

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-160-170

УДК 621.311.6:621.311.001.57

Модель электрической нагрузки жилищно-коммунального объекта для исследования систем «генератор – накопитель – потребитель» методом Монте-Карло*

Докт. физ.-мат. наук К. В. Доброго¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Резюме. В настоящее время наблюдается быстрый рост рынка накопителей энергии. Имеются предпосылки для их распространения в Беларуси. Несмотря на развитие технологии, вопросы оптимизации систем накопления электроэнергии и их работы в условиях конкретных систем «генератор – накопитель – потребитель» (ГНП) не получили необходимой проработки. Вместе с тем настройка и оптимизация системы ГНП могут дать конкурентное преимущество тем или иным системам накопителей, поскольку применение аккумуляторных батарей в неоптимальных условиях зарядки-разрядки снижает их ресурс. Оптимизация системы ГНП может включать использование гибридных систем накопителей совместно с разнородными химическими и механическими накопителями, с настройкой параметров контроллера системы и др. В научных работах представлено немало эмпирических и аналитических методов расчета электрических нагрузок, использующих в качестве исходных данных усредненные по времени значения фактического потребления электроэнергии, средние квартирные нагрузки, эмпирические или статистические коэффициенты формы и коэффициенты максимума электрической нагрузки группы однородных потребителей. Однако такие модели не отвечают требованиям детального имитирования работы небольших систем, когда моделирование должно соответствовать нестационарному, неусредненному, стохастическому характеру нагрузки. В статье изложен простой подход к детальному имитационному моделированию электрических нагрузок относительно небольших объектов, таких как многоквартирный дом или небольшое сельскохозяйственное производство. Модель сформулирована как в физическом, так и в алгоритмическом виде, что позволяет легко реализовать ее в любой среде программирования. Представлена сходимость интегрального потребления электроэнергии, задаваемого моделью, к статистически средним параметрам. Рассчитана автокорреляционная функция, показывающая два масштаба автокорреляции имитационных графиков нагрузок. Проанализированы Фурье-спектры сгенерированных графиков нагрузок. Модель электрической нагрузки может использоваться независимо или как составная часть общей модели системы ГНП. Она также может применяться для настройки систем контроля и учета энергоресурсов (АСКУЭ) и различных исследовательских целей.

Ключевые слова: моделирование, электрическая нагрузка, накопитель электроэнергии, метод Монте-Карло

Для цитирования: Доброго, К. В. Модель электрической нагрузки жилищно-коммунального объекта для исследования систем «генератор – накопитель – потребитель» методом Монте-Карло / К. В. Доброго // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 2. С. 160–170. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-160-170

Адрес для переписки

Доброго Кирилл Викторович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-42-32
ef@bntu.by

Address for correspondence

Dobrego Kirill V.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-42-32
ef@bntu.by

* Работа выполнена в рамках задания 1.20 «Обоснование технико-экономической эффективности использования свинцовых аккумуляторов со структурно-модифицированными электродами для накопительных блоков» Государственной программы научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 гг. «Энергетические системы, процессы и технологии».

Model for Electric Load of Community Housing Projects to Investigate “Generator – Accumulator – Consumer” System while Using Monte-Carlo Method

K. V. Dobrego¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Nowadays we observe rather rapid growth of energy accumulators market. There are prerequisites to their extensive application in Belarus. In spite of technology development problems pertaining to optimization of electric power and their operation under conditions of specific systems “generator – accumulator – consumer” (GAC) have not obtained proper consideration. At the same time tuning and optimization of the GAC system may provide competitive advantages to various accumulating systems because application of accumulator batteries in non-optimal charge – discharge conditions reduces its operating resource. Optimization of the GAC system may include utilization of hybrid accumulator systems together with heterogeneous chemical and mechanical accumulators, tuning of system controller parameters etc. Research papers present a great number of empirical and analytical methods for calculation of electric loads. These methods use the following parameters as initial data: time-averaged values of actual electric power consumption, averaged apartment electric loads, empirical and statistical form coefficients, coefficients of maximum electric load for a group of uniform consumers. However such models do not meet the requirements of detailed simulation of relatively small system operation when the simulation must correspond to non-stationary, non-averaged, stochastic load nature. The paper provides a simple approach to the detailed simulation of electric loads in regard to small projects such as multi-unit apartment building or small agricultural farm. The model is formulated both in physical and algorithmic terms that make it possible to be easily realized in any programming environment. The paper presents convergence of integral electric power consumption, which is set by the model, to statistically averaged parameters. Autocorrelation function has been calculated in the paper that shows two scales for autocorrelation of simulated load diagrams. The paper contains of an analysis on Fourier spectra for generated electric load diagrams. The model of electric load may be used separately or as a component of a general model in the GAC system. It may also be applied for tuning of automatic systems for control and accounting of power resources and various research purposes.

Keywords: simulation, electric load, electric power accumulator, Monte-Carlo method

For citation: Dobrego K. V. (2017) Model for Electric Load of Community Housing Projects to Investigate “Generator – Accumulator – Consumer” System while Using Monte-Carlo Method. *Science and Technique*. 16 (2), 160–170. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-160-170 (in Russian)

Введение

В настоящее время наблюдается высокий интерес к системам накопления электроэнергии как для бытового, так и промышленного использования. По оценкам экспертов, годовой рост мирового рынка накопителей электроэнергии составляет 27 % [1]. Имеются объективные предпосылки для широкого внедрения систем накопителей в Республике Беларусь. Это связано с планируемым вводом в эксплуатацию Белорусской АЭС, введением многотарифной системы оплаты за электроэнергию [2], появлением систем локальной электрогенерации с использованием возобновляемых источников энергии.

Уже сейчас имеется немало компаний, производящих системы накопления электроэнергии, среди которых Tesla, NGK, AltairNano [1, 3, 4]. В борьбу за рынок включаются и российские производители [5]. Несмотря на бурное развитие технологии, вопросы оптимизации систем накопления электроэнергии и в особенности их

работы в условиях конкретных систем «генератор – накопитель – потребитель» (ГНП) не получили необходимой проработки. Вместе с тем понятно, что настройка и оптимизация системы ГНП могут дать конкурентное преимущество тем или иным системам накопителей, поскольку применение аккумуляторных батарей в неоптимальных условиях зарядки-разрядки существенно снижает их рабочий ресурс. Оптимизация системы ГНП может включать, в частности, использование гибридных систем накопителей совместно с разнородными химическими и механическими накопителями, с настройкой параметров контроллера системы.

