

А. С. Мельников, Б. И. Попов

*Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук
Беларуси, Минск, Беларусь*

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ГРАФИКА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Аннотация. Разработан метод восстановления графика продолжительности электрической нагрузки как главной прогнозной информации о спросе электрической энергии, используемой в долгосрочных оптимизационных исследованиях энергосистем. Основная особенность предложенного метода заключается в непосредственном использовании в алгоритме основных коэффициентов, характеризующих данную форму выражения спроса энергии, а также ряд фиксированных точек на искомом графике, которые характерны для конкретной изучаемой энергосистемы. Решение о выборе фиксированных точек делается при помощи ретроспективной исторической статистики о работе энергосистемы. Полученные с использованием данного метода аналитические полиномиальные выражения позволяют оперативно получать форму графика продолжительности нагрузки и как упростить процедуру ввода исходных данных о формах графиков в программах оптимизации, так и облегчить процесс их прогнозирования на длительные временные периоды. Точность метода была проверена путем сравнения с формами графиков прошлых лет, полученных из детальной почасовой электрической нагрузки энергосистемы Республики Беларусь. Было установлено, что величина погрешности на основной части графика не превосходит $\pm 1\%$ и несколько увеличивается на ее краях ($\pm 4-6\%$), что является достаточной точностью для проведения долгосрочного энергетического планирования.

Ключевые слова: график продолжительности нагрузки, полиномиальная зависимость, реперные точки, объемы электропотребления, коэффициент неравномерности, коэффициент заполнения

Для цитирования. Мельников, А. С. Аналитическое представление графика продолжительности электрической нагрузки для оптимизационных исследований / А. С. Мельников, Б. И. Попов // Вест. Нац. акад. Навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – №4. – С. 63–67.

A. S. Melnikov, B. I. Popov

Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

ANALYTICAL REPRESENTATION OF ELECTRICAL LOAD DURATION CURVE FOR OPTIMIZATION RESEARCH

Abstract. A method has been developed to restore the shape of the electrical load duration curve as the main predictive information on the demand for electric energy used in long-term and medium-term optimization studies of power systems. The main feature of the proposed method is the direct use in the algorithm of the basic coefficients characterizing the given form of the expression for energy demand, as well as a number of fixed points on the desired curve that are characteristic of the particular power system under study. The decision on the choice of fixed points is done with the help of retrospective historical statistics on the operation of the power system. The analytical polynomial expressions obtained using this method allow to quickly obtain the shape of the load duration curve and to simplify the procedure for entering the initial forms of curves in optimization programs, as well as to facilitate the process of predicting them for long time periods. The accuracy of the method was verified by comparison with the curves of past years obtained from the detailed hourly electrical load of the power system of the Republic of Belarus. It was found that the error value on the main part of the curve does not exceed $\pm 1\%$ and slightly increases at its edges ($\pm 4-6\%$), which is assumed to be sufficient accuracy for long-term energy planning.

Keywords: load duration curve, polynomial dependence, fixed points, volumes of power consumption, coefficient of unevenness, load factor

For citation. Melnikov A. S., Popov B. I. Analytical representation of electrical load duration curve for optimization research. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2017, no. 4, pp. 63–67 (in Russian).

Введение. График продолжительности электрической нагрузки является широко используемой зависимостью, которая применяется в задачах оценки спроса электрической энергии.

По методу построения она образуется путем суммирования продолжительностей каждой нагрузки в порядке убывания на выбранном временном интервале [1, 2]. График может строиться на любом характерном отрезке времени (месяц, год) как в абсолютном, так и в относительном виде. Данная зависимость используется главным образом для определения будущего оптимального состава и режимов работы разнородных энергоблоков единой энергосистемы, то есть для каждого источника позволяет оценить его оптимальный коэффициент использования установленной мощности. Данный коэффициент выражает отношение фактически выработанной энергии к потенциально максимальной энергии отдельного источника за определенный временной период и является важным технико-экономическим показателем эффективности его работы [3]. Кроме того, инвертированное представление графика продолжительности нагрузки позволяет находить не только ожидаемую выработанную энергию от каждого энергоисточника, но и оценивать вероятность потери нагрузки энергосистемы, то есть вероятность недопоставки электроэнергии, что используется, например, в концепции распространенной программы оптимизации энергосистем WASP-IV [4]. Указанные зависимости используются также в симуляционной программе оценки спроса MAED в качестве одной из форм выражения энергетического спроса с их последующим применением в программах оптимизации [5]. Информация о графике продолжительности электрической нагрузки использовалась и при оптимизации структуры энергосистемы Беларуси [6], однако без учета изменения его формы по годам исследуемого временного периода.

