

ISSN 1561-8358 (Print)  
ISSN 2524-244X (Online)  
УДК 621.311

Поступила в редакцию 27.07.2017  
Received 27.07.2017

**А. С. Мельников, Б. И. Попов**

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

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРАФИКА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ НАГРУЗКИ ПРИ ДОЛГОСРОЧНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОСИСТЕМ**

**Аннотация.** Описана методология прогнозирования основных характеристик графика продолжительности нагрузки: коэффициента неравномерности, коэффициента заполнения и величины электропотребления. Характеристики необходимы для прогнозирования графиков продолжительности электрической нагрузки на длительных временных периодах. На основе обширной статистической информации о почасовых нагрузках Белорусской энергосистемы за период с 1997 по 2014 г. найдены исторические тренды изменения характеристик. С использованием полученных трендов и ряда предположений о тенденциях их долгосрочного изменения рассчитаны краевые сценарии изменения характеристик на продолжительном промежутке времени. Каждый краевой сценарий образован путем комбинации основных характеристик графика продолжительности нагрузки. Сценарный подход и ранее разработанный метод оперативного восстановления графиков продолжительности электрической нагрузки на основе ее основных характеристик дают возможность получить возможные граничные формы этих графиков для прогнозируемого временного периода. Особенностью подхода предлагаемой методологии является прогнозирование таких характеристик, как объемы электропотребления и форма графиков продолжительности электрической нагрузки в определенных диапазонах. Ширина диапазонов обоснована анализом ретроспективной информации и может быть скорректирована с учетом вновь поступающей информации. Применение предлагаемого подхода целесообразно в оптимизационных программах планирования энергосистем. Полученные численные результаты будут использованы для оптимизации структуры Белорусской энергосистемы.

**Ключевые слова:** график продолжительности нагрузки, прогнозирование, тренд, коэффициент заполнения, коэффициент неравномерности, пиковая нагрузка, объем электропотребления

**Для цитирования.** Мельников, А. С. Прогнозирование основных характеристик графика продолжительности нагрузки при долгосрочной оптимизации энергосистем / А. С. Мельников, Б. И. Попов // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 1. – С. 101–110.

**A. S. Melnikov, B. I. Popov**

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

## **FORECASTING THE LOAD DURATION CURVES FOR LONG-TERM OPTIMIZATION OF ENERGY SYSTEMS**

**Abstract.** A methodology of forecasting the main characteristics of load duration curves is described: the coefficient of unevenness, the load factor and the magnitude of power consumption. The characteristics are necessary for predicting of the electrical load duration curves over long time periods. Based on extensive statistical information on the hourly loads of the Belarusian energy system for the period from 1997 to 2014, historical trends of characteristics change were found. Each edge scenario was formed by combining the main characteristics of the load duration curve. Scenario approach and the previously developed method of operative restoration of the curves of the duration of the electrical load on the basis of its main characteristics make it possible to obtain possible boundary forms of these curves for a number of future years. A feature of the approach of the proposed methodology is that such characteristics as the amount of power consumption, as well as the shape of the curves of the duration of electric load are predicted in a certain ranges. The width of the ranges is justified by the analysis of the retrospective information and can be adjusted taking into account the newly received information. The proposed approach can be used in optimization programs of energy system planning. The obtained numerical results can be used to optimize the structure of the Belarusian energy system.

**Keywords:** load duration curve, forecasting, trend, load factor, coefficient of unevenness, peak load, volume of power consumption

**For citation.** Melnikov A. S., Popov B. I. Forecasting the load duration curves for long-term optimization of energy systems. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 1, pp. 101–110 (in Russian).

**Введение.** Известно, что при создании долгосрочной стратегии развития современных энергетических систем используется специальное программное обеспечение (ПО). Для расчетов с помощью подобного ПО необходимы исходные данные, выражающие будущий спрос электроэнергии, который будет покрываться искомой оптимальной структурой энергоблоков различного типа. В частности, модель оптимизации WASP-IV для осуществления расчетов требует исходную информацию о спросе электроэнергии в виде графиков продолжительности и пиковых значений нагрузки [1]. Подобный расчет предполагает наличие большого количества вероятных будущих форм графиков продолжительности нагрузки, в том числе для длительных периодов времени. Стоит отметить существование модели MAED [2], предназначенной, помимо прочего, для построения будущих графиков продолжительности нагрузки. Однако применение данной модели затруднительно из-за необходимости использования обширных исходных данных экономического характера, что не всегда осуществимо.

Долгосрочное прогнозирование вероятных сценариев будущих графиков продолжительности нагрузки целесообразно провести на основании ретроспективных данных о почасовых нагрузках, содержащих в неявном виде тенденции, характеризующие развитие изучаемой энергосистемы.

В данной работе за основу для проведения прогнозирования берутся ретроспективные данные о почасовых нагрузках Белорусской энергосистемы в 1997–2014 гг. и метод восстановления графика продолжительности нагрузки, описанный в [3]. Почасовые нагрузки системы являются доступной информацией и могут быть взяты с сайта Республиканского унитарного предприятия электроэнергетики «Объединенное диспетчерское управление» ([www.odu.by](http://www.odu.by)) в разделе «Оперативные данные о производственной деятельности ОЭС Беларуси».