Ввиду того что прямые испытания и последующая оптимизация накопителей для конкретных систем ГНП дорогостоящи, компьютерное моделирование может существенно облегчить задачу оптимизации конструкции, схемы накопителя и алгоритмов его работы в системе. Накопитель электроэнергии может использоваться в различных сетях и выполнять разные

функции. Наиболее очевидные функции накопителя – это работа: 1) в автономной сети с ветрогенераторами и солнечными батареями, другими источниками и относительно маломощными потребителями; 2) в качестве буферного накопителя для выравнивания суточной неравномерности электрической нагрузки; 3) по графику минимального тарифа на электроэнергию с локальным использованием накопленной энергии.

Для выполнения каждой из указанных функций требуются специфические накопительные устройства и алгоритмы управления их работой [6, 7], а для моделирования системы ГНП нужны модели работы всех элементов этой системы. Соответствующие модели представлены в различных научных трудах. Так, в [8] предложен метод моделирования работы накопителя при помощи передаточных функций, в [6, 9] – модели работы ветрогенераторов и солнечных батарей. Расчеты электрических нагрузок в основном сводятся к нормативным методам оценки средних и максимальных нагрузок достаточно крупных промышленных и жилищно-бытовых объектов (предприятий, жилых микрорайонов и т. п.) для целей проектирования [10–13]. Методы расчета вероятностного распределения напряжений и потоков мощности делятся на аналитические и численные. Аналитические используют описание временных выборок случайных значений мощности нагрузки и генерации с помощью сверток и кумулянтов [14–16], численные основываются на моделировании случайных временных выборок методом Монте-Карло.

Существует немало эмпирических и аналитических методов расчетов электрических нагрузок, использующих в качестве исходных данных усредненные по времени значения фактического потребления электроэнергии, средние квартирные нагрузки, эмпирические или статистические коэффициенты формы и коэффициенты максимума электрической нагрузки группы однородных потребителей [15, 17, 18]. Однако такие модели не отвечают требованиям детального имитирования работы небольших систем, максимально соответствующего нестационарному, неусредненному, стохастическому характеру нагрузки рассматриваемой сети. Анализ данных показывает, что численное мо-

делирование является наиболее эффективным методом решения задач имитации реальных графиков электрических нагрузок (ГЭН). Об этом говорят и хорошие результаты, полученные при использовании такого подхода для исследования ГЭН жилищно-бытовых объектов [19–21].

В статье изложен простой подход к детальному имитационному моделированию электропотребления относительно небольших объектов, таких как многоквартирный дом или небольшое сельскохозяйственное производство. Модель сформулирована как в физическом, так и в алгоритмическом виде, что позволяет легко реализовать ее в любой среде программирования. Модель электрической нагрузки составлена таким образом, чтобы ее можно было использовать как часть общей модели системы ГНП, построение которой будет выполнено в дальнейшем для оптимизации работы накопителей и генераторов.

Следует иметь в виду, что изолированные энергетические системы с накопителями электроэнергии пока не распространены в Республике Беларусь. Однако со временем они займут свою нишу в хозяйстве страны, и для них должны быть разработаны средства тестирования и оптимизации. Модель, представленную в статье, можно применять также для уточнения методов расчета электрических нагрузок (РЭН) жилищно-коммунальных и промышленных объектов, коэффициентов использования для эмпирических методов РЭН, коэффициентов несоответствия расчетных максимумов нагрузок силовых электроприемников и других параметров, используемых в РЭН. Кроме того, ее можно применять для моделирования и отладки АСУ энергетических систем.

Модель электрической нагрузки

Рассмотрим автономные энергетические системы, генерирующая часть которых состоит из ветрогенератора и (или) фотогальванических элементов, а потребителем выступает группа домохозяйств (квартир), сельскохозяйственное предприятие или иной небольшой потребитель. Модель формулируется в достаточно универсальном виде, однако очевидно, что для более специфичного объекта потребуются особая и, возможно, многопараметрическая модель.

Считаем, что моделируемый объект включает определенное число независимых потребителей активной электрической мощности, которых можно разбить на несколько классов. Каждый класс потребителей характеризуется диапазоном мощности отдельных потребителей, некоторым распределением этих потребителей по мощности внутри установленного диапазона, статистическим законом включения/выключения нагрузки и другими параметрами. Разделение на классы электропотребителей (группы электроприемников) – стандартный подход как в эмпирических, так и в статистических методах РЭН [9, 11, 15].

Предложим простейшее деление электропотребителей жилых помещений. Класс С0 – постоянно или длительно работающие маломощные потребители (электробытовые приборы в дежурном режиме или режиме ожидания, часы, таймеры, датчики, контроллеры, Wi-Fi-хабы и т. п.). Диапазон мощности $\Delta P^{(C0)}$ потребителя этого класса 0,1–10,0 Вт. Временной закон включения/выключения нагрузки отсутствует – потребитель постоянно включен. Распределение отдельных потребителей по мощности – арифметически равномерное. Класс С1 – маломощные бытовые приборы (прежде всего приборы освещения), имеющие случайный закон включения/выключения с плотностью вероятности включения, промодулированной по суточному циклу необходимости освещения $f^{(ocb)}(t)$. Диапазон мощности потребителей этого класса $\Delta P^{(C1)} = 10\text{--}100$ Вт. Распределение по мощности отдельных потребителей в данном диапазоне – равномерное геометрическое, что отражает тенденцию к уменьшению использования в быту ламп накаливания и переходу на энергосберегающие приборы освещения. Класс С2 – бытовые приборы средней мощности, такие как пылесосы, холодильники, стиральные машины, миксеры, дрели, СВЧ-печи, электрочайники и т. п. Диапазон мощности $\Delta P^{(C2)}$ потребителей этого класса 100–3000 Вт. Временной закон включения/выключения нагрузки – случайный с плотностью вероятности, промодулированной по суточному циклу активности домохозяйств $f^{(акт)}(t)$ (максимальные нагрузки – с 17:00 до 22:00, минимальные – с 23:00 до 6:00).

