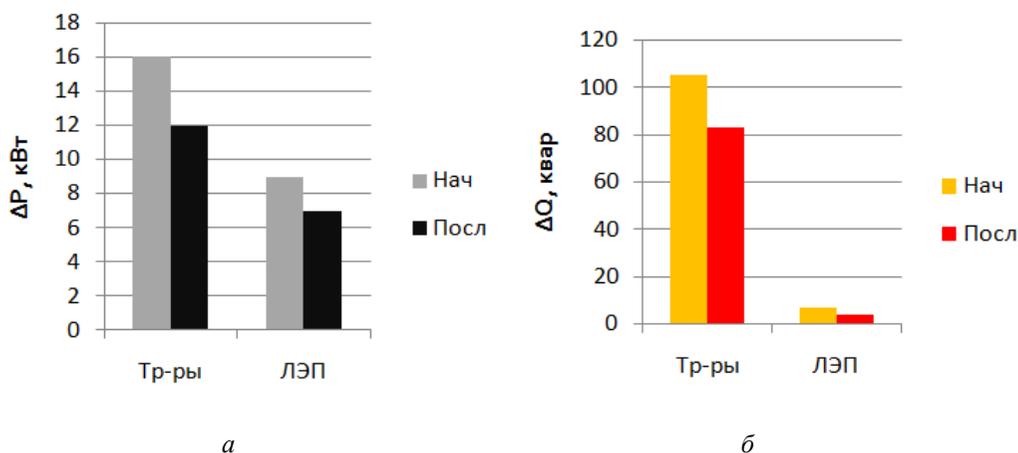


Рис. 3. Графики суммарных потерь мощностей для ЛЭП и трансформаторов: *а* – активной; *б* – реактивной

Выводы

Для радиальной распределительной сети методом нелинейного программирования были рассчитаны мощности БСК для их распределенной установки вблизи потребителей. Анализ полученных результатов показал увеличение уровня напряжения на шинах низкого напряжения подстанций и сокращение уровня потерь активной и реактивной мощностей во всей сети.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Jahani R., Shafighi Malekshah A., Chahkandi Nejad H.* Applying a new advanced intelligent algorithm for optimal distributed generation location and sizing in radial distribution systems. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2011; 5(5): 642–649.
2. Методы моделирования и оптимизации в задачах электроэнергетики: учеб. пособие / Сост. Л.А. Гурина. – Благовещенск, 2012. – 91 с.
3. *Abdolreza Sadighmanesh, Kazem Zare, Mehran Sabahi.* Distributed Generation unit and Capacitor Placement for Loss Voltage profile and ATC Optimization. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2012; 2(6): 774–780.
4. *Кубарьков Ю.П., Голубева К.А.* Управление уровнем напряжения и потерь в электрических сетях с активно-адаптивными элементами // *Электроэнергетика глазами молодежи: труды VI международной научно-технической конференции, 9–13 ноября 2015, Иваново.* – В 2 т.
5. *Borges C.L.T., Falcao D.M.* Impact of Distributed Generation Allocation and Sizing on Reliability, Losses, and Voltage Profile. *IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*. Bologna. 2013.
6. *Araujo W.J., Ekel P.Ya., Filho R.P.F., Kokshenev I.V. and Schuffner H.S.* (2011) Monocriteria and Multicriteria Based Placement of Reactive Power Sources in Distribution Systems. *International Journal of Applied Mathematics and Informatics*, 5, 240–248.

Статья поступила в редакцию 29 сентября 2016 г.

POWER SELECTION OF COMPENSATING DEVICES TO OPTIMIZE THE LEVEL OF LOSSES IN THE ELECTRIC NETWORK

Y.P. Kubarkov, K.A. Golubeva, Y.V. Makarov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russian Federation

One of the main tasks in electrical networks is the task of mode optimization and power loss reduction. For these purpose static capacitor batteries are used the power of which must be determined in each particular case.

This paper discusses optimization of the operating mode of the radial design of the electrical network. The calculation method of the nonlinear programming produces power compensation devices, which are installed in the locations of load. The analysis of active and reactive power losses for transmission lines (PTL) and transformers is made.

Keywords: optimization, power loss, capacitor banks, non-linear programming method.

*Yury P. Kubarkov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Yaroslav V. Makarov, Postgraduate Student.
Kristina A. Golubeva, Postgraduate Student*

УДК 621.31

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ЛИКВИДАЦИИ НЕДОПУСТИМЫХ ТОКОВЫХ ПЕРЕГРУЗОК СЕТЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В КРУПНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

В.В. Петров, В.И. Полищук, А.А. Альмендеев

¹ Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

² Филиал АО «СО ЕЭС» – «Самарское РДУ»
Россия, 443100, г. Самара, ул. Полевая, 5

В процессе управления режимом энергосистемы нередко ситуации, связанные с недопустимыми перегрузками сетевых элементов, которые являются причиной выхода из строя оборудования и могут привести к каскадному развитию аварийного процесса в энергосистеме. Ввиду этого данные перегрузки ликвидируются оперативным персоналом электрических сетей различными способами, в том числе и путем отключения потребителей. В работе предложена методика ликвидации перегрузки сетевых элементов за счет использования регулирующего эффекта нагрузки, исключая или снижающая объемы вводимых ограничений. В ПК Mathcad для смоделированной энергосистемы произведены расчеты по предложенной методике, в результате которых достигнуто снижение загрузки системной связи.

Ключевые слова: *энергосистема, статические характеристики нагрузки, напряжение, оптимизация.*

Введение

В электроэнергетике различают два вида энергосистем: избыточные, где выработка электроэнергии значительно превышает ее потребление, и дефицитные, которые постоянно испытывают недостаток генерирующих мощностей. К дефицитным энергосистемам относятся энергосистемы крупных городов и промышленных объединений с энергоемким производством. Для снижения дефицита в таких энергосистемах необходимо вводить дополнительные мощности, что зачастую экономически не оправдано. Другим вариантом является строительство новых и техническая модернизация существующих электрических сетей, предназначенных для передачи мощности от избыточных районов с дешевой генерацией в дефицитные энергосистемы. Поэтому при высоком развитии электрических сетей задача снижения дефицита активной мощности в энергосистеме преобразуется в задачу обеспечения достаточной пропускной способности линий электропередач, осуществляющих связь дефицитной энергосистемы с единой энергосистемой. В результате различных техногенных и природных событий пропускная способность данных высоковольтных линий может оказаться недостаточной для покрытия дефицита активной мощности, вследствие чего оперативным персоналом электрических сетей принимаются меры по снижению дефицита активной мощности в энергосистеме. Такими мерами являются загрузка резервных мощностей дефицитной энергосистемы, изменение топологии сети. В случае их не-

Вячеслав Валерьевич Петров, аспирант.