*Цель настоящей работы* состоит в долгосрочном прогнозировании основных параметров графиков продолжительностей электрических нагрузок на основании данных об изменениях почасовых нагрузок в Белорусской энергосистеме за период с 1997 по 2014 г.

**Постановка и решение задачи.** В соответствии с общепринятыми определениями под коэффициентом заполнения графиков электрической нагрузки будем понимать отношение средней нагрузки к максимальной, под коэффициентом неравномерности – отношение минимальной нагрузки к максимальной.

На рис. 1 приведены годовые графики продолжительности электрической нагрузки энергосистемы Республики Беларусь в 2000, 2006, 2010 и 2014 гг. в относительном виде. На рисунке

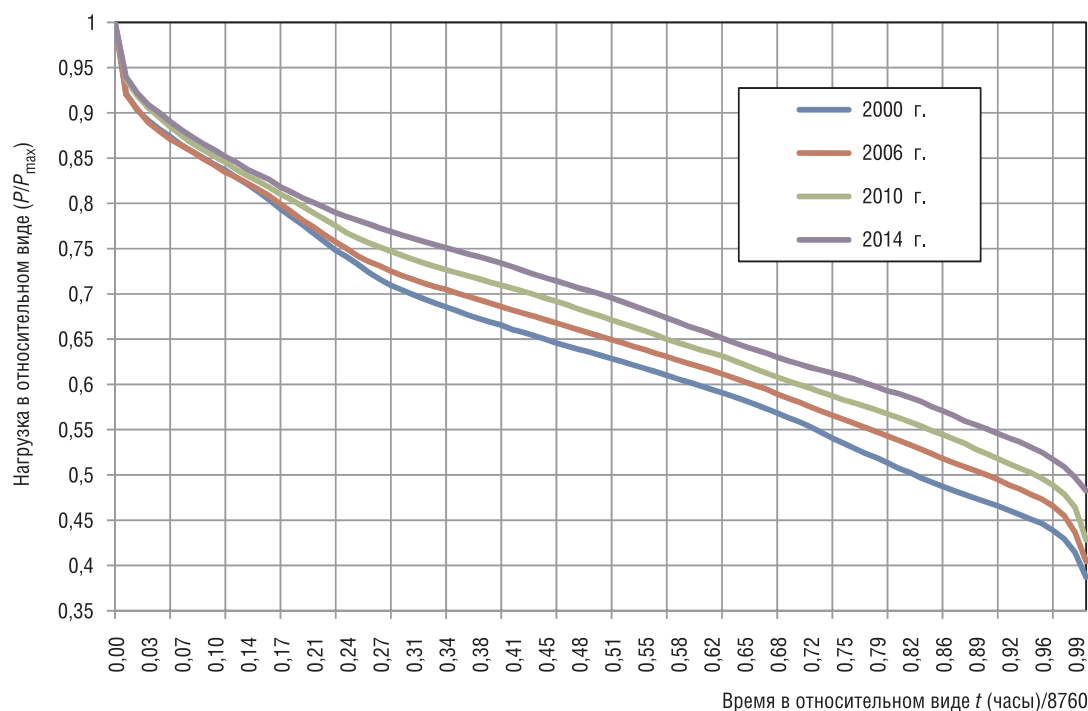


Рис. 1. Графики продолжительности электрической нагрузки

Fig. 1. Load duration curves

отчетливо видна тенденция увеличения коэффициентов заполнения графиков электрической нагрузки, проявляющаяся в подъеме графиков от 2000 к 2014 г.

Фактические характеристики – коэффициенты заполнения и неравномерности графиков электрической нагрузки – показаны на рис. 2.

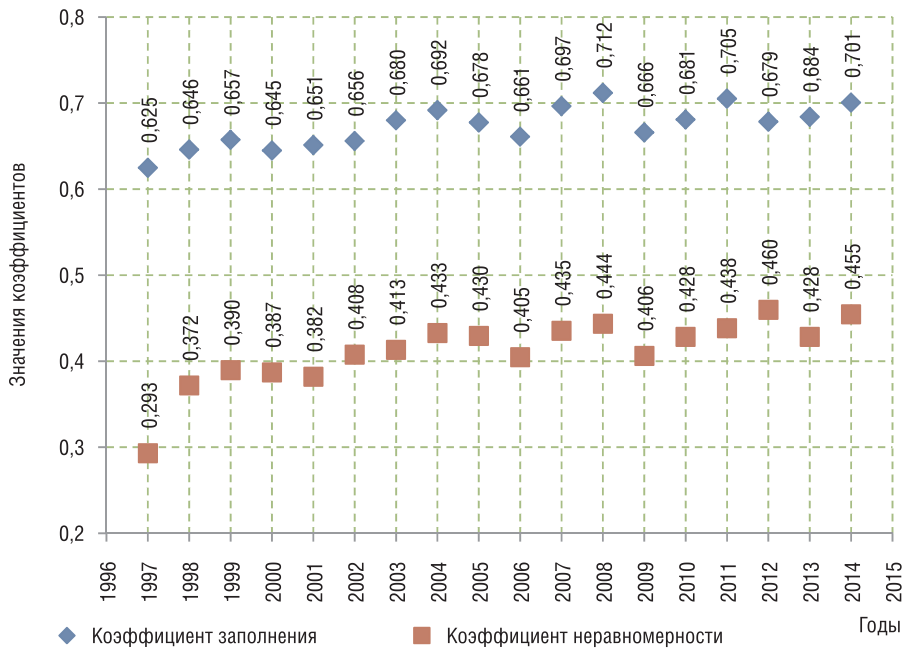


Рис. 2. Коэффициенты заполнения и неравномерности графиков электрической нагрузки