Мощность i -го прибора класса С при его арифметически равномерном распределении в интервале $\Delta P^{(C)} = P_{\min}^{(C)} \dots P_{\max}^{(C)}$ запишется в виде

$$P_i^{(C)} = P_{\min}^{(C)} + (i-1)\Delta q, \quad (1)$$

$$\text{где } \Delta q = \frac{P_{\max}^{(C)} - P_{\min}^{(C)}}{N^{(C)} - 1}.$$

При геометрически равномерном распределении

$$P_i^{(C)} = P_{\min}^{(C)} \delta^i, \quad (2)$$

$$\text{где } \delta = \left(\frac{P_{\max}^{(C)}}{P_{\min}^{(C)}} \right)^{1/N^{(C)}}.$$

Первичными исходными данными модели будут: среднесуточное потребление электроэнергии объектом в целом (определяется из среднесуточного потребления $\bar{L}_{\text{сут}} = \bar{L}_{\text{мес}} / 30$), относительное потребление энергии приборами каждого класса (основанное на статистических данных или других моделях), количество электроприборов каждого класса на объекте – $N^{(C0)}$, $N^{(C1)}$, $N^{(C2)}$. Примем, что средняя потребляемая мощность приборов класса С0 $\bar{P}^{(C0)} = N^{(C0)}$, тогда потребление электроэнергии в сутки $\bar{L}_{\text{сут}}^{(C0)} = 24N^{(C0)}$. Между потребителями классов С1 и С2 среднесуточное потребление энергии распределено в соотношении 1:2 (модельное допущение), таким образом, $\bar{L}_{\text{сут}}^{(C1)} = \frac{\bar{L}_{\text{сут}} - \bar{L}_{\text{сут}}^{(C0)}}{3}$ и $\bar{L}_{\text{сут}}^{(C2)} = 2\bar{L}_{\text{сут}}^{(C1)}$.

Статистический закон работы отдельного прибора формулируется при помощи функции плотности вероятности включения прибора, основанной на суточном цикле необходимости освещения $f^{(ocb)}(t)$ и бытовой активности домохозяйств $f^{(акт)}(t)$. Момент выключения определяется исходя из статистического закона времени нахождения прибора во включенном состоянии $f^{(ON)}(t)$. Определяя статистический закон $f^{(ON)}(t)$, следует учитывать, что кратковременные включения достаточно вероятны

и отсутствует выраженное «ожидаемое» время включения прибора. Поэтому от нормального закона распределения вероятности, распределений Стьюдента, Лапласа и подобных им целесообразно отказаться. Более правдоподобными следует признать распределения типа Вейбулла, Фишера, бета-распределение [22]. Примем для $f^{(ON)}(t)$ распределение Вейбулла [23], имеющее вид

$$f_{WEI}(k, \lambda, t) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^k} \text{ для } t \geq 0, \quad (3)$$

где k – коэффициент формы (модуль Вейбулла); λ – коэффициент масштаба.

Математическое ожидание, медиану, моду и дисперсию распределения найдем как:

$$M_{WEI} = \lambda \Gamma(1 + 1/k); \quad m_{WEI} = \lambda \ln(2)^{1/k};$$

$$d_{WEI} = \frac{\lambda(k-1)^{1/k}}{k^{1/k}} \text{ для } k > 1;$$

$$\sigma_{WEI} = \lambda^2 \Gamma(1 + 2/k) - \mu^2.$$

Модуль Вейбулла для $f^{(ON)}(t)$ будет положительным, поскольку плотность вероятности времени включения должна расти от нуля. Для простоты положим $k = 2$. Выбор коэффициента масштаба может быть сделан исходя из статистических медианных или модальных данных. Если предположить, что медиана распределения соответствует получасу для приборов класса C1, то $\lambda^{(C1)} = 1800 / \ln(2)^{1/k} \cong 2162$ с. Для приборов класса C2 оценим медиану в 100 с и получим $\lambda^{(C2)} = 100 / \ln(2)^{1/k} \cong 120$ с.

Суточный цикл необходимости освещения $f^{(ocb)}(t)$ построим, учитывая метеорологические данные о времени восхода (t_{li}), заката (t_{dar}) солнца, длительности сумерек (Δt_{ocb}) для заданного периода года и географического положения объекта [24, 25]. В суточный цикл необходимости освещения включим область ночных «мертвых» часов (от 1:00 до 4:00), не зависящую от поры года. Простая аналитическая модель $f^{(ocb)}(t)$ может быть записана в виде

$$f^{(ocb)}(t) = 1 - 0,4 \left[\tanh\left(\frac{t-t_{li}}{\Delta t_{ocb}}\right) - \tanh\left(\frac{t-t_{dar}}{\Delta t_{ocb}}\right) + \tanh\left(\frac{t-t_{1h}}{\Delta t_{ocb}}\right) - \tanh\left(\frac{t-t_{4h}}{\Delta t_{ocb}}\right) \right]. \quad (4)$$

Заметим, что $f^{(ocb)}(t)$ везде больше нуля. Это отражает факт необходимости освещения закрытых, неосвещаемых помещений или работы дежурных источников света в любое время суток. Модель $f^{(ocb)}(t)$ может уточняться с учетом характеристик конкретных объектов.

Функции вероятности включения приборов построим на основании эмпирических трендовых (усредненных по достаточному интервалу времени) кривых электрической нагрузки объекта $f^{(\GammaЭН)}(t)$, приводимых в литературе. Эмпирическая кривая нормируется на величину электропотребления рассматриваемого объекта

$$f^{(C)}(t) = \alpha f^{(\GammaЭН)}(t), \quad (5)$$

где $\alpha = \bar{L}_{\text{сут}} / \int f^{(\GammaЭН)}(t) dt$.

С учетом модели (4) и заданного отношения средних мощностей приборов классов C0, C1 и C2 из $f^{(C)}(t)$ выделяются части, связанные с работой приборов разных классов. Мощность приборов класса C0 постоянна и равна $\tilde{P}^{(C0)}$. Кривые электропотребления приборов классов C1 и C2 связаны через функцию $f^{(ocb)}(t)$ $f^{(C1)}(t) = \beta f^{(C2)}(t) f^{(ocb)}(t)$. Учитывая баланс $f^{(C1)}(t) + f^{(C2)}(t) + \tilde{P}^{(C0)} = \alpha f^{(\GammaЭН)}(t)$, получим уравнения для графиков нагрузки:

$$f^{(C2)}(t) = \frac{\alpha f^{(\GammaЭН)}(t) - \tilde{P}^{(C0)}}{\beta f^{(ocb)}(t) + 1}; \quad (6)$$

$$f^{(C1)}(t) = \alpha f^{(\GammaЭН)}(t) - f^{(C2)}(t) - \tilde{P}^{(C0)}; \quad (7)$$

$$\beta = \bar{L}_{\text{сут}}^{(C1)} / \int f^{(C2)} f^{(ocb)}(t) dt. \quad (8)$$

Система (6)–(8) решается итерациями; для первой итерации полагаем, например, $\beta = 1 / \int f^{(ocb)}(t) dt$.