Владимир Иосифович Полищук (к.т.н., доц.), заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий».

Андрей Аркадьевич Альмендеев (к.т.н.), диспетчер.

достаточной эффективности производится ввод графиков аварийных ограничений, что приводит к обесточиванию потребителей энергосистемы [1–4].

Целью данной работы является поиск альтернативных способов разгрузки сетевых элементов дефицитной энергосистемы, которые позволят минимизировать ввод аварийных ограничений или полностью их избежать.

Постановка задачи

Была рассмотрена теоретическая энергосистема (рис. 1), состоящая из четырех узлов с номинальным напряжением 110 кВ, двух узлов напряжением 220 кВ, пяти ветвей 110 кВ, одной ветви 220 кВ и одной трансформаторной ветви с номинальным коэффициентом трансформации $k_{mp} = 2$ (табл. 1). Узел № 4 является балансирующим по реактивной мощности, узел № 6 – балансирующим по активной и реактивной мощности, узел № 2 – узлом-генератором активной и реактивной мощности, узлы № 1, 3, 4, 5 – узлами нагрузки. Ветвь между узлами № 6 и № 5 моделирует связь изолированной энергосистемы с внешней энергосистемой.

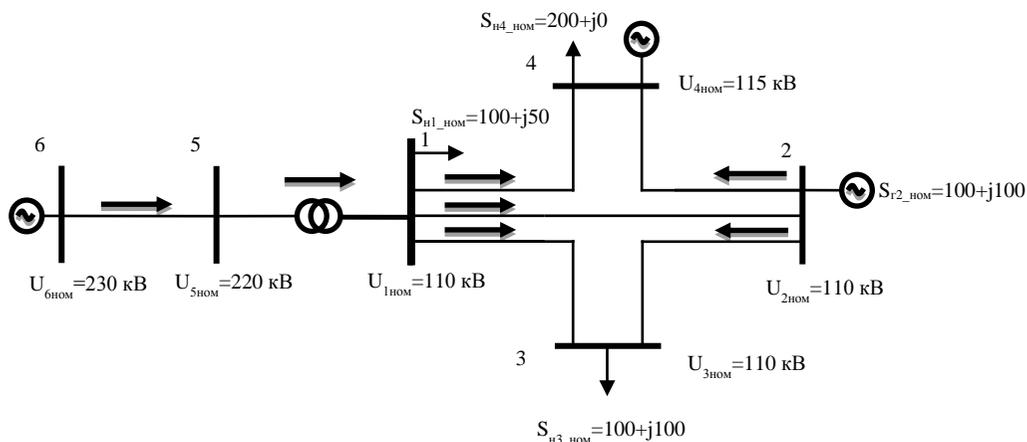


Рис. 1. Принципиальная схема рассматриваемой сети

Таблица 1

Исходные параметры узлов

| № | P_G , МВт | Q_G , МВАр | $U_{зд}$, кВ | $P_{ном}$, МВт | $Q_{ном}$, МВАр |
|---|-------------|--------------|---------------|-----------------|------------------|
| 1 | – | – | – | 100,0 | 50 |
| 2 | 100,0 | 100,0 | – | – | – |
| 3 | – | – | – | 100,0 | 100,0 |
| 4 | – | – | 115,0 | 200,0 | – |
| 5 | – | – | – | – | – |
| 6 | – | – | 230,0 | – | – |

Как видно, при увеличении дефицита мощности в рассматриваемой энергосистеме переток по линии 6–5 также увеличится и при значительном дефиците ее токовая загрузка превысит свое длительно допустимое значение. Таким образом, задача сводится к уменьшению значения тока, протекающего по линии 6–5.

Методы и средства

Суть предлагаемого метода противоаварийного управления, который позволит снизить токовую загрузку системообразующего элемента, заключается в использовании регулирующего эффекта нагрузки, обусловленного ее статическими характеристиками по напряжению [5]:

$$P(U) = P_{ном} \left[0,83 - 0,3 \left(\frac{U}{U_{ном}} \right) + 0,47 \left(\frac{U}{U_{ном}} \right)^2 \right]; \quad (1)$$

$$Q(U) = Q_{ном} \left[3,7 - 7 \left(\frac{U}{U_{ном}} \right) + 4,3 \left(\frac{U}{U_{ном}} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где $P_{ном}$ – номинальная активная мощность нагрузки;

$P(U)$ – расчетная активная мощность нагрузки;

$Q_{ном}$ – номинальная реактивная мощность нагрузки;

$Q(U)$ – расчетная реактивная мощность нагрузки;

$U_{ном}$ – номинальное напряжение узла;

U – расчетное напряжение в узле.

Как видно из (1) и (2), активная и реактивная мощность комплексных узлов нагрузки прямо пропорциональна напряжению, поэтому снижение напряжения приведет к снижению потребляемой активной и реактивной мощности в узлах, что обусловит уменьшение перетока мощности в систему. Однако при изменении напряжения происходит перераспределение перетоков активной и реактивной мощности, что может привести к недопустимым перегрузкам сетевых элементов рассматриваемой энергосистемы. Поэтому в процессе поиска необходимых значений напряжений нужно учесть ограничения по значению тока, протекающего в сетевых элементах:

$$I_{i,jy} < I_{i,jmax}.$$

Также в качестве ограничения выступает значение напряжения контрольных пунктов, которые определяются исходя из условий статической и динамической устойчивости:

$$U_{nmin} < U_{ny} < U_{nmax}.$$

Целевой функцией данной оптимизационной задачи является минимум потребляемой полной мощности энергосистемы:

$$H = S_{\text{ЭЭС}_y}(U) \rightarrow \min, \quad (3)$$

где $S_{\text{ЭЭС}_y}(U)$ – мощность энергосистемы в установившемся режиме.