Fig. 2. Load factors and coefficients of unevenness for electric load graphs

Для построения прогнозов коэффициентов заполнения и неравномерности предположим следующее:

тренд изменения коэффициентов можно построить по их фактическим значениям методом наименьших квадратов и продолжить на необходимый временной период;

значения коэффициентов являются случайной величиной, распределенной по нормальному закону относительно построенного тренда, основанием для такого предположения является подверженность работы электроэнергетической системы влиянию многочисленных факторов;

в соответствии с характером нормального распределения диапазон изменения коэффициентов, в который с большой вероятностью (0,997) укладываются их значения, определим как

$$K_{тр} \pm \delta_{тр}, \tag{1}$$

где  $K_{тр}$  – значение коэффициента, полученное по его тренду;  $\delta_{тр}$  – максимальное относительное отклонение фактического значения от величины, полученной по тренду, определенное из фактических данных.

Тогда значения коэффициента в году прогнозируемого периода попадут в диапазон

$$K_i = K_{три} \pm \delta_{тр} K_{три}. \tag{2}$$

На рис. 3 сплошной линией показан тренд, построенный указанным методом для коэффициента заполнения графика нагрузки. Логарифмическая функция, вид которой также приведен на рис. 3, представляется наиболее подходящей для построения тренда, поскольку соответствует как тенденции возрастания коэффициента, так и асимптотическому характеру его поведения в зависимости от времени. По оси ординат диаграммы отложены порядковые номера годов, причем за 1 принят 1997 г. Показаны также рассчитанные описанным в настоящей статье способом минимальные и максимальные значения коэффициента заполнения с их аналитическим представлением логарифмической функцией, которые легко получить, пользуясь, например, стандартной процедурой таблиц Excel.

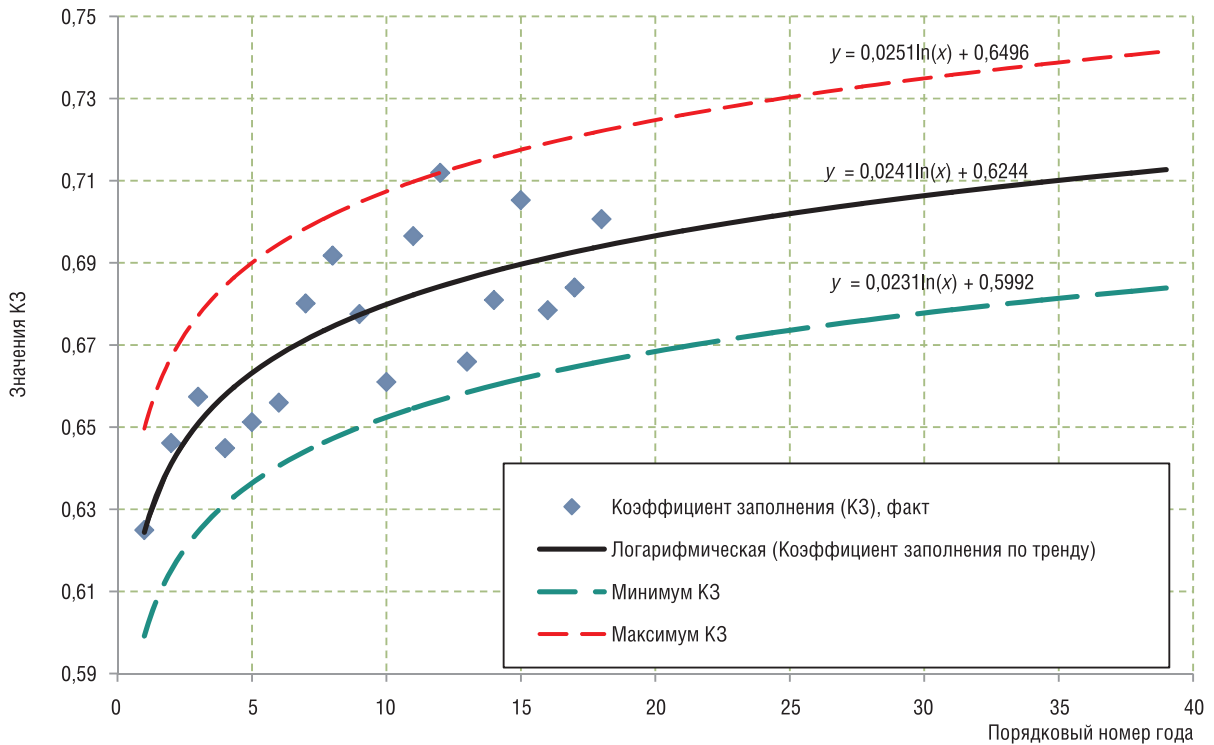


Рис. 3. Прогноз коэффициента заполнения графика электрической нагрузки

Fig. 3. Forecast of the load factor of electric load graph

Аналогичным методом выполнен прогноз коэффициента неравномерности графика электрической нагрузки. Результаты показаны на рис. 4.