Сказанное подтверждает необходимость качественного прогнозирования графиков продолжительности электрической нагрузки для каждого года исследуемого горизонта планирования при проведении долгосрочных оптимизационных исследований. Задачу прогнозирования можно разбить на два этапа. На первом этапе необходимо восстановить форму графика для выбранного базового года исследования по имеющимся фактическим данным для его основных характеристик. Вторым этапом будет прогнозирование основных характеристик и построение графиков на выбранном временном горизонте. В настоящей работе решается первая из этих задач.

Алгоритм и результаты. Основными характеристиками, во многом определяющими форму графика продолжительности электрической нагрузки, являются коэффициент неравномерности и коэффициент заполнения. Исходя из принятых определений под коэффициентом неравномерности понимается отношение минимальной нагрузки к максимальной, а под коэффициентом заполнения – отношение средней нагрузки к максимальной.

Как показывает расчетный опыт, для восстановления формы графика продолжительности нагрузки в относительном виде достаточным является использование полинома 5-го порядка следующего вида:

$$y(t) = b_0 + b_1t + b_2t^2 + b_3t^3 + b_4t^4 + b_5t^5, \quad (1)$$

где время t и нагрузка y выражаются в относительных единицах, нормированных на 1.

Для восстановления графика нагрузки, то есть для расчета коэффициентов b_0 – b_5 , достаточно составить и решить следующую систему линейных уравнений 5-го порядка для моментов времени t_1 – t_6 :

$$\begin{aligned} y_1(t) &= b_0 + b_1t_1 + b_2t_1^2 + b_3t_1^3 + b_4t_1^4 + b_5t_1^5 \\ y_2(t) &= b_0 + b_1t_2 + b_2t_2^2 + b_3t_2^3 + b_4t_2^4 + b_5t_2^5 \\ y_3(t) &= b_0 + b_1t_3 + b_2t_3^2 + b_3t_3^3 + b_4t_3^4 + b_5t_3^5 \\ y_4(t) &= b_0 + b_1t_4 + b_2t_4^2 + b_3t_4^3 + b_4t_4^4 + b_5t_4^5 \\ y_5(t) &= b_0 + b_1t_5 + b_2t_5^2 + b_3t_5^3 + b_4t_5^4 + b_5t_5^5 \\ y_6(t) &= b_0 + b_1t_6 + b_2t_6^2 + b_3t_6^3 + b_4t_6^4 + b_5t_6^5. \end{aligned} \quad (2)$$

При составлении систем (2) целесообразно принять во внимание следующие обстоятельства: для одного из уравнений, например 1-го, рассмотреть момент времени $t = 0$ для этого момента $y_1(t) = 1$, что сразу определяет $b_0 = 1$;

для уравнения, например 5-го, рассмотреть момент времени $t = 1$; вместо 6-го уравнения можно использовать выражение для средней по интервалу нагрузки, которая в случае единичного интервала является интегралом полинома в интервале от 0 до 1. По смыслу эта величина представляет собой коэффициент заполнения графика нагрузки.

С учетом приведенных обстоятельств матрица коэффициентов новой системы уравнений для неизвестных b_1 – b_5 будет следующей:

$$T = \begin{pmatrix} t_2 & t_2^2 & t_2^3 & t_2^4 & t_2^5 \\ t_3 & t_3^2 & t_3^3 & t_3^4 & t_3^5 \\ t_4 & t_4^2 & t_4^3 & t_4^4 & t_4^5 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,5 & 1/3 & 0,25 & 0,2 & 1/6 \end{pmatrix}, \tag{3}$$

где элементы последней строки получаются как $\int_0^1 t^n dt = \frac{t^{n+1}}{n+1} \Big|_0^1 = \frac{1}{n+1}$.

Столбец свободных членов будет выглядеть следующим образом:

$$Y = \begin{pmatrix} y_2(t) - 1 \\ y_3(t) - 1 \\ y_4(t) - 1 \\ y_{\text{мин}}(t) - 1 \\ y_{\text{ср}}(t) - 1 \end{pmatrix}. \tag{4}$$

В матрице-столбце (4) $y_{\text{мин}}(t)$ – минимальная нагрузка, которая также является важнейшей характеристикой графика продолжительности нагрузки; $y_{\text{ср}}(t)$ – упомянутая выше средняя нагрузка.

Коэффициенты b_1 – b_5 легко находятся по правилу Крамера решения системы линейных алгебраических уравнений

$$b_i = \frac{D_i}{D}, \tag{5}$$

где D – определитель матрицы T , а D_i – определитель, получаемый из D заменой i -го столбца на столбец свободных членов.