Решение задачи оптимизации осуществлено в программном комплексе Mathcad с помощью метода приведенного градиента. После каждого шага оптимизации производится пересчет электрического режима по методу Ньютона [6].

Алгоритм решения:

1. Расчет электрического режима методом Ньютона.

1.1. Формирование матрицы уравнений небалансов мощностей для каждого узла:

$$W(X) = 0; \quad (4)$$

$$X = \begin{pmatrix} \delta \\ U \end{pmatrix} W(X) = \begin{pmatrix} w_P(x) \\ w_Q(x) \end{pmatrix}; \quad (5)$$

$$w_{P_k} = P_k - g_{k,k}U_k^2 - U_k \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{n+1} U_j (g_{k,j} \cos \delta_{k,j} - b_{k,j} \sin \delta_{k,j}); \quad (6)$$

$$w_{Q_k} = Q_k - b_{k,k}U_k^2 - U_k \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{n+1} U_j (b_{k,j} \cos \delta_{k,j} - g_{k,j} \sin \delta_{k,j}); \quad (7)$$

где X – вектор-столбец искоемых переменных;
 $W(X)$ – система уравнений балансов мощностей для каждого узла;
 δ – угол отклонения между фазами напряжений;
 U – напряжение в узле;
 $w_P(x), w_Q(x)$ – уравнения небаланса активной и реактивной мощности узла;
 P, Q – активные и реактивные мощности узла;
 g, b – активная и реактивная проводимости ветви;
 k, j – номера узлов.

1.2. Выбор начальных приближений для искоемых переменных.

Для нулевого шага итерации $\delta_k^0 = 0, U_k^0 = U_{ном}$. Для последующих шагов в качестве начальных приближений используются значения, полученные в результате решения системы уравнений методом Гаусса в п. 1.4. Значение напряжений узлов-генераторов является неизменным.

1.3. Формирование матрицы Якоби:

$$\frac{\partial W}{\partial X} = \begin{pmatrix} \frac{\partial W_P}{\partial U} & \frac{\partial W_P}{\partial \delta} \\ \frac{\partial W_Q}{\partial U} & \frac{\partial W_Q}{\partial \delta} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где $\frac{\partial W_P}{\partial U}, \frac{\partial W_Q}{\partial U}$ – частные производные небаланса активной и реактивной мощности соответственно по модулю напряжения узла;

$\frac{\partial W_P}{\partial \delta}, \frac{\partial W_Q}{\partial \delta}$ – частные производные небаланса активной и реактивной мощности соответственно по фазе напряжения узла.

1.4. Определение неизвестных переменных методом Гаусса:

$$X^{(i+1)} = X^i - \left\| \frac{\partial W}{\partial X} (X^i) \right\|^{-1} W(X^i), \quad (9)$$

где i – шаг итерации.

Результатом выполнения данного подцикла являются новые значения напряжений и углов отклонений фаз напряжений в соответствии с выбранными на шаге 1.2 приближениями. Поэтому для расчета электрического режима с за-

данной точностью необходимо повторить пункты 1.2–1.4 вплоть до достижения допустимой погрешности расчета.

1.5. Определение токовой нагрузки ветвей схемы.

Исходя из результатов, полученных на предыдущем шаге, производится расчет токовой нагрузки ветвей схемы. Это необходимо для контроля выполнения установленных ограничений в полученном электрическом режиме.

2. Формирование целевой функции:

$$I[X'(Y'), Y'], \quad (10)$$

где X' – вектор зависимых переменных: U, δ узлов нагрузки;

Y' – вектор независимых переменных: U, δ узлов-генераторов.

3. Проверка выполнения заданных ограничений:

$$U_{\min} < U_n < U_{\max};$$

$$I_{i,j} < I_{\max i,j},$$

где $U_{n\min}$ – минимально допустимое значение напряжения в контрольном пункте;

$U_{n\max}$ – максимально допустимое значение напряжения в контрольном пункте;

U_{ny} – установившееся значение напряжения в контрольном пункте;

$I_{i,j}$ – ток, протекающий по сетевому элементу в установившемся режиме;

$I_{i,j\max}$ – длительно допустимый ток сетевого элемента.

4. Определение градиента неявной функции:

$$\frac{\partial I}{\partial Y'} = \frac{\partial I}{\partial Y'} \Big|_0 + \frac{\partial I}{\partial W} \cdot \frac{\partial W}{\partial Y'}, \quad (11)$$

где $\frac{\partial I}{\partial Y'}$ – градиент неявной функции по вектору независимых переменных;

$\frac{\partial I}{\partial Y'} \Big|_0$ – вектор, определяемый из явной зависимости $I(Y')$;

$\frac{\partial W}{\partial Y'}$ – матрица частных производных $\frac{\partial w_{Pk}}{\partial Y'_j}, \frac{\partial w_{Qk}}{\partial Y'_j}$, определяемых из яв-

ных зависимостей $w_{Pk}(Y'), w_{Qk}(Y')$;

$\frac{\partial I}{\partial W} = \left(\frac{\partial I}{\partial W_P} \quad \frac{\partial I}{\partial W_Q} \right)$ – вектор-строка частных производных, причем $\frac{\partial I}{\partial W}$

определяется из следующего выражения:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial W_P}{\partial U} & \frac{\partial W_P}{\partial \delta} \\ \frac{\partial W_Q}{\partial U} & \frac{\partial W_Q}{\partial \delta} \end{pmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial I}{\partial W_P} \\ \frac{\partial I}{\partial W_Q} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \frac{\partial I}{\partial U} \\ \frac{\partial I}{\partial \delta} \end{pmatrix}. \quad (12)$$

5. Определение независимых переменных

$$Y^{i1} = Y^{i0} - \frac{\partial I}{\partial Y'} \cdot t_0, \quad (13)$$

где Y^i – значение вектора независимых переменных на шаге итерации i .

6. Определение зависимых переменных с помощью расчета электрического режима методом Ньютона в соответствии с п. 1.2–1.4. При оптимизации по напряжению в результате выполнения данного шага получаются новые значения напряжений узлов-генераторов.

7. Для оптимизации электрического режима с заданной точностью необходимо повторить выполнение п. 3–5 вплоть до достижения допустимой погрешности расчетов.