Полученных данных достаточно для разработки различных сценариев формы графика продолжительности нагрузки на длительных временных периодах. Однако для проведения оптимизационных расчетов не менее важно иметь прогноз такой важной характеристики электрогенерирующей системы, как пиковая нагрузка.

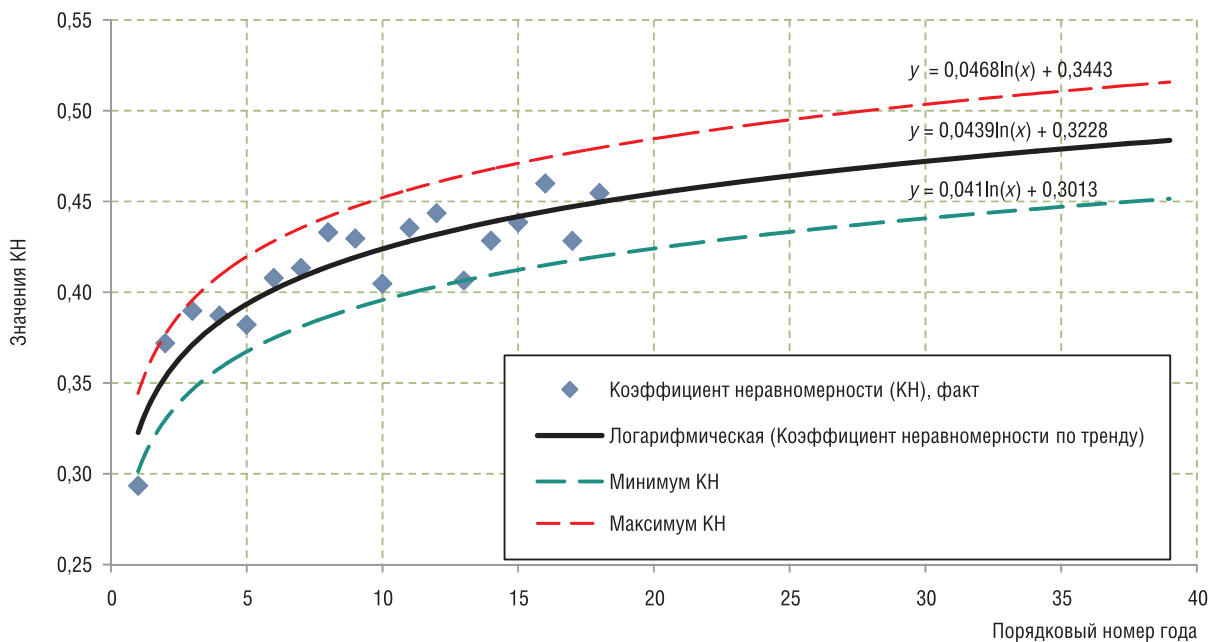


Рис. 4. Прогноз коэффициента неравномерности графика электрической нагрузки

Fig. 4. Forecast of the unevenness coefficient

Для прогнозирования пикової нагрузки энергосистемы, обязательной для перевода относительных значений графика продолжительности нагрузки в абсолютные, целесообразно воспользоваться связью между объемом потребления электроэнергии, коэффициентом заполнения графика нагрузки и пикової нагрузкой:

$$P = \frac{\mathcal{E}_{\text{потр}}}{8760K_3}, \tag{3}$$

где  $P$  – пиковая нагрузка, МВт;  $\mathcal{E}_{\text{потр}}$  – объем потребления электроэнергии, МВт·ч;  $K_3$  – коэффициент заполнения графика нагрузки.

Проблема, таким образом, сводится к прогнозированию объемов потребления электроэнергии.

Прежде чем приступать к прогнозированию объемов потребления электроэнергии, следует отметить, что ошибки прогноза в сторону его занижения могут привести к ограничению возможностей экономического развития, поскольку последнее во многом определяется уровнем электропотребления. Поэтому предпочтение следует отдавать сценариям, дающим завышенную оценку. Второе соображение, которое также следует учесть, состоит в том, что поведение объемов потребления электроэнергии во времени, в отличие от коэффициентов заполнения и неравномерности, вероятнее всего, нельзя считать асимптотической функцией.

На рис. 5 сплошной линией показан линейный тренд развития фактических объемов электропотребления и его аналитическое представление. Там же построен тренд на основе логарифмической функции. Как видно из сравнения трендов, линейному тренду стоит отдать предпочтение не только потому, что он дает более высокое электропотребление, но и по причине более высокой статистической достоверности, которая демонстрируется большей величиной параметра  $R^2$ . Штриховыми линиями с их аналитическим представлением показан на этом же рисунке «коридор» прогнозируемой величины электропотребления, построенный описанным выше методом.

