

УДК 519.213

DOI: [10.26102/2310-6018/2024.46.3.034](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.46.3.034)

Моделирование стохастической нагрузки в жилом секторе

А.В. Боровский, А.А. Юменчук✉

Байкальский государственный университет, Иркутск, Российская Федерация

Резюме. Спрос на электроэнергию в электрической сети меняется в зависимости от времени суток и потребностей потребителей. Реагирование на спрос – это изменение кривой потребительской нагрузки, сопровождающееся изменением цены на электроэнергию, в основном используемое поставщиками для ограничения пиков потребления. Уменьшение краткосрочного несоответствия между производством и потреблением помогает интегрировать в энергосистему возобновляемые источники электроэнергии, различные низкоуглеродные технологии, аккумуляторное хранение электроэнергии и электромобили. Одним из инструментов, используемых для сохранения баланса между производством и потреблением электроэнергии, являются умные счетчики, работающие в интеллектуальной сети. Подобные устройства широко распространены в США и странах Европейского союза, в том числе в жилом секторе. В Российской Федерации в настоящий момент внедрение интеллектуальных сетей в жилом секторе только начинается. В статье рассмотрена стохастическая модель потребления электроэнергии бытовыми приборами на основе теории сверток. Выполнен замер потребляемой мощности наиболее распространенными бытовыми приборами. Приведены несколько примеров составления профилей потребителей на основе полученных данных. Выявлены барьеры, возникающие при внедрении интеллектуальных систем энергоснабжения в Российской Федерации, а также причины, в связи с которыми растет заинтересованность поставщиков электроэнергии в интеллектуальных системах энергоснабжения.

Ключевые слова: стохастические модели, прогнозирование спроса, многоступенчатая нагрузка, интеллектуальная сеть, график энергопотребления.

Для цитирования: Боровский А.В., Юменчук А.А. Моделирование стохастической нагрузки в жилом секторе. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2024;12(2). URL: <https://moitvivr.ru/ru/journal/pdf?id=1573> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.45.2.034

Stochastic load modeling in the residential sector

A.V. Borovskiy, A.A. Yumenchuk✉

Baikal State University, Irkutsk, the Russian Federation

Abstract. The power demand on the electric grid varies depending on the time of day and the needs of consumers. Demand response is a change in the consumer load curve accompanied by a change of price, used primarily by suppliers to limit consumption peaks. Reducing the short-term mismatch between production and consumption helps to integrate renewable energy sources, various low-carbon technologies, battery storage of electricity and electric vehicles into the electric grid. One of the tools used to maintain a balance between electricity production and consumption is smart meters, which operating in smart grid. Such devices are widespread in the United States and the European Union, in the residential sector too. At the moment, the introduction of smart grids in the residential sector is just beginning in the Russian Federation. The article considers a stochastic model of electricity consumption by household appliances, based on the convolution theory. The measurement of power consumption by the most common household appliances has been performed. Several examples of consumer profiling based on the obtained data are given. The barriers that arise during the implementation of smart grids in the Russian Federation are identified, as well as the reasons why the interest of electricity suppliers in smart grids is growing.

Keywords: stochastic models, demand forecasting, multi-stage load, smart grid, energy consumption graph.

For citation: Borovskiy A.V., Yumenchuk A.A. Stochastic load modeling in the residential sector. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1573> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.45.2.034 (In Russ.).

Введение

К инструментам реагирования на спрос относятся особые тарифы и программы, внедряемые для стимулирования конечных потребителей к уменьшению объема энергопотребления в периоды высоких цен на электроэнергию, а также переноса нагрузки на период времени, когда спрос ниже. В Российской Федерации к таким инструментам относятся дифференцированные тарифы, такие как одноставочный тариф, дифференцированный по двум зонам суток (дневной и ночной) и дифференцированный по трем зонам суток (пиковой, полупиковой и ночной). А при использовании наиболее распространенного одноставочного тарифа без дифференциации у конечных потребителей нет никаких стимулов менять структуру потребления, так как цена на электроэнергию всегда остается неизменной. Реагирование на спрос на текущий момент получило наибольшее распространение в странах США и ЕС [1]. Это связано с внедрением в этих странах интеллектуальных сетей, возобновляемых источников электроэнергии, а также повсеместной установкой умных счетчиков. В Российской Федерации постепенно начинается внедрение интеллектуальных систем энергоснабжения и умных счетчиков, что подтверждается принятием Федерального закона от 27 декабря 2018 г. № 522-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с развитием систем учета электрической энергии (мощности) в Российской Федерации». Во всех регионах РФ, начиная с 1 июля 2020 г., при выходе из строя, истечении срока эксплуатации приборы учета электроэнергии должны быть заменены на новые, которые обеспечивают возможность их присоединения к интеллектуальным системам учета электрической энергии (мощности), в соответствии с требованиями, установленными правилами предоставления доступа к минимальному набору функций интеллектуальных систем учета электрической энергии. В связи с этим приобретают повышенный интерес модели имитационного моделирования электрической нагрузки в жилом секторе. Вероятностные модели энергопотребления рассматривались в различных научных трудах, в некоторых из них в роли потребителей электроэнергии аналогично выступали бытовые приборы небольших домохозяйств [2–4].

Общая формула для стохастической нагрузки при включении одинаковых устройств

Для решения задач реагирования на изменение спроса и прогнозирования энергопотребления нужно брать в расчет не одного потребителя, а сразу несколько тысяч или десятков тысяч. В этом случае необходимо разработать модель энергопотребления, так как простое суммирование нагрузок приведет к недостоверному результату энергопотребления.