В качестве оптимизируемых переменных выбраны коэффициент трансформации k_{mp} и напряжение в узле, балансирующем по реактивной мощности, № 4. В качестве ограничений значения токов и напряжений сетевых элементов и контрольных пунктов изолированной энергосистемы:

$$95\text{кВ} < U_i < 126\text{кВ};$$

$$I_{i,j} < 750\text{А}.$$

В результате выполнения операций пункта 1 приведенного выше алгоритма были получены следующие данные (табл. 2).

Таблица 2

Параметры узлов в исходном режиме $k_{mp} = 2$

| № | P_G , МВт | Q_G , МВАр | P_H , МВт | Q_H , МВАр | U , кВ |
|---|-------------|--------------|-------------|--------------|----------|
| 1 | – | – | 102,55 | 53,43 | 114,27 |
| 2 | 100,0 | 100,0 | – | – | 115,34 |
| 3 | – | – | 101,21 | 103,14 | 112,05 |
| 4 | – | 132,28 | 206,01 | – | 115 |
| 5 | – | – | – | – | 228,45 |
| 6 | 316,2 | 20,42 | – | – | 230 |

Исходя из данных табл. 2 установлено, что по системной связи 6–5 протекает ток 798 А, что превышает длительно допустимый ток по условиям задачи. Для ликвидации данной перегрузки была проведена оптимизация электрического режима путем выполнения пунктов 2–6 алгоритма с целью снижения потребления мощности изолированной энергосистемы. В результате получены следующие данные (табл. 3).

Таблица 3

Токовая загрузка линий в исходном режиме

| | | | | | | |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| № н | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 6 |
| № к | 2 | 3 | 4 | 3 | 4 | 5 |
| I, А | 499 | 456 | 540 | 311 | 609 | 798 |

Таблица 4

Номинальные и установившиеся параметры узлов в оптимизированном режиме

| № | $P_{Гу}$, МВт | $Q_{Гу}$, МВАр | $P_{ну}$, МВт | $Q_{ну}$, МВАр | U_y , кВ |
|---|----------------|-----------------|----------------|-----------------|------------|
| 1 | – | – | 93,17 | 43,59 | 97,17 |
| 2 | 100,0 | 100,0 | – | – | 98,39 |
| 3 | – | – | 92,14 | 86,17 | 94,98 |
| 4 | – | 103,03 | 186,97 | – | 97,81 |
| 5 | – | – | – | – | 228,74 |
| 6 | 278,6 | 5,2 | – | – | 230 |

Таблица 5

Токовая нагрузка линий в оптимизированном режиме

| | | | | | | |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| № н | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 6 |
| № к | 2 | 3 | 4 | 3 | 4 | 5 |
| I, А | 520 | 469 | 547 | 321 | 640 | 701 |

Как видно, в результате решения задачи оптимизации были получены новые значения напряжений в контрольных пунктах энергосистемы и коэффициента трансформации, при которых обеспечивается минимум потребления активной и реактивной мощности в энергосистеме при соблюдении заданных ограничений. Новое значение токовой нагрузки линии 6–5 составляет 701 А. Данный режим достигается при коэффициенте трансформации $k_{mp} = 2,37$ и напряжении в узле, балансирующем по реактивной мощности, $U_4 = 97,81$ кВ.

Выводы

Таким образом, в данной работе отображена эффективность применения снижения напряжения в энергосистеме как противоаварийного мероприятия по разгрузке сетевых элементов. Было достигнуто снижение значения протекающего по системообразующей линии тока на 97 А за счет снижения потребления мощности изолированной энергосистемы, что позволило ликвидировать недопустимую перегрузку системной связи без использования методов противоаварийного управления, связанных с отключением потребителей. Полученные результаты полностью согласуются с результатами прошлых исследований, выполненных другими методами [7] и с применением других программных комплексов, что подтверждает возможность применения данного способа противоаварийного управления на практике.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СТО 59012820.29.240.008-2008 Стандарт организации ОАО «СО ЕЭС» // Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем. Условия организации процесса. Условия создания объекта. Нормы и требования. – М.: [б.н.], 2008.

2. СТО 59012820.27.010.001-2013 Стандарт организации ОАО «СО ЕЭС» // Правила определения максимально допустимых и аварийно допустимых перетоков активной мощности в контролируемых сечениях диспетчерского центра ОАО «СО ЕЭС». – М.: [б.н.], 2013.
3. РД 34.20.577 Нормативные документы // Методические указания по определению устойчивости энергосистем. – 1977.
4. Методические указания // Методические указания по устойчивости энергосистем. – М.: НЦ ЭНАС, 2004.
5. *Идельчик В.И.* Электрические системы и сети. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
6. Инструкция по использованию ПК RastrWin 3.0. – 2014.
7. *Петров В.В., Альмендеев А.А., Котенев В.И.* Использование статических характеристик крупных узлов нагрузки при ликвидации аварийных режимов энергосистем // Оперативное управление в электроэнергетике. – 2016. – № 2. – С. 42–46.

Статья поступила в редакцию 30 сентября 2016 г.

IMPROVEMENT OF METHODS FOR THE ELIMINATION OF UNACCEPTABLE CURRENT OVERLOAD OF NETWORK ELEMENTS IN LARGE POWER SYSTEMS.

V.V. Petrov¹, V.I. Polishhuk¹, A.A. Almendeev²

¹ Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russian Federation

² Branch of «SO UPS» – «Samara RDO»
5, Polevaja str., Samara, 443100, Russian Federation

In the process of control power system there are frequent situation associated with inadmissible overload of electrical network elements resulted in the equipment failure and cascade development of emergency process in the power system. This overload is eliminated by the operational personnel of electrical networks in a variety of ways including load shedding. In this paper the technique of overloading elimination of electrical network elements using the regulating load effect of eliminating or reducing the volume energy consumption constraint is proposed. In the PC Mathcad for simulated power system the calculations on the proposed method are given resulted in download system reduction of communication.