Выполненные прогнозы «коридоров» коэффициентов заполнения и неравномерности графиков нагрузки будем использовать для получения крайних оценок их поведения во времени, которые можно назвать сценариями «минимум» и «максимум».

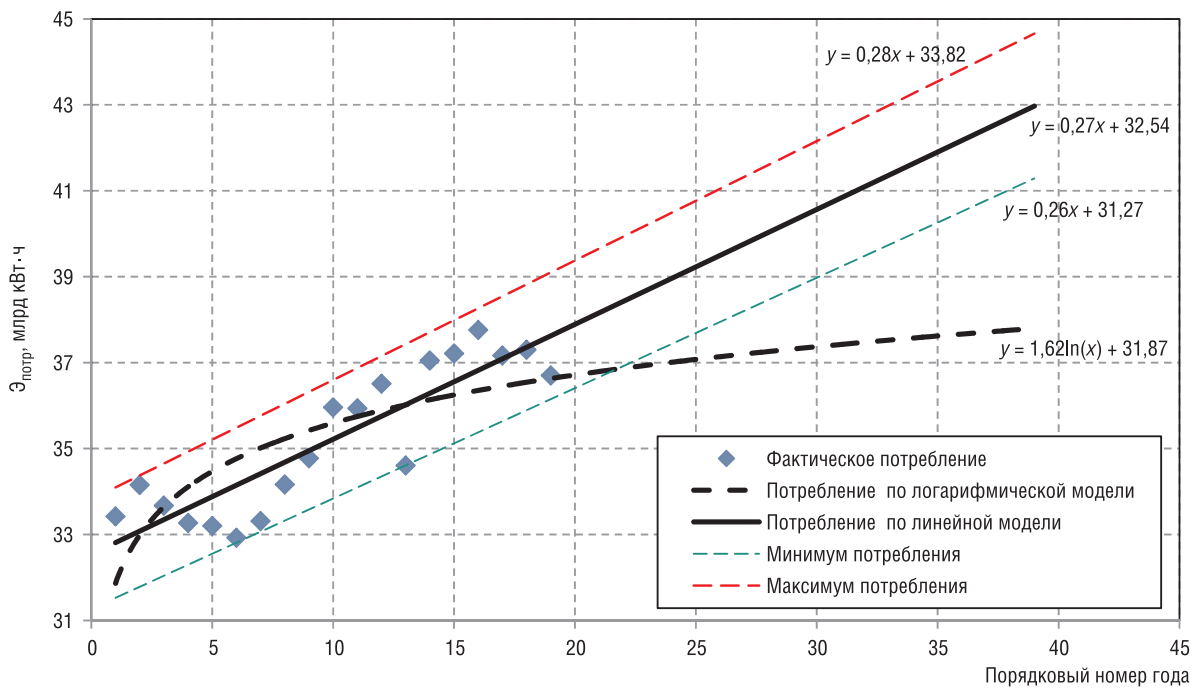


Рис. 5. Прогноз объемов потребления электроэнергии  
 Fig. 5. Forecast of electricity consumption volumes

Под сценарием «минимум» коэффициентов заполнения и неравномерности будем понимать сценарий, дающий при переходе к абсолютным значениям минимальную пиковую нагрузку. Иначе говоря, данный сценарий характеризуется максимальными значениями коэффициентов заполнения и неравномерности.

Под сценарием «максимум» будем, напротив, понимать сценарий, дающий максимальную пиковую нагрузку в абсолютных единицах, то есть имеющий минимальные значения коэффициентов заполнения и неравномерности. В табл. 1 приведены параметры сценариев развития коэффициентов.

Т а б л и ц а 1. Сценарии коэффициентов заполнения и неравномерности

T a b l e 1. Scenarios of load factors and unevenness coefficients

Год	Сценарий «минимум»		Сценарий «максимум»	
	коэффициент заполнения «максимум»	коэффициент неравномерности «максимум»	коэффициент заполнения «минимум»	коэффициент неравномерности «минимум»
2020	0,729	0,493	0,673	0,432
2025	0,734	0,502	0,677	0,439
2030	0,738	0,509	0,681	0,446
2035	0,742	0,516	0,684	0,452

Для выбора значений графиков продолжительности нагрузки в реперных точках (см. [3]), необходимых для восстановления формы графиков, также можно воспользоваться трендами, построенными по имеющимся ретроспективным данным. В табл. 2 приведены тренды, построенные аналогичным методом по данным для Белорусской энергосистемы, для значений относительной графика продолжительности нагрузки в реперных точках 0,1; 0,2 и 0,9.

Т а б л и ц а 2. Тренды для выбора значений реперных точек

T a b l e 2. Trends for selecting of reference fixed points values

Реперная точка (в относительных единицах)	Сценарий коэффициентов	Вид функции тренда (x – порядковый номер года, для 1997 г. x = 1)
0,1	«Минимум»	$0,0105 \ln(x)+0,8633$
0,1	«Максимум»	$0,0099 \ln(x)+0,8113$
0,2	«Минимум»	$0,0172 \ln(x)+0,7895$
0,2	«Максимум»	$0,0158 \ln(x)+0,7295$
0,9	«Минимум»	$0,0378 \ln(x)+0,4630$
0,9	«Максимум»	$0,0334 \ln(x)+0,4096$

Используя данные табл. 1, 2 и метод восстановления, описанный в [3], получим коэффициенты полиномов для представления графиков продолжительности электрической нагрузки в относительном виде, приведенные в табл. 3 для ряда лет временного периода с 2020 по 2035 г.