Таким образом, для вычисления коэффициентов b_1 – b_5 необходимо задать значения нагрузки в четырех точках временного интервала, одна из которых соответствует минимальному значению нагрузки при $t = 1$, и коэффициент заполнения графика нагрузки, который представляет собой отношение средней по интервалу времени нагрузки к максимальной.

Полученные значения коэффициентов b_1 – b_5 гарантируют совпадение полученной аппроксимации с фактической нагрузкой лишь в реперных точках, выбранных для восстановления графика. Поэтому необходима апробация для выяснения возможности использования предложенного алгоритма для остальных точек графика.

На рис. 1 показаны фактический график продолжительности электрической нагрузки 2014 г. и восстановленная его форма по предлагаемому методу. Значение t в полиномиальной модели, также показанной на диаграмме, должно быть выражено в относительных единицах. Для построения модели были выбраны следующие временные реперные точки в относительных единицах: $t = 0,1; 0,2; 0,9; 1,0$ с соответствующими величинами нагрузки также в относительных единицах 0,860; 0,803; 0,551; 0,455. Коэффициент заполнения равнялся 0,701.

Точность аппроксимации графика, восстановленного моделью, видна из кривой ошибок, показанной на рис. 2.

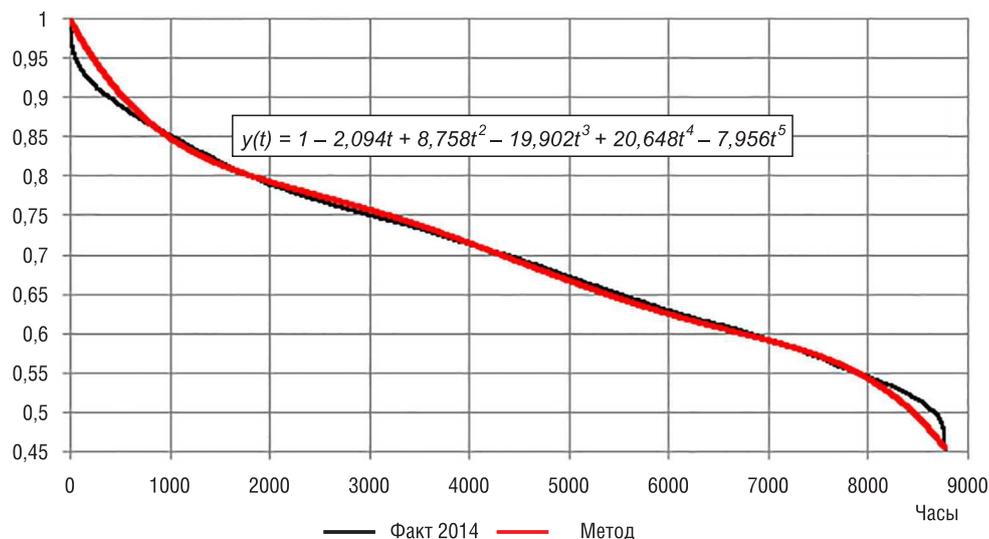


Рис. 1. Восстановленный график продолжительности нагрузки

Fig. 1. Restored load duration curve

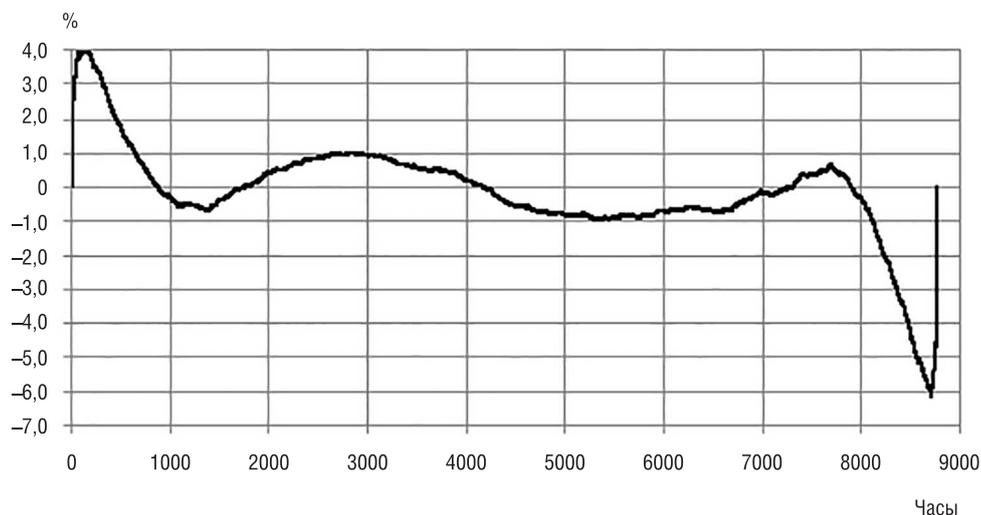


Рис. 2. Относительная ошибка восстановления графика продолжительности нагрузки по модели