Keywords: *power system, static characteristics of the load nodes, voltage, optimization.*

*Vyacheslav V. Petrov, Postgraduate Student.
Vladimir I. Polishhuk (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Andrey A. Almendeev (Ph.D. (Techn.)), Dispatcher.*

УДК 621.311:519.2

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ АППРОКСИМАЦИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СУТОЧНОГО ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ**Р.Н. Хамитов¹, А.С. Грицай¹, И.В. Червенчук¹, Г.Э. Сеницин²**¹ ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет»
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11² ООО «Омская энергосбытовая компания»
Россия, 644123, г. Омск, пр. Карла Маркса, 41/15

Актуальность работы обусловлена спросом субъектов оптового рынка электроэнергии и мощности (ОРЭМ) на способы построения краткосрочных прогнозов электропотребления с целью повышения качества и точности прогностической модели. Рассматривается метод аппроксимации суточного графика электропотребления с использованием синусоидальной функции аппроксимации в отдельности для дневного и ночного циклов электропотребления. Анализируется возможность применения одного из известных методов аппроксимации для сглаживания точек соединения синусоидальных функций, описывающих ночной и дневной циклы электропотребления. Предложенный способ применим для субъектов ОРЭМ с целью аппроксимации ретроспективных данных электропотребления, подбора коэффициентов аппроксимирующей функции – периода и амплитуды для осуществления возможности ее продления на интервал до 24 часов. В настоящее время существует большое количество методов для построения краткосрочных прогнозов, основанных на статистических и фактографических, экспертных и многофакторных моделях, однако они не всегда практически применимы, поскольку большая часть потребителей не осуществляет передачу почасовых данных электропотребления; при этом энергосбытовая компания оперирует данными системного оператора (АО «Системный оператор Единой энергетической системы»), которые используют ограниченный набор параметров. Предлагаемый метод прогноза может быть применен не только энергосбытовой компанией, но и промышленным предприятием, где дневной и ночной циклы электропотребления имеют четко выраженные отличия. При этом необходимо подобрать параметры аппроксимирующей функции предложенным способом. Для построения расчетной модели использовалась аналитическая система Rapidminer. Представленные результаты были получены с использованием ретроспективных данных электропотребления ООО «Омская энергосбытовая компания», где значительную долю – 75 % объема электропотребления – составляют юридические лица и 25 % – физические потребители.

Ключевые слова: анализ данных, аппроксимация, краткосрочное прогнозирование электропотребления.

Рустам Нариманович Хамитов (д.т.н.), профессор кафедры «Электрическая техника».

Александр Сергеевич Грицай, старший преподаватель кафедры «Информатика и вычислительная техника».

Игорь Владимирович Червенчук, доцент кафедры «Информатика и вычислительная техника».

Глеб Эдуардович Сеницын, начальник управления по работе на рынках электроэнергетики и мощности.

Введение

В работе [1] авторами были систематизированы известные методы для построения краткосрочного прогноза электропотребления. Наиболее эффективные и часто используемые методы представлены группами «структурные модели» и «комбинированные методы», меньшее распространение получили «экспертные методы», поскольку существующий уровень автоматизации бизнес-процессов учета и планирования электропотребления позволяет автоматизировать процесс предобработки, обработки данных и осуществления краткосрочного прогноза электропотребления. При этом контроль полученных данных осуществляет, как правило, один эксперт. В работах [2–3] рассматривались методы построения краткосрочных прогнозов электропотребления с использованием математических моделей, основанных на методе опорных векторов, однако эти методы относятся к многофакторным моделям и хорошо применимы, когда имеется большое количество параметров во входных ретроспективных данных. В [3–4] рассматривались методы краткосрочного прогнозирования электропотребления, основанные на аппарате искусственных нейронных сетей, однако нейронная сеть представляет для эксперта черный ящик со входами и выходами, где полученные с ее помощью решения неочевидны. Рассматривая суточный график электропотребления, представленный на рис. 1, авторы выдвинули гипотезу, что он может быть математически описан в виде аппроксимирующей синусоидальной функции, которую можно было бы использовать в дальнейшем для осуществления краткосрочного прогноза электропотребления путем продления функции до 24 часов.

Для решения этой задачи потребуется осуществить прогноз значений коэффициентов аппроксимирующей функции – периода и амплитуды. Однако вопрос аппроксимирования является значимым, поскольку уже на этапе его решения возникает погрешность аппроксимации 4,52 %, полученная методами подбора аппроксимирующих коэффициентов. Из рис. 1 следует, что процесс электропотребления имеет ярко выраженные ночной и дневной циклы, где ночной цикл представлен с 24:00 до 11:00 часов, а дневной – с 12:00 до 23:00 часов. Поэтому предлагается, используя 12-часовую цикличность, аппроксимировать ночной и дневной циклы электропотребления отдельными синусоидальными функциями. В общем виде синусоидальная функция может быть представлена в виде

$$y = A \sin(kx + b) + D,$$

где y – расчетное электропотребление, МВт;

x – час суток;

k – частота;

b – фаза;

$$A = \frac{\max(\text{ЭП}) - \min(\text{ЭП})}{2} \text{ – амплитуда;}$$

$$D = \frac{\max(\text{ЭП}) + \min(\text{ЭП})}{2} \text{ – смещение относительно оси электропотреб-$$

ления;

$\max(\text{ЭП})$ и $\min(\text{ЭП})$ – максимальное и минимальное электропотребление на выбранном интервале ретроспективных данных.

Для определения параметров k и b был использован метод наименьших квадратов [5]. В результате параметр k принял значение, равное 0,4 для ночного

цикла электропотребления и 0,44 для дневного, а параметр b принял значение 4,4 для ночного и 0,4 для дневного цикла электропотребления.