Т а б л и ц а 3. Коэффициенты полиномов графиков продолжительности электрической нагрузки

T a b l e 3. Polynomial coefficients for load duration curves

Год	Сценарий	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$
2020	«Минимум»	1,000	-1,480	5,728	-14,014	15,612	-6,353
	«Максимум»	1,000	-2,364	9,916	-22,196	22,569	-8,493
2025	«Минимум»	1,000	-1,455	5,671	-13,933	15,542	-6,324
	«Максимум»	1,000	-2,339	9,849	-22,072	22,443	-8,441
2030	«Минимум»	1,000	-1,434	5,623	-13,864	15,484	-6,299
	«Максимум»	1,000	-2,319	9,792	-21,968	22,337	-8,397
2035	«Минимум»	1,000	-1,416	5,582	-13,805	15,433	-6,278
	«Максимум»	1,000	-2,301	9,744	-21,877	22,245	-8,359

Для прогнозирования крайних значений пикової и минимальной нагрузки энергосистемы в абсолютном выражении следует учесть возможность развития по «минимальному» и «максимальному» сценариям объемов электропотребления. Аналитические выражения для этих сценариев показаны на рис. 5. В табл. 4 приведены рассчитанные по этим выражениям значения объемов электропотребления для обоих сценариев.

Т а б л и ц а 4. Объемы электропотребления при «минимальном» и «максимальном» сценариях, млрд кВт·ч  
T a b l e 4. Volumes of power consumption under “minimum” and “maximum” scenarios, billion kW·h

Год	Сценарий	
	«Минимум»	«Максимум»
2020	37,43	40,49
2025	38,72	41,88
2030	40,00	43,27
2035	41,29	44,66

В указанный в табл. 4 «коридор» изменения объемов электропотребления попадают их значения, прогнозируемые в «Концепции энергетической безопасности Республики Беларусь» [4] и приведенные в [5].

В комбинации с двумя сценариями поведения коэффициентов заполнения и неравномерности будем иметь четыре следующих сценария поведения характеристик графиков нагрузки:

1) сценарий «минимум – минимум» предполагает развитие объемов электропотребления на минимальном уровне и коэффициентов заполнения и неравномерности в соответствии с описанным сценарием «минимум»;

2) сценарий «минимум – максимум» предполагает развитие объемов электропотребления на минимальном уровне и коэффициентов заполнения и неравномерности в соответствии с описанным сценарием «максимум»;

3) сценарий «максимум – минимум» предполагает развитие объемов электропотребления на максимальном уровне и коэффициентов заполнения и неравномерности в соответствии с описанным сценарием «минимум»;

4) сценарий «максимум – максимум» предполагает развитие объемов электропотребления на максимальном уровне и коэффициентов заполнения и неравномерности в соответствии с описанным сценарием «максимум».

В табл. 5 приведены значения пикової и минимальной нагрузок системы для четырех сценариев поведения характеристик графиков нагрузки, рассчитанные исходя из данных табл. 4 и соответствующих значений коэффициентов заполнения и неравномерности графиков из табл. 1 по следующим очевидным формулам:

$$P_{\max} = \frac{\mathcal{E}_{\text{потр}} \cdot 10^6}{8760K_c}, \quad (4)$$

$$M_{\min} = P_{\max}K_n, \quad (5)$$

где  $P_{\max}$  и  $M_{\min}$  – пиковая и минимальная нагрузки, МВт;  $\mathcal{E}_{\text{потр}}$  – объем потребления электроэнергии, млрд кВт·ч;  $K_n$  – коэффициент неравномерности для соответствующего сценария.

Полученные графики продолжительности электрической нагрузки по четырем указанным сценариям с помощью полиномов, коэффициенты которых приведены в табл. 3, и пикової нагрузки из табл. 5 приведены на рис. 6 для 2020 г. По оси абсцисс отложено время в относительном виде, по оси ординат – электрическая мощность системы в абсолютном выражении.

Аналогичным образом, с использованием данных табл. 3 и 5, могут быть построены графики продолжительности электрической нагрузки для любого года рассматриваемого временного периода. На рис. 7 показаны графики для 2035 г.

Т а б л и ц а 5. Прогнозируемые пиковая и минимальная нагрузки энергосистемы, МВт

T a b l e 5. Predicted peak and minimum loads of the power system, MW

Год	Сценарий							
	«минимум – минимум»		«минимум – максимум»		«максимум – минимум»		«максимум – максимум»	
	$P_{\max}$	$M_{\min}$	$P_{\max}$	$M_{\min}$	$P_{\max}$	$M_{\min}$	$P_{\max}$	$M_{\min}$
2020	5859	2889	6353	2743	6337	3125	6872	2966
2025	6021	3022	6529	2869	6512	3268	7062	3104
2030	6187	3152	6709	2992	6692	3409	7256	3236
2035	6356	3278	6892	3112	6874	3545	7455	3366