Другие объекты электропотребления, представляющие интерес для имитационного моделирования, такие как малые сельскохозяйственные или лесохозяйственные предприятия, труднее поддаются формальному описанию ввиду специфики производств. Кроме потребителей обозначенных выше классов С0, С1 и С2 на таких объектах можно ввести классы технологических электропотребителей – оборудования малой $\Delta P^{(C3)} = 0,5\text{--}10,0$ кВт, средней $\Delta P^{(C4)} = 10\text{--}100$ кВт и большой $\Delta P^{(C5)} = 100\text{--}1000$ кВт мощности. Диапазоны мощности и деление на классы здесь условны, не привязаны к нормативным документам промышленности. Временной закон включения/выключения технологических электропотребителей должен быть установлен с учетом особенностей процесса [26, 27].

Алгоритм имитационного моделирования нагрузки реализуется следующим образом. На первом этапе определяются суточные среднестатистические данные о потреблении электроэнергии приборами всех классов $\bar{L}_{\text{сут}}^{(C0)}$, $\bar{L}_{\text{сут}}^{(C1)}$, $\bar{L}_{\text{сут}}^{(C2)}$; число приборов всех классов $N^{(C0)}$, $N^{(C1)}$, $N^{(C2)}$. Находятся пронумерованные множества (массивы) мощностей отдельных приборов классов С1 $\{P_1^{(C)}, P_2^{(C)}, \dots, P_N^{(C)}\}$ и С2 $\{P_1^{(C)}, P_2^{(C)}, \dots, P_N^{(C)}\}$. Затем таблично или аналитически определяются: базовая функция – график электрической нагрузки объекта $f^{(\GammaЭН)}(t)$, функция необходимости освещения $f^{(\text{осв})}(t)$, задаются параметры функции плотности вероятности времени включения приборов классов С1 и С2 (в случае распределения Вейбулла $k^{(C1)}$, $\lambda^{(C1)}$ и $k^{(C2)}$, $\lambda^{(C2)}$).

На следующем этапе определяется количество раз включения приборов классов С1 и С2 в сутки. Для этого используется статистическое равенство

$$\bar{L}_{\text{сут}}^{(C)} = \sum_{i=1}^{V^{(C)}} P_{i\text{RAND}}^{(C)} \cdot M_{\text{WEI}}^{(C)}, \quad (9)$$

где $V^{(C)}$ – количество включений приборов класса С в сутки; $i\text{RAND}[1 \dots N^{(C)}]$ – целое случайное число из диапазона $[1 \dots N^{(C)}]$.

Число включений $V^{(C)}$ найдется путем последовательного суммирования (8) до минимизации выражения $\text{MIN} \left| \sum_{i=1}^{V^{(C)}} P_{i\text{RAND}}^{(C)} M_{\text{WEI}}^{(C)} - Q_{\text{сут}}^{(C)} \right|$.

Соблюдение условия минимизации требуется для получения несмещенной оценки $V^{(C)}$.

Зная $V^{(C)}$, генерируем соответствующее количество случайных чисел из суточного временного диапазона, вероятность которых промодулирована кривыми суточной нагрузки (6) и (7) (плотностью вероятности включения). Соответствующая процедура строится по методу обратной функции и обозначена нами $f\text{RAND}[0 \dots 86400, f^{(C)}]$, где диапазон 86400 соответствует количеству секунд в сутках. Затем генерируется $V^{(C)}$ случайных чисел $\text{WeibRAND}[k^{(C)}, \lambda^{(C)}]$, определяющих время нахождения соответствующих приборов во включенном состоянии. В результате получаем последовательность троек чисел (векторов), содержащих данные о приборе:

- 1) мощности;
- 2) времени включения;
- 3) времени выключения.

Данные заносятся в массив соответствующей размерности. Указанный набор векторов находится для всех классов электрических приборов, имеющихся на моделируемом объекте. Массивы дополняются друг другом таким образом, чтобы сформировался общий массив, содержащий данные обо всех случаях включения и выключения приборов за сутки.

Последним шагом алгоритма является сортировка векторов общего массива по возрастанию времени включения, в результате чего получаем модель электрической нагрузки системы в статистическом смысле, соответствующую заданным среднесуточным показателям нагрузки и реализующую уникальный вариант суточной электрической нагрузки данного объекта. Пример итогового варианта событий по алгоритму (10)–(13) показан в табл. 1. Для моделирования системы «генератор – накопитель – потребитель» методом Монте-Карло можем сгенерировать необходимое количество реализаций графика электрической нагрузки.

Пример сгенерированной последовательности включения и выключения потребителей класса С1

Example of generated on-off sequence for consumers of class C1

Показатель прибора	Номер события								
	1	2	3	4	5	6	7	...	$V^{(C)}$
Время включения, с	25	290	3677	4501	4557	9012	9288		81544
Время выключения, с	228	650	3988	4539	4977	9117	9703		82011
Мощность, Вт	17	99	33	19	105	22	155		27

Для проверки алгоритма необходимо убедиться в том, что интегральная характеристика j -й реализации модели $L_{сут,j}$ статистически сходится к исходному параметру модели $\bar{L}_{сут}$, т. е. выполняется условие

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n L_{сут,j} \right) = \bar{L}_{сут} \quad (10)$$

Сходимость последовательности реализации ГЭН к среднему потреблению электроэнергии в течение суток от среднего по n последовательным реализациям показана на рис. 1.