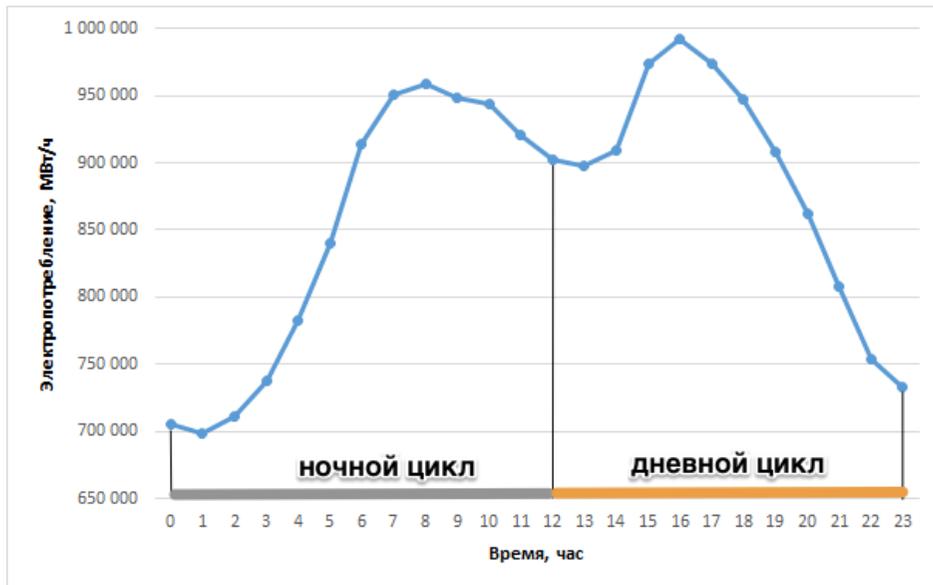


Рис. 1. График электропотребления ООО «Омская энергосбытовая компания» за 16.09.2015

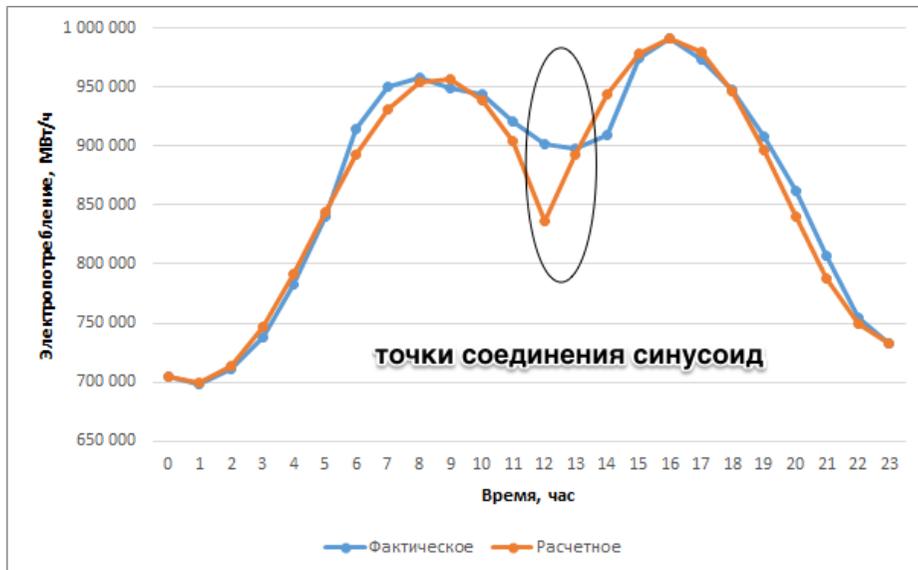


Рис. 2. Фактический и аппроксимированный графики электропотребления ООО «Омская энергосбытовая компания» за 16.09.2015

На рис. 2 представлен фактический и аппроксимированный графики электропотребления, из которых следует, что наибольшее расхождение фактического и аппроксимированного значений электропотребления образуется в точке соединения синусоид, описывающих дневной и ночной циклы электропотребления. Средняя ошибка аппроксимации в точке соединения синусоид составила 14,52 %, что значительно превосходит среднюю ошибку аппроксимации, которая составляет 4,52 % на годовом интервале. Поскольку ошибка в точке соединения

синусоид дневного и ночного циклов значительно превышает среднюю ошибку аппроксимации, предлагается использовать другой доступный способ аппроксимации для точки соединения синусоид. Были рассмотрены следующие методы аппроксимации: полином 2-й степени, полином 3-й степени, ряд Фурье и функция Гаусса, экспоненциальная, логарифмическая и степенная функции.

На рис. 3, *а* и 3, *б* представлены фактические значения и результат аппроксимации с использованием полинома 2-й и 3-й степени [6]. При аппроксимации полиномом 2-й степени величина достоверности на интервале данных один год составила 0,75, при использовании полинома 3-й степени – 0,96. В случае увеличения степени полинома достоверность только падает, что, естественно, объясняется эффектом увеличения погрешности при возрастании степени полинома. Таким образом, дальнейшее увеличение степени полинома не приведет к улучшению качества аппроксимации. На рис. 3, *д* представлен вариант аппроксимации с использованием метода Фурье [7]. Данный метод обеспечил довольно точные результаты аппроксимации ретроспективного ряда данных. На рис. 3, *е* представлен результат аппроксимации с использованием функции Гаусса [8]. Отличительной особенностью этого метода является удобство его использования для функций, имеющих несколько экстремумов. В результате аппроксимации функцией Гаусса шестого порядка получены следующие результаты: величина достоверности аппроксимации (критерий R-квадрат) составила 0.99, критерий пригодности к приближению $1.37e+08$. Близкая к единице величина вероятностной достоверности аппроксимации свидетельствует о хорошем совпадении аппроксимированной кривой с фактическими данными. Однако при уменьшении размера выборки значение критерия R-квадрат уменьшается, и вместе с тем качество приближения не улучшится. Экспоненциальная (рис. 3, *в*) и степенная аппроксимации (рис. 3, *з*) [9] обеспечили меньшую величину достоверности, поскольку эти методы плохо аппроксимируют кривую электропотребления.

Сравнительный анализ используемых методов по степени вероятностной достоверности полученных результатов представлен в таблице.