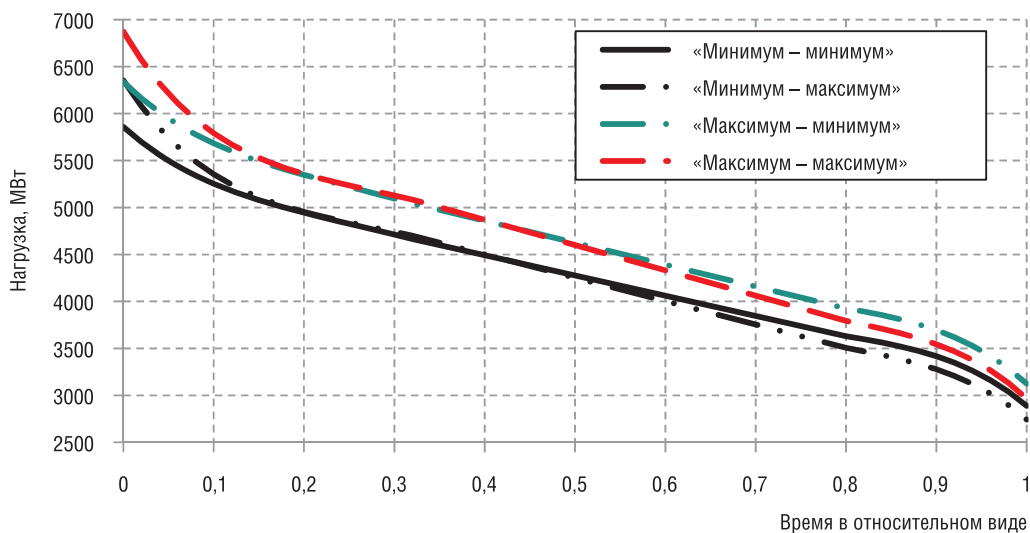


Рис. 6. Графики продолжительности электрической нагрузки в абсолютном выражении для 2020 г.

Fig. 6. The load duration curves in absolute terms for 2020

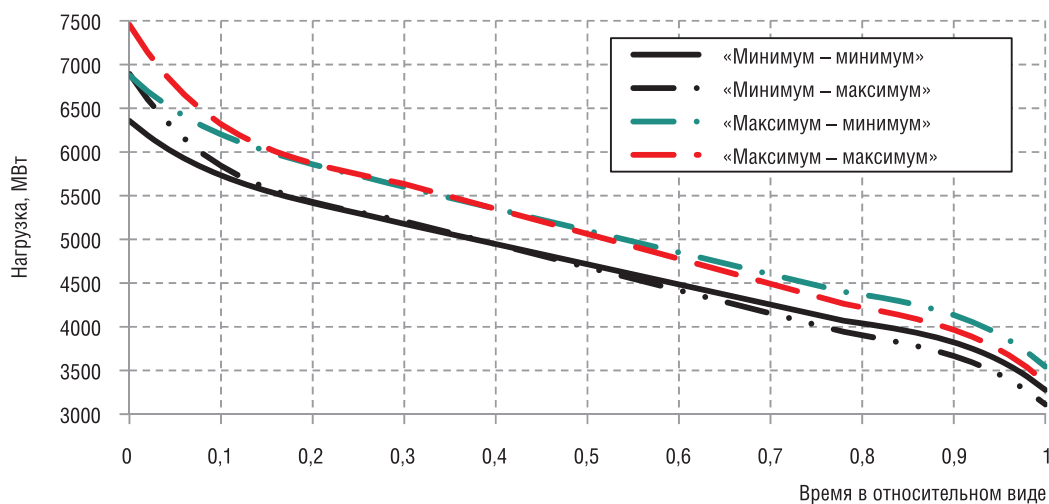


Рис. 7. Графики продолжительности электрической нагрузки в абсолютном выражении для 2035 г.

Fig. 7. The load duration curves in absolute terms for 2035

Как видно из рис. 6 и 7 и табл. 5, сценарии «минимум – максимум» и «максимум – минимум» дают близкие результаты по пиковой нагрузке. Пиковые нагрузки для этих сценариев лежат между таковыми для сценариев «минимум – минимум» и «максимум – максимум». Самая минимальная нагрузка характерна для сценария «минимум – максимум», имеющего как минимальное электропотребление, так и большой коэффициент неравномерности.



На рис. 8 показаны диапазоны изменения максимальных ( $P$ ) и минимальных ( $M$ ) нагрузок для этих сценариев на временном периоде 2020–2035 гг.