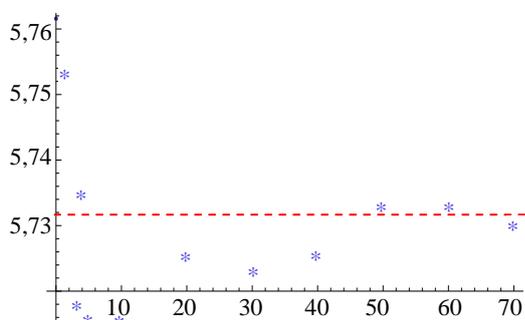


Рис. 1. Сходимость последовательности реализации графика электрических нагрузок к среднему потреблению электроэнергии в течение суток от среднего по n последовательным реализациям:

* – модель 30-квартирного дома, $\bar{L}_{сут} = 5,7321 \cdot 10^8$ Дж;
штриховая линия – среднесуточное потребление электроэнергии

Fig. 1. Convergence of sequence in realization of electric load diagram to average consumption of electric power within 24 hours according to average n sequential realizations: * – model of 30-apartment building,

$\bar{L}_{сут} = 5,7321 \cdot 10^8$ J; dashed line – average daily consumption of electric power

Из графика рис. 1 видно, что усредненные последовательности реализаций ГЭН хорошо

аппроксимируют среднее значение суточного потребления электроэнергии. Очевидно, что точность аппроксимации при большом количестве приборов высока и превышает характерную точность бытовых измерений параметров нагрузки. Для модельного 30-квартирного дома число включений приборов в течение суток колеблется в пределах 5900. Для объектов, на которых реализуется небольшое количество включений/выключений потребителей (десятки и сотни), точность аппроксимации будет меньше.

Расчет детального графика электрической нагрузки модельного объекта

Приведем пример оценки параметров модели и расчета имитационного ГЭН для объекта – многоквартирный дом. Для получения первичной информации проводили простейшее анкетирование. От группы граждан были получены анонимные сведения об электробытовом оснащении квартир, в которых они проживают, или квартир, с электробытовым оснащением которых они досконально знакомы. Все сведения собирали в электронную таблицу, как, например, табл. 2.

При достаточном объеме и репрезентативности такой информации могут быть построены достоверные корреляции величин A и B со всеми прочими параметрами, а следовательно, смоделированы любые жилищно-бытовые блоки. В качестве примера рассмотрим многоквартирный дом, в котором имеется 10 однокомнатных, 10 двухкомнатных и 10 трехкомнатных квартир. Используя полученные статистические данные, установили, что данный объект включает 137 потребителей класса С0, 218 – С1 и 178 – класса С2. Значения других входных параметров модели приведены в табл. 3.

Таблица 2

Данные для оценки параметров модели электрической нагрузки
Data for assessment of parameters for electric load model

Число проживающих в квартире <i>A</i>	Число жилых комнат <i>B</i>	Количество потребителей, шт., класса			Среднемесячный объем потребления электроэнергии, кВт·ч \tilde{L}_{month}
		C0	C1	C2	
		$N^{(C0)}$	$N^{(C1)}$	$N^{(C2)}$	

Таблица 3

Параметры статистической модели электрической нагрузки модельного 30-квартирного дома
Parameters of statistical electric load model for model 30-apartment building

Класс потребителя	Число потребителей	Среднесуточная мощность, кВт	Амплитуда вероятности включения	Модуль Вейбулла <i>k</i>	Параметр формы Вейбулла λ , с
C0	137	0,274	Const	–	–
C1	218	1,592	$f^{(C1)}(t)$, по (7)	2	1162
C2	178	4,776	$f^{(C2)}(t)$, по (6)	2	120
Параметры $f^{(ocb)}(t)$	$t_{ii} = 28800$ с; $t_{dar} = 64800$ с; $t_{1h} = 3600$ с; $t_{4h} = 1440$ с; $\Delta t_{ocb} = 3600$ с				

Для функции необходимости освещения используем модель (4) с метеорологическими параметрами, соответствующими середине декабря. В качестве $f^{(ГЭН)}(t)$ возьмем график суточного электропотребления многоквартирного дома серии Домкон-1 [10]. Используя эти данные и уравнения (6), (7), определяем функции вероятности $f^{(C1)}(t)$ и $f^{(C2)}(t)$ включения приборов классов C1 и C2. Далее, принимая параметры статистической модели из табл. 3, строим реализацию суточного графика нагрузки, создаваемой модельным 30-квартирным домом (рис. 2).

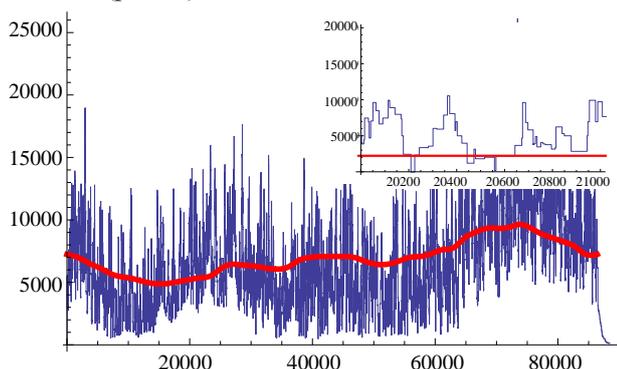


Рис. 2. Имитационный суточный график электрической нагрузки модельного многоквартирного дома: врезка – участок графика на интервале 20000–22000 с

Fig. 2. Simulation daily diagram of electric load for model multi-apartment building: insert – diagram section within interval 20000–22000 s

Приведенные на рис. 3, 4 графики являются уникальными реализациями модели потребления и могут быть использованы для имитационных и статистических исследований

локальных потребителей электроэнергии, отладки систем контроля и учета энергоресурсов (АСКУЭ), системы «генератор – накопитель – потребитель» и для других исследовательских целей.

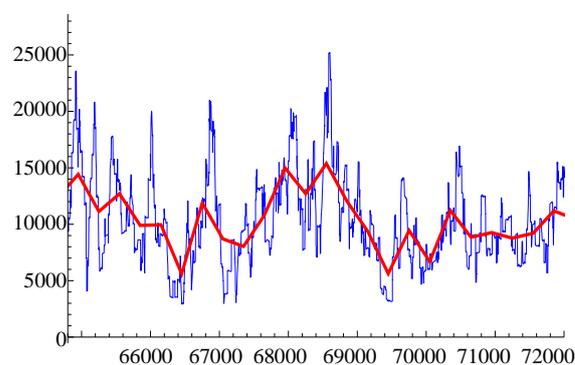


Рис. 3. Имитационный график нагрузки модельного многоквартирного дома: красная линия – 10-минутное усреднение имитационного графика

Fig. 3. Simulation diagram of load for model multi-apartment building: red line – 10-minute averaging of simulation diagram

Из графика видно, что для рассматриваемых систем кратковременные нагрузки могут существенно превосходить усредненные нагрузки даже при малых интервалах усреднения порядка 3–10 мин. Особенно заметен этот эффект при умеренном количестве потребителей (около сотни). В представленном на рис. 3 расчетном случае амплитуда отклонения от среднего достигает 1000 %, тогда как отклонение усредненной (10-минутное усреднение) кривой – до 25 %.

