

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. Синицын²**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 Синицын, 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.

Прокол 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

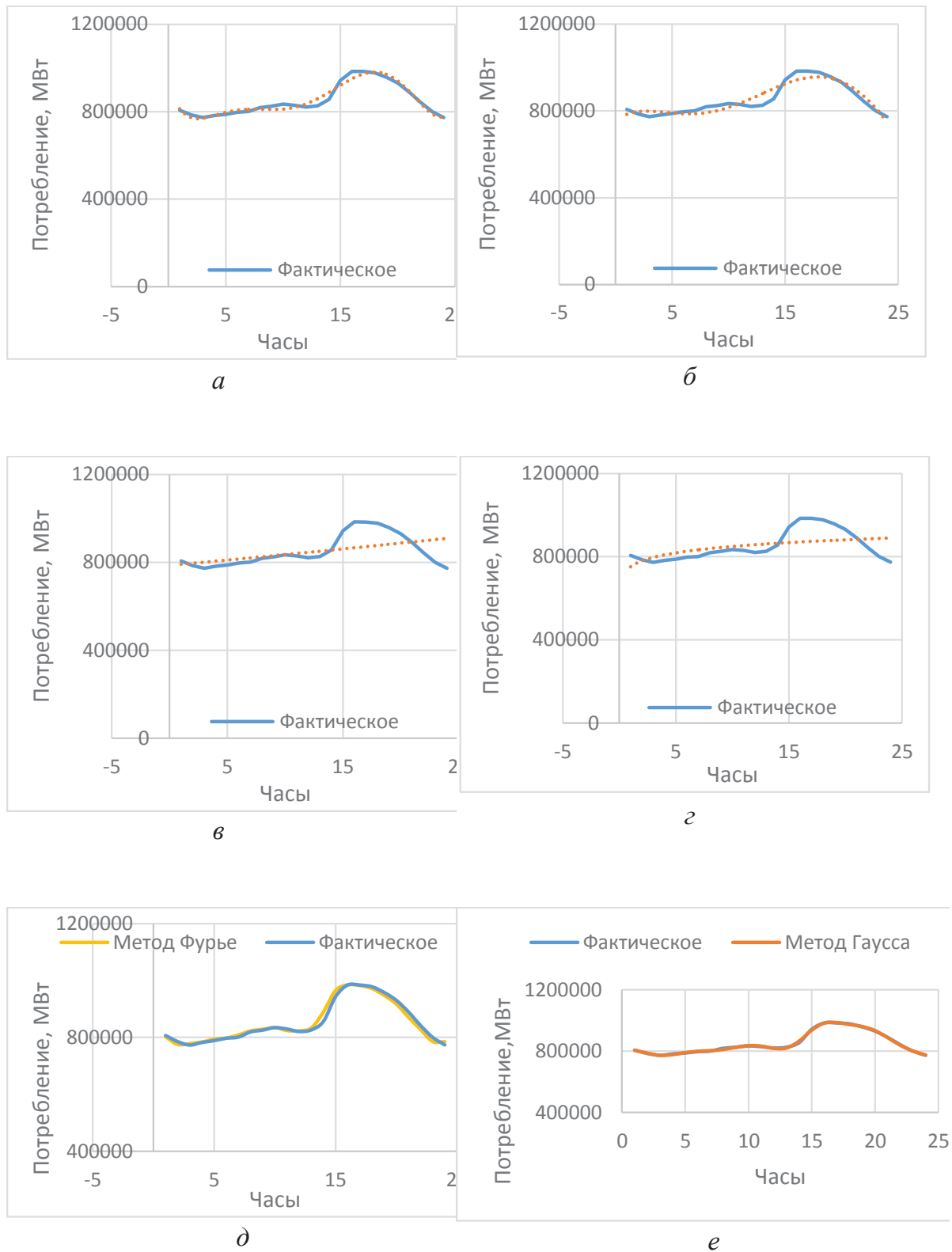


Рис. 3. Аппроксимация:
a – полиномом 2-й степени; *б* – полиномом 3-й степени;
в – экспоненциальная; *г* – степенная; *д* – методом Фурье; *е* – функцией Гаусса