Проколк измерений с использованием методов аппроксимации

| № | Метод аппроксимации | Величина достоверности аппроксимации на интервале 1 год | Величина достоверности аппроксимации на интервале 24 часа |
|---|---------------------|---|---|
| 1 | Полином 2-й степени | 0,15 | 0,89 |
| 2 | Полином 3-й степени | 0,15 | 0,96 |
| 3 | Метод Фурье | 0,54 | 0,97 |
| 4 | Метод Гаусса | 0.65 | 0.99 |
| 5 | Экспоненциальная | 0,01 | 0,26 |
| 6 | Логарифмическая | 0,01 | 0,20 |
| 7 | Степенная | 0,01 | 0,32 |

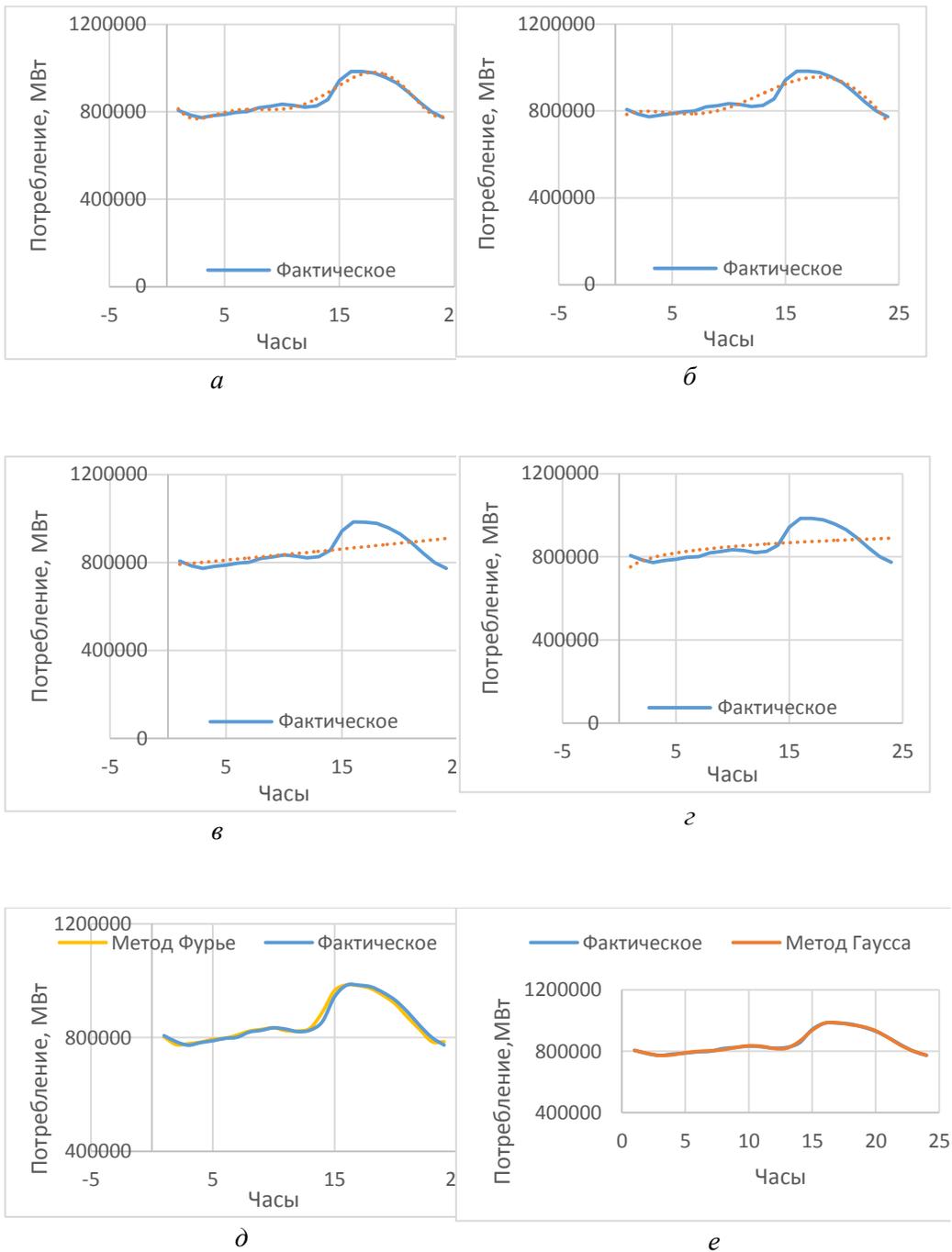


Рис. 3. Аппроксимация:
а – полиномом 2-й степени; *б* – полиномом 3-й степени;
в – экспоненциальная; *г* – степенная; *д* – методом Фурье; *е* – функцией Гаусса

На рис. 4 представлены все типы используемых методов аппроксимации применительно к точке соединения синусоид.

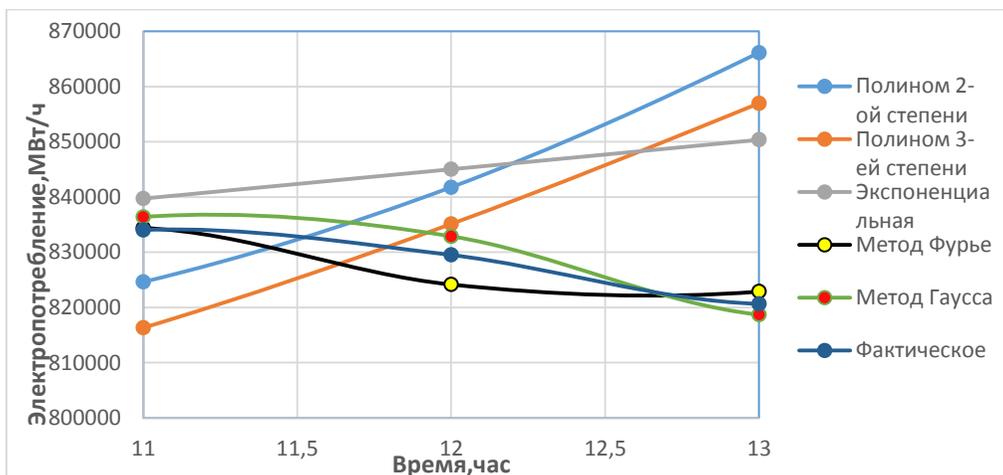


Рис. 4. Сравнение графиков: фактического и аппроксимированных исследуемыми методами

Представленный способ аппроксимации был реализован с использованием информационной системы Rapidminer, которая распространяется по лицензии LGPL (Lesser General Public License). Система имеет гибкую настраиваемую структуру с большим количеством реализованных операторов. В случае необходимости реализации собственного оператора может быть использован язык Java в виде подключаемой библиотеки [10]. Фрагмент процесса аппроксимации электропотребления представлен на рис. 5.