Выполнив дискретное преобразование Фурье, получим спектральную характеристику графика электрической нагрузки рассматриваемого объекта (рис. 4).

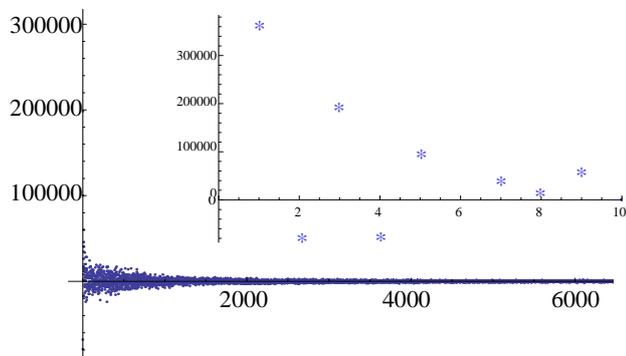


Рис. 4. Спектр дискретного cos-Фурье-преобразования имитационного суточного графика нагрузки модельного 30-квартирного жилого дома: врезка – амплитуды первых девяти дискретных частот cos-Фурье-спектра

Fig. 4. Spectrum of discrete cos-Fourier transformation of simulation daily load diagram for model 30-apartment building: insert – amplitude of first nine discrete frequencies of cos-Fourier spectrum

Как видно из рис. 4, спектр частот cos-Фурье-преобразования носит стохастический характер на всей области определения. Только на минимальных частотах имеются максимумы, которые отвечают низкочастотным суточным ритмам активности потребителей электроэнергии. В целом картина Фурье-спектра свидетельствует о стохастичности нагрузки и в этом смысле – о соответствии графика нагрузки предпосылкам модели. Увеличение количества потребителей не приводит к качественным изменениям дискретного cos-Фурье-спектра графика электрической нагрузки.

Рассмотрим автокорреляционную функцию (АФ) полученного графика нагрузки, позволяющую судить о качественных характеристиках кривой [28]. Расчет АФ проведем по формуле

$$K(m) = \frac{1}{n-m} \sum_{i=1}^{n-m} P_i \cdot P_{i+m} - P_c^2, \quad (11)$$

где P_i – значение случайной составляющей ГЭН в i -й момент времени при разбиении области, определенной ГЭН на n дискретных интервалах; P_{i+m} – значение в $(i+m)$ -й момент времени; P_c – среднее значение случайной составляющей ГЭН; m – сдвиг по времени в единицах дискретных интервалов разбиения ГЭН.

Нормированная АФ определена как $k(m) = \frac{K(m)}{K(0)}$. Расчетное значение нормированной автокорреляции $k(m)$ в зависимости от времени сдвига приведено на рис. 5.

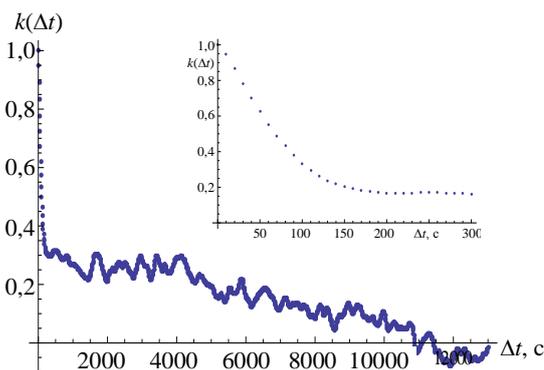


Рис. 5. Автокорреляционная функция имитационного графика нагрузки модельного 30-квартирного дома: врезка – участок графика для времени до 300 с

Fig. 5. Autocorrelation function of simulation load diagram for model 30-apartment building: insert – diagram section for time up to 300 s

Из графика рис. 5 видно, что АФ быстро падает до значения $K \sim 0,3$ при времени корреляции примерно 100 с, а затем продолжает убывать при времени порядка 4–6 ч. Заметим, что времена автокорреляции ГЭН многоквартирных домов, представленные в [9], составляют около 5 ч и фактически характеризуют трендовые периодические колебания ГЭН. На графике рис. 5 также присутствует 4-часовой масштаб автокорреляции, но при этом имеется 100-секундный масштаб автокорреляции, связанный с характерным временем включения/выключения мощных бытовых приборов. Очевидно, что данная особенность не может проявиться на графиках нагрузки, усредненных на интервалах 3, 10 и более минут.

ВЫВОДЫ

1. Изложен простой подход к детальному имитационному моделированию электропотребления относительно небольших объектов, таких как многоквартирный дом или небольшое сельскохозяйственное производство. Модель сформулирована как в физическом, так и в алгоритмическом виде, что позволяет легко реализовать ее в любой среде программирования. Показана сходимость интегрального потребления электроэнергии, задаваемого моделью, к статистически средним параметрам.

2. Расчет по предложенной модели показывает, что реальные кратковременные нагрузки, которые влияют на режим эксплуатации накопительных устройств, существенно отличаются от нагрузок, усредненных на масштабах времени порядка минут, и должны учитываться при проектировании накопителей для небольших автономных систем. На основе имитации графиков электрических нагрузок построены автокорреляционные функции. Показано, что такие

функции имеют два характерных масштаба автокорреляции – первый порядка 100 с и второй около 4–6 ч. Меньший масштаб связан с временем работы мощных бытовых приборов, относимых к классу С2, а больший масштаб соответствует суточному волнообразному ритму бытовой активности в многоквартирном доме.

3. Фурье-спектры сгенерированных графиков нагрузок в первую очередь демонстрируют наличие низкочастотных осцилляций потребления электроэнергии, связанных с указанными выше факторами. В остальной области частот Фурье-спектр является практически хаотичным, что свидетельствует о достаточно хорошем воспроизведении «случайности» событий включения/выключения нагрузки в модели.