Пусть имеется функция $f(t)$, которая описывает энергопотребление бытового устройства (мощность, потребляемая устройством, как функция времени). Если включить одновременно N одинаковых устройств, то получим суммарную функцию энергопотребления:

$$F(t) = N \cdot f(t). \quad (1)$$

Если проинтегрировать функцию $f(t)$ на всем интервале времени включения устройства:

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)dt = \varepsilon, \quad (2)$$

то получим количество потребленной энергии одним устройством ε .

В реальности устройства включают со сдвигом по времени Δt , причем этот сдвиг по времени является случайной величиной. Это означает, что количество одновременно включаемых устройств со сдвигом по времени описывается вероятностью $g(\Delta t)d\Delta t$. Здесь $g(\Delta t)$ -плотность вероятности, которая нормирована на единицу:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} g(\Delta t)d\Delta t = 1. \quad (3)$$

При включении устройства со сдвигом по времени Δt функция потребления электроэнергии будет равна $f(t - \Delta t)$. Причем, если $\Delta t > 0$, то сдвиг вправо по оси времени, если $\Delta t < 0$, то сдвиг влево по оси времени. Количество включаемых устройств будет равно $N \cdot g(\Delta t)d\Delta t$. Чтобы получить функцию потребления при наличии сдвигов по времени нужно перемножить указанные функции и проинтегрировать по всем сдвигам:

$$F(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t - \Delta t)Ng(\Delta t)d\Delta t = N \int_{-\infty}^{+\infty} f(t - \Delta t)g(\Delta t)d\Delta t. \quad (4)$$

Без потери общности можно переобозначить $\Delta t \equiv t'$. В этом случае запишем:

$$F(t) = N \int_{-\infty}^{+\infty} f(t - t')g(t')dt'. \quad (5)$$

Выражение (5) в математике носит название «свёртки» двух функций. Для случайных процессов $g(t')$ может иметь вид нормального распределения:

$$g(t') = \frac{1}{\sqrt{\pi}\Delta t'} e^{-\left(\frac{t'}{\Delta t'}\right)^2}, \quad (6)$$

где $\Delta t'$ - экспоненциальная полуширина распределения.

Предельные случаи: нагрузка в виде δ – функции, функция распределения в виде δ – функции

1. Предельный переход к одновременному включению нагрузки.

В формуле для стохастической нагрузки (5) перейдем к узкой функции распределения:

$$g(t') \rightarrow \delta(t'). \quad (7)$$

Такая функция является бесконечно узкой, и одновременно бесконечной высокой, а интеграл от нее равен 1:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t')dt' = 1. \quad (8)$$

δ -функция была введена английским физиком П. Дираком в 20-х годах прошлого века. Математически δ -функция выкалывает одну единственную точку $t' = 0$ на оси времени. Интегрирование в формуле (5) при переходе к использованию δ -функции приобретает вид:

$$\begin{aligned} F(t) &= N \int_{-\infty}^{+\infty} f(t - t')\delta(t')dt' = N \int_{-\infty}^{+\infty} f(t - t')\Big|_{t'=0} \cdot \delta(t')dt' = \\ &= N \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\delta(t')dt' = N \cdot f(t) \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t')dt' = N \cdot f(t). \end{aligned} \quad (9)$$

2. Переход к случаю узкой нагрузки.

Случай узкой нагрузки реализуется при выполнении условия $\tau \ll \Delta t$, когда длительность нагрузки много меньше полуширины функции распределения.

В этом случае:

$$f(t - t') \rightarrow \varepsilon \cdot \delta(t - t'), \quad (10)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(t - t') dt' = \varepsilon \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t - t') dt' = \varepsilon. \quad (11)$$

Интеграл в (5) преобразуется следующим образом:

$$F(t) = N \int_{-\infty}^{+\infty} f(t - t') g(t') dt' \rightarrow N \varepsilon \int_{-\infty}^{+\infty} g(t') \delta(t - t') dt' = N \varepsilon g(t). \quad (12)$$

Для нормального распределения:

$$F(t) = \frac{N \varepsilon}{\sqrt{\pi} \Delta t} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\Delta t}\right)^2}. \quad (13)$$

Закон сохранения энергии в случае стохастической нагрузки

При повторном интегрировании получим суммарную энергию, которая выделяется при включении N приборов:

$$E_{\Sigma} = \int_{-\infty}^{+\infty} N f(t) dt = N \varepsilon, \quad (14)$$

$$E_{\Sigma} = \int_{-\infty}^{+\infty} N \varepsilon g(t) dt = N \varepsilon. \quad (15)$$

Энергия при включении произвольной нагрузки:

$$E_{\Sigma} = \int_{-\infty}^{+\infty} F(t) dt. \quad (16)$$

Подставим в (16) выражение (5):

$$E_{\Sigma} = \int_{-\infty}^{+\infty} N \int_{-\infty}^{+\infty} f(t - t') g(t') dt' dt. \quad (17)$$

Переставим местами интегралы:

$$E_{\Sigma} = N \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} f(t - t') dt \right\} g(t') dt' = N \int_{-\infty}^{+\infty} \varepsilon g(t') dt' = N \varepsilon. \quad (18)$$

Интеграл в фигурных скобках равен энергии ε , выделяемой одним прибором. Интеграл от функции распределения $g(t')$ равен 1.

Стохастическое включение (выключение) постоянной нагрузки

Если приборы включаются