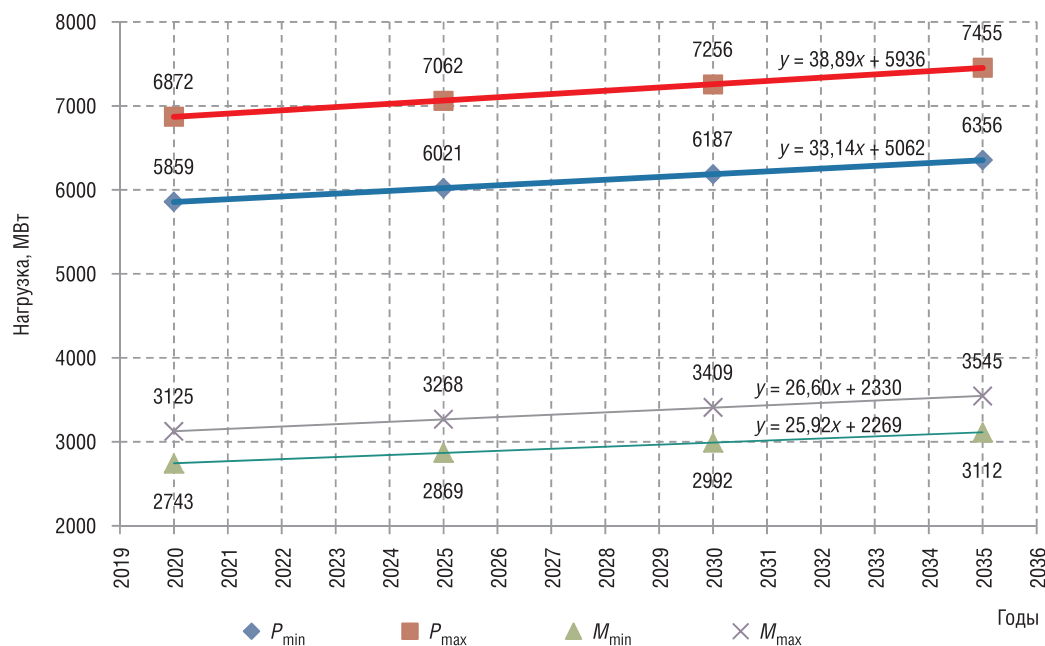


Рис. 8. Диапазоны изменения максимальных и минимальных нагрузок

Fig. 8. Ranges of maximum and minimum loads

В аналитических зависимостях нагрузок от времени, также приведенных на рис. 8, как и ранее,  $x = Y - 1996$ , где  $Y$  – календарный год.

Зависимости нагрузок от времени носят практически линейный характер, поскольку они определяются в основном принятым линейным характером сценариев развития объемов электропотребления.

Как видно из табл. 5 и рис. 8, для Белорусской энергосистемы возможный диапазон изменения пиковой нагрузки составляет более 1000 МВт, достигая к 2020 г. 5859–6872 МВт, к 2035 г. – 6356–7455 МВт. Диапазон изменения минимальной нагрузки для рассмотренных сценариев гораздо уже: 2743–3125 МВт в 2020 г. и 3112–3545 МВт в 2035 г.

**Заключение.** Описана методология прогнозирования основных характеристик графика продолжительности электрической нагрузки на основе предположения о вероятностном распределении значений относительно тренда, построенного на основе ретроспективной информации. Методология позволяет определить аналитические выражения полиномиального вида для оценки «коридоров» изменения коэффициентов заполнения и неравномерности графиков продолжительности электрической нагрузки на длительном временном интервале.

Методические результаты прогнозирования основных характеристик графика продолжительности электрической нагрузки применены к разработке ряда сценариев развития объемов электропотребления, пиковых и минимальных нагрузок Белорусской энергосистемы на временном периоде 2020–2035 гг.

### Список использованных источников

1. 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> – Date of access: 05.07.2017.
2. 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](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/18/037/18037998.pdf) – Date of access: 05.07.2017.
3. Мельников, А. С. Аналитическое представление графика продолжительности электрической нагрузки для оптимизационных исследований / А. С. Мельников, Б. И. Попов // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 4. – С. 63–67.

4. Концепция энергетической безопасности Республики Беларусь: Постановление Совета Министров Респ. Беларусь 23.12.2015 №1084 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.government.by/upload/docs/file5a034ca617dc35eb.pdf> – Дата доступа: 01.07.2017.

5. Михалевич, А. А. Атомная энергетика и структура энергопотребления / А. А. Михалевич, С. А. Александрович // VI Междунар. конф. «Ядерные технологии XXI века»: доклады, Минск, 25–27 окт. 2016 г. – Минск: Право и экономика, 2016. – С. 11–15.

## References

1. *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 at: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/CMS-16.pdf> (Accessed 5 July 2017).

2. *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 at: <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/18/037/18037998.pdf> (Accessed 5 July 2017).

3. Mel'nikov A. S., Popov B. I. Analytical representation of electrical load duration curve for optimization research. *Vestsi Natsyyanal'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).

4. The Concept of Energy Security of the Republic of Belarus. Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus on 23.12.2015 no. 1084. Available at: <http://www.government.by/upload/docs/file5a034ca617dc35eb.pdf> (Accessed 1 July 2017).

5. Mihalevich A. A., Aleksandrovich S. A. Nuclear power and structure of energy consumption. *VI Mezhdunarodnaya konferentsiya "Yadernye tekhnologii XXI veka": doklady, Minsk, 25–27 oktyabrya 2016 g.* [VI International Conference "Nuclear technologies of the 21th century": reports]. Minsk, Pravo i ekonomika Publ., 2016, pp. 11–15 (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](mailto: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](mailto:bipopovby@gmail.com)

## Information about the authors

*Alexey S. Melnikov* – Ph. D. 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](mailto: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](mailto:bipopovby@gmail.com)