4. Проведенные исследования – первый шаг для построения универсальной системы тестирования и оптимизации работы накопителей в различных системах «генератор – накопитель – потребитель». На основе приведенных алгоритмов может быть построена методика тестирования систем накопления энергии и оценки их эффективности при работе в заданных технико-экономических условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мировой рынок накопителей энергии [Электронный ресурс] // Региональная энергетическая консалтинговая компания. Режим доступа: <http://mig-energo.ru/diod/kineticheskie-nakopiteli-energii/mirovoj-gynok-nakopitelej-energii/>. Дата доступа: 15.01.2017.
2. О внесении изменений в постановление Совета Министров Республики Беларусь от 30 декабря 2013 г. № 1166 и определении тарифов на некоторые виды жилищно-коммунальных услуг [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Республики Беларусь, 16.12.2016, № 1035 [Электронный ресурс] // Национальный правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. Режим доступа: http://www.cgis.by/downloads/le_gislation/1035_20161216.pdf. Дата доступа: 15.01.2017.
3. Powerwall 2 [Electronic Resource] // Tesla Inc. Mode of Access: <https://www.tesla.com/powerwall>. Date of Access: 15.01.2017.
4. Electric Grid [Electronic Resource] // Altairnano Company. Mode of access: <http://www.altairnano.com/solutions/electric-grid/>. Date of Access: 15.01.2017.
5. Накопитель «Экомоторс» 7 кВт·ч [Электронный ресурс] // ООО «Экомоторс». Режим доступа: <http://ecomotors.ru/index.php?productID=2977>. Дата доступа: 15.01.2017.
6. A Review of Energy Storage Technologies for Wind Power Applications / F. Díaz-González [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. Vol. 16, No 4. P. 2154–2171.
7. Technology Overview on Electricity Storage: Overview on the Potential and on the Deployment Perspectives of Electricity Storage Technologies / G. Fuchs, B. Lunz, M. Leuthold, D. U. Sauer. Aachen: Smart Energy For Europe Platform GmbH (SEFEP), 2012. 66 p.
8. Оценка накопителей энергии с помощью их передаточных функций / К. В. Доброго [и др.] // Информационные технологии в технических и социально-экономических системах: сб. материалов науч.-практ. конф., Минск 22 апр. 2016 г. Минск: РИВШ, 2016. С. 102–104.
9. Stand-Alone and Hybrid Wind Energy Systems: Technology, Energy Storage and Applications / Ed. by J. L. Kaldellis. Woodhead Publishing Limited, 2010. P. 554.
10. Павлов, А. В. Повышение точности расчетов электрических нагрузок коммунально-бытовых потребителей микрорайонов мегаполисов / А. В. Павлов // НИИ имени М. И. Платова. Новочеркасск, 2016. 22 с.
11. Кудрин, Б. И. Расчет электрических нагрузок потребителей: история, состояние, комплексный метод / Б. И. Кудрин // Промышленная энергетика. 2015. № 5. С. 14–22.
12. Нормативы для определения расчетных электрических нагрузок зданий (квартир), коттеджей, микрорайонов (кварталов) застройки и элементов городской распределительной сети. Изменения и дополнения раздела 2 «Расчетные электрические нагрузки» Инструкции по проектированию городских электрических сетей: РД 34.20.185–94. Утв. приказом Минтопэнерго от 29.06.1999 № 213. М.: Москов. науч.-техн. общ-во энергетиков и электротех., 1999. 13 с.
13. Инструкция по проектированию городских электрических сетей: РД 34.20.185–94. М.: Мин-во топлива и энерг. Рос. Фед., 1994. 29 с.
14. Фокин, Ю. А. Вероятностно-статистические методы в расчетах систем электроснабжения / Ю. А. Фокин. – М.: Энергоатомиздат, 1985. 240 с.
15. Жежеленко, И. В. Развитие методов расчета электрических нагрузок / И. В. Жежеленко, В. П. Степанов // Электричество. 1993. № 2. С. 1–9.
16. Тарнижевский, М. В. Моделирование суточных графиков электрических нагрузок коммунально-бытовых потребителей методом ортогональных разложений / М. В. Тарнижевский, В. И. Михайлов // Электричество. 1985. № 5. С. 66–68.
17. Гнеденко, Б. В. Теоретико-вероятностные основы статистического метода расчета электрических нагрузок промышленных предприятий / Б. В. Гнеденко // Изв. вузов СССР, сер. «Электромеханика». 1961. № 1. С. 90–99.
18. Кабышев, А. В. Электроснабжение объектов. Ч. 1: Расчет электрических нагрузок, нагрев проводников и электрооборудования / А. В. Кабышев. Томск: Изд-во Томс. политехн. ун-та, 2007. 185 с.
19. Вероятностное потокораспределение как реакция на стохастичность нагрузки в энергосистеме / А. М. Гашимов [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 6. С. 519–528.
20. Лоскутов, А. Б. Методы имитационного моделирования графиков нагрузки на ЭВМ / А. Б. Лоскутов // Расчеты электрических нагрузок систем электроснабжения промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1992. С. 148–152.
21. Beccali, M. Forecasting Daily Urban Electric Load Profiles Using Artificial Neural Networks / M. Beccali // Journal on Energy Conversion and Management. 2004. Vol. 45, No 18–19. P. 2879–2900.
22. Справочник по теории вероятностей и математической статистике / В. С. Королюк [и др.]. М.: Наука, 1985. 640 с.
23. Weibull, W. A Statistical Distribution Function of Wide Applicability / W. Weibull // J. Appl. Mech.-Trans. ASME. 1951. Vol. 18, No 3. P. 293–297.
24. Задачник по общей метеорологии / А. Г. Броидо [и др.]. Л.: Гидрометеониздат, 1984. С. 312.
25. Almanac for Computers, 1990, publ. Nautical Almanac Office, United States Naval Observatory, Washington.
26. Лещинская, Т. Б. Электроснабжение сельского хозяйства / Т. Б. Лещинская, И. В. Наумов. М.: КолосС, 2008. 655 с.

27. Агеев, С. П. Расчет выбросов графиков нагрузки электрических сетей лесопильного цеха / С. П. Агеев // Изв. вузов, Электромеханика. 2013. № 5. С. 63–67.
28. Лобанова, О. В. Экспериментальная оценка корреляционных функций графиков электрической нагрузки / О. В. Лобанова, В. П. Степанов, Г. Л. Фомин // Изв. вузов. Электромеханика. 1996. № 3–4. С. 101.