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

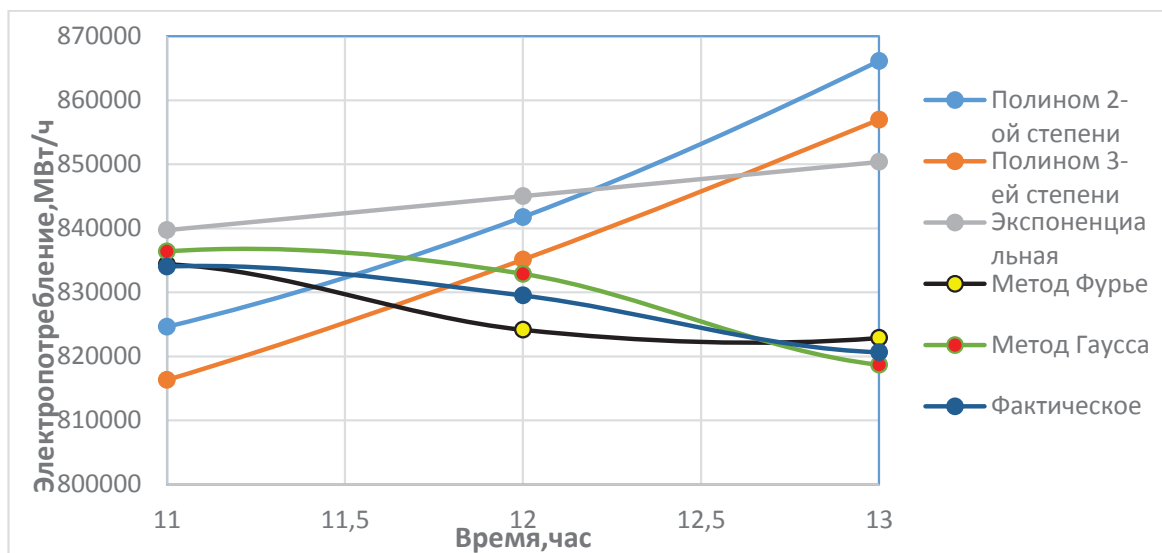


Рис. 4. Сравнение графиков: фактического и аппроксимированных исследуемыми методами

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.

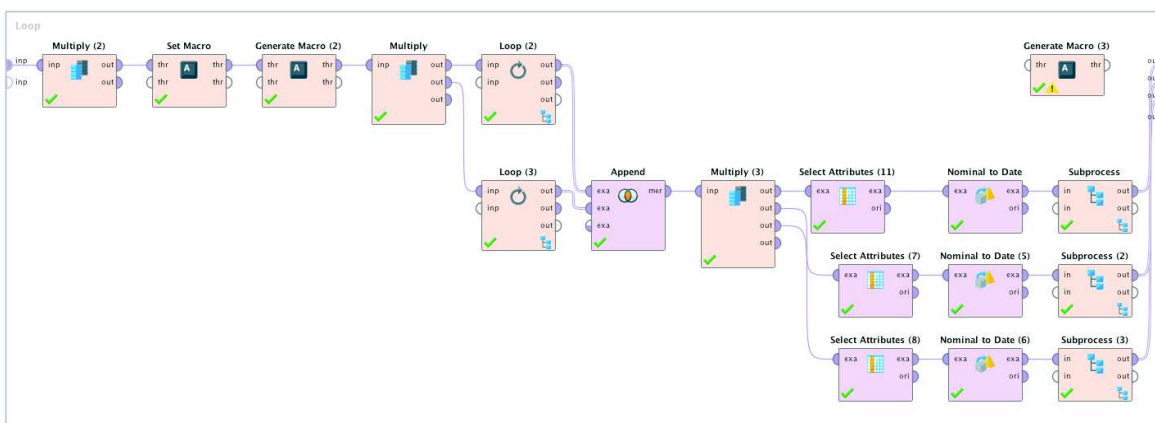


Рис. 5. Фрагмент алгоритма аппроксимации электропотребления, реализованный в информационной системе Rapidminer

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.*