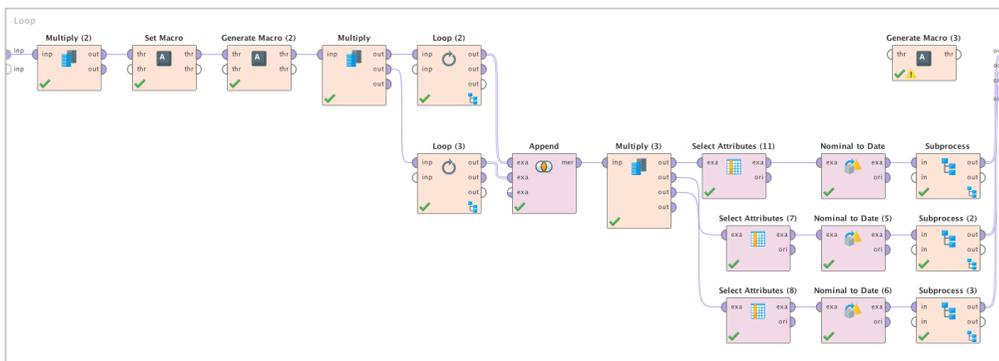


Рис. 5. Фрагмент алгоритма аппроксимации электропотребления, реализованный в информационной системе Rapidminer

Заключение

Из проведенного исследования следует, что временной ряд электропотребления может быть описан синусоидальными функциями отдельно для ночного и дневного циклов электропотребления. Для сглаживания точки соединения синусоидальных функций целесообразно применять функцию Гаусса. В этом случае удалось добиться минимальной средней ошибки аппроксимации, которая

составила 3,37 %. Данный способ аппроксимации временного ряда электропотребления может быть использован при составлении краткосрочного прогноза «на сутки вперед», для чего необходимо получить прогнозные значения коэффициентов функции аппроксимации – период и амплитуду. Разность фактических и аппроксимированных значений может быть представлена массивом остатков, к которым предполагается также применить методы поиска закономерностей и осуществлять прогноз относительно значений продленной функции до 24 ч. Предложенную модель, реализованную в аналитической системе Rapidminer, можно использовать как для отдельно взятого предприятия, так и для группы предприятий с разным характером электропотребления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Грицай А.С., Тюньков Д.А.* Классификация методов краткосрочного прогнозирования электропотребления для субъектов ОРЭМ // Актуальные вопросы энергетики: материалы Всероссийской научной конференции студентов, магистрантов, аспирантов. – Омск, 2016. – С. 41–45.
2. *Sansom D.C., Downs T., Saha T.K.* Support vector machine based electricity price forecasting for electricity markets utilising projected assessment of system adequacy data // Proceedings of the Sixth International Power Engineering Conference (IPEC2003). – Singapore, 2003. – P. 783–788.
3. *Taylor J.W.* Short-term load forecasting with exponentially weighted methods // IEEE Transactions on Power Systems. – 2012. – № 27 (1). – P. 458–464.
4. *Nur A.A., Maizah H.A., Norizan M.* Electricity load demand forecasting using exponential smoothing methods // World Applied Sciences Journal. – 2013. – № 22 (11). – P. 1540–1543.
5. *Магнус Я.Р., Катышев П.К., Пересецкий А.А.* Эконометрика. Начальный курс. – М.: Дело, 2007. – 504 с.
6. *Данилюк В.А.* Численное решение задач математической физики с помощью полиномов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2009. – № 3.
7. *Тимошенко Л.И.* Дискретное преобразование Фурье и его быстрые алгоритмы // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 12–2.
8. *Тиньгаев В.С., Матюнин С.А., Медников В.А.* Аппроксимация характеристик индуктивных датчиков линейных перемещений с помощью модифицированной функции Гаусса с разностным аргументом первого порядка // Вестник СГАУ. – 2011. – № 7.
9. *Некрасов О.Н., Мирмович Э.Г.* Интерполирование и аппроксимация данных полиномами степенного, экспоненциального и тригонометрического вида // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2010. – № 4.
10. *Костин Н.С., Грицай А.С.* Расширение аналитической платформы Rapidminer для построения прогнозных моделей ОРЭМ // Информатика, вычислительные машины, комплексы, системы и сети: материалы межвузовской научно-технической конференции. – Омск, 2014. – С. 125–129.

Статья поступила в редакцию 26 сентября 2016 г.

METHODS FOR APPROXIMATING JOIN POINTS TWO SINUSOIDAL FUNCTION DAY AND NIGHT CYCLE ENERGY CONSUMPTION FOR SOLVING THE PROBLEM SHORT-TERM FORECASTING OF POWER CONSUMPTION FOR THE DAY AHEAD

R.N. Khamitov¹, A.S. Gritsay¹, I.V. Chervenчук¹, G.E. Sinitsin²

¹ Omsk State Technical University
11, pr. Mira, Omsk, 644050, Russian Federation

² Omsk Energy Retail Company, LLC
41/15, pr. K. Marksa, Omsk, 644123, Russian Federation

Relevance of the work due to the demand of the wholesale electricity and capacity market participants on ways to build short-term forecasts of electricity consumption in order to improve the quality and accuracy of the predictive model. The method of approximation of electricity daily schedule using sinusoidal function of approximation separately for day and night cycles of electricity. The possibility of applying one of the known approximation techniques for smoothing the points of join two sine functions describing the cycles of day and night electricity. The proposed method is applicable to entities with a view to approximating historical data on power consumption, the selection of the coefficients of the approximating function – period and amplitude for the possibility of its extension to the interval up to 24 hours. Currently, there are many methods to build short-term forecasts based on statistical and factual, expert and multi-factor models, however, they are not always acceptable, since most of the consumers is not transmitting hourly data of power consumption, at the same time, energy sales company operates the system operator data (JSC System operator of the Unified energy system), which have a limited set of parameters. This method can be applied not only to energy sales company, but also an industrial enterprise, where day and night electricity cycles have distinct differences. In this case, it is necessary to choose the coefficients of the approximating function – the amplitude and frequency of the proposed method. To construct a computational model used analytical Rapidminer system. These results were obtained using historical data electricity LLC "Omsk Energy Retail Company", where a significant proportion – 75 % of the total electricity consumption business and 25 % individual customers.

Keywords: *data analysis, approximation, short-term forecasting of power consumption.*

*Rustam N. Khamitov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Alexander S. Gritsay, Senior Lecture.
Igor V. Chervenчук, Associate Professor.
Gleb E. Sinitsin, Head of Department.*