Поступила 22.12.2016

Подписана в печать 21.02.2017

Опубликована онлайн 28.03.2017

REFERENCES

- World Market of Energy Accumulators System. *Regional Power Engineering Consulting Company*. Available at: <http://mig-energo.ru/diod/kineticheskie-nakopiteli-energii/mirovoj-rynok-nakopitelej-energii/>. (Accessed 15 January 2017) (in Russian).
- Decree of the Council of Ministers of the Republic of Belarus dated 16.12.2016 No 1035. *National Center of Legal Information*. Available at: <http://ncpi.gov.by/>. (Accessed 15 January 2017) (in Russian).
- Powerwall 2. *Tesla Inc*. Available at: <https://www.tesla.com/powerwall>. (Accessed 15 January 2017).
- Electric Grid. *Altairnano Company*. Available at: <http://www.altairnano.com/solutions/electric-grid/>. (Accessed 15 January 2017).
- 7 kW-h Accumulating System of “Ekomotors” Company. *LLC “Ekomotors”*. Available at: <http://ecomotors.ru/index.php?productID=2977>. (Accessed 15 January 2017).
- Díaz-González F., Sumper A., Gomis-Bellmunt O., Villa-fañila-Robles R. (2012) A Review of Energy Storage Technologies for Wind Power Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (4), 2154–2171. DOI: 10.1016/j.rser.2012.01.029.
- Fuchs G., Lunz B., Leuthold M., Sauer D. U. (2012) *Technology Overview on Electricity Storage: Overview on the Potential and on the Deployment Perspectives of Electricity Storage Technologies*. Aachen, Germany, Smart Energy For Europe Platform GmbH (SEFEP). 66. DOI: 10.13140/RG.2.1.5191.5925.
- Dobrego K. V., Chervinskii V. L., Poleshchuk V. A., Efremenko N. V. (2016) Assessment of Energy Accumulators with the Help of Their Transfer Functions. *Informatsionnye Tekhnologii v Tekhnicheskikh i Sotsialno-Ekonomicheskikh Sistemakh: Sb. Materialov Nauch.-Prakt. Konf., Minsk 22 apr. 2016 g.* [Information Technologies in Technical and Social and Economic Systems: Proceedings of Scientific and Practical Conference]. Minsk, Republican Institute for Higher School, 102–104 (in Russian).
- Kaldellis J. L. (ed.) (2010) *Stand-Alone and Hybrid Wind Energy Systems: Technology, Energy Storage and Applications*. Woodhead Publishing Limited, 554. DOI: 10.1533/9781845699628.
- Pavlov A. V. (2016) *Improvement of Accuracy in Calculation of Electric Loads for Communal and Household Consumers of Residential Complexes in Megalopolis*. Novocherkassk. 22 (in Russian).
- Kudrin B. I. (2015) Calculation of Electric Loads for Consumers: History, Current Position, Integrated Method. *Promyshlennaya Energetika* [Industrial Power Engineering], (5), 14–22 (in Russian).
- Norms and Regulations for Determination of Design Electric Loads for Buildings (Apartments), Cottages, Residential Complexes (House Blocks) of Urban Development and Elements of Urban Power Distribution Network. Alterations and Additions to Section 2 “Design Electric Loads”. Engineering Instructions on Urban Power Network ПД 34.20.185–94. Approved by the Order of Ministry of Fuel and Energy of the Russian Federation Dated 29.06.1999 No 213. Moscow, Publishing House of “Moscow Scientific and Technical Association of Power Electrical Engineers”, 1999. 13 (in Russian).
- ПД 34.20.185–94. Engineering Instructions on Urban Power Network. Moscow, Publishing House of “Ministry of Fuel and Energy of the Russian Federation”, 1994. 29 (in Russian).
- Fokin Yu. A. (1985) *Probabilistic and Statistical Methods for Calculation of Power Supply Systems*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 240 (in Russian).
- Zhezhenko I. V., Stepanov V. P. (1993) *Development of Methods for Calculation of Electric Loads*. *Elektrichestvo* [Electricity], (2), 1–9 (in Russian).
- Tarnizhevsky M. V., Mikhailov V. I. (1985) Simulation of Daily Load Diagrams for Communal and Household Consumers while Using Method of Orthogonal Decompositions. *Elektrichestvo* [Electricity], (5), 66–68 (in Russian).
- Gnedenko B. V. (1961) Theoretical and Probabilistic Fundamentals of Statistical Method for Calculation of Electric Loads at Industrial Enterprises. *Izv. Vuzov SSSR. Ser. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], (1), 90–99 (in Russian).
- Kabyshev A. V. (2007) *Electric Power Supply of Installations. Part. 1. Calculation of Electric Loads, Heating of Conductors and Electrical Equipment*. Tomsk, Publishing House of Tomsk Polytechnic University. 185 (in Russian).
- Hashimov A. M., Rakhmanov N. R., Guliyev G. B., Rakhmanov R. N., Mustafayev A.A. (2016) Probabilistic Flow Distribution as Reaction to Load Stochasticity in Electric Power System. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (6), 519–528 (in Russian). DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-6-519-528.
- Loskutov A. B. (1992) Methods for Imitation Modeling of Load Diagrams while Using Electronic Computing Machine. *Calculations of Electric Loads for Electric Power Supply Systems of Industrial Enterprises*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 148–152 (in Russian).
- Beccali M. (2004) Forecasting Daily Urban Electric Load Profiles Using Artificial Neural Networks. *Journal on Energy Conversion and Management*, 45 (18–19), 2879–2900. DOI: 10.1016/j.enconman.2004.01.006.
- Korolyuk V. S., Portenko N. I., Skorokhod A. V., Turbin A. F. (1985) *Reference Book on Probability Theory and Mathematical Statistics*. Moscow, Nauka Publ. 640 (in Russian).
- Weibull W. A (1951) Statistical Distribution Function of Wide Applicability. *J. Appl. Mech.-Trans. ASME*, 18 (3), 293–297.
- Broido A. G., Zvereva S. V., Kurbatova A. V., Ushakova T. V., Morachevskii V. G. (1984) *Problem Book on General Meteorology*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ. 312 (in Russian).
- Almanac for Computers, 1990, publ. Nautical Almanac Office, United States Naval Observatory, Washington.
- Leshchinskaya T. B., Naumov I. V. (2008) *Electric Power Supply of Agriculture*. Moscow, KolosS Publ. 655 (in Russian).
- Ageev S. P. (2013) Calculation of Emissions for Load Diagrams of Electrical Power Network at Saw Mill. *Izvestiya Vuzov. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], (5), 63–67 (in Russian).
- Lobanova O. V., Stepanov V. P., Fomin G. L. (1996) Experimental Assessment of Correlation Functions for Electric Load Diagrams. *Izvestiya Vuzov. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], (3–4), 101 (in Russian).

Received: 22.12.2016

Accepted: 21.02.2017

Published online: 28.03.2017