Fig. 2. Relative error of the load duration curve restoring by the model

Как видно из рис. 2, на основной части временного периода ошибка представления графика не превосходит $\pm 1\%$ и лишь на краях периода несколько увеличивается, достигая в максимуме $\pm 4\text{--}6\%$. Такая точность восстановления графика продолжительности нагрузки, учитывая гарантированное точное восстановление основных характеристик зависимости, является вполне достаточной для целей энергетического планирования. При необходимости точность может быть увеличена разбиением временной шкалы на участки и применением настоящего метода на каждом из них. Следует только отметить необходимость корректного выбора реперных точек, используемых для построения модели. Точки должны выбираться так, чтобы как минимум выполнялось условие строгого убывания значений функции в зависимости от времени. Опыт восстановления графиков продолжительности нагрузки белорусской энергосистемы для ряда лет показал, что приемлемыми значениями двух реперных точек являются значения около 10% от начала и конца временного периода.

Заключение. Предложен метод восстановления графика продолжительности электрической нагрузки энергосистемы с помощью полиномиальной зависимости. Он позволяет сохранить основные характеристики – коэффициенты заполнения и неравномерности графиков продолжи-

тельности электрической нагрузки. В применении к белорусской энергосистеме на 90 % годового временного периода ошибка представления графика не превосходит $\pm 1\%$ и лишь на краях периода несколько увеличивается, достигая в максимуме $\pm 4\text{--}6\%$. Метод подходит для прогнозирования графиков продолжительности электрических нагрузок с использованием трендов изменений их основных характеристик.

Список использованных источников

1. Рыжкин, В. Я. Тепловые электрические станции / В. Я. Рыжкин. – М.: Энергия, 1976. – 327 с.
2. Маргулова, Т. Х. Атомные электрические станции / Т. Х. Маргулова. – М.: ИздАТ, 1994. – 289 с.
3. Гинзбург-Шик, Л. Д. Тепловые электрические станции и их технологическое оборудование / Л. Д. Гинзбург-Шик. – М.: Энергия, 1967. – 403 с.
4. Wien Automatic System Planning Package (WASP). A computer code for power generating system expansion planning. Version WASP-IV. User Manual [Electronic resource]. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2001. – Mode of access: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/CMS-16.pdf> – Data of access: 05.07.2017.
5. Model for Analysis of the Energy Demand (MAED). User's Manual for Version MAED-1, IAEA-TECDOC-386 [Electronic resource]. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 1986. – Mode of access: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/18/037/18037998.pdf – Data of access: 05.07.2017.
6. Якушев, А. П. Оптимизация ввода ядерной энергетики в топливно-энергетический комплекс Беларуси / А. П. Якушев, Б. И. Попов // Энергетика и ТЭК. – 2009. – №9 (78). – С. 14–22.

References

1. Ryzhkin V. Ya. *Thermal power plants*. Moscow, Energiya Publ., 1976. 327 p. (in Russian).
2. Margulova T. H. *Nuclear power plants*. Moscow, IzdAT Publ., 1994. 289 p. (in Russian).
3. Ginzburg-Shik L. D. *Thermal power plants and their technological equipment*, Moscow, Energiya Publ., 1967. 403 p. (in Russian).
4. *Wien Automatic System Planning Package (WASP). A computer code for power generating system expansion planning. Version WASP-IV. User Manual*. Vienna, International Atomic Energy Agency, 2001. Available: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/CMS-16.pdf> (Accessed 5 July 2017).
5. *Model for Analysis of the Energy Demand (MAED). User's Manual for Version MAED-1, IAEA-TECDOC-386*. Vienna, International Atomic Energy Agency, 1986. Available: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/18/037/18037998.pdf (Accessed 5 July 2017).
6. Yakushev A. P., Popov B. I. Optimization of the introduction of nuclear power in the fuel and energy complex of Belarus. *Energetika i TEK* [Energy and Fuel and Energy Complex], 2009, no. 9, pp. 14–22 (in Russian).

Информация об авторах

Мельников Алексей Сергеевич – аспирант, младший научный сотрудник, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь). E-mail: melnikov1991@bk.ru

Попов Борис Игоревич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bipopovby@gmail.com

Information about the authors

Alexey S. Melnikov – Postgraduate Student, Junior Researcher, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Science of Belarus (p. o. box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: melnikov1991@bk.ru

Boris I. Popov – Ph. D.(Engineering), Head of the Laboratory, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Science of Belarus (p. o. box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bipopovby@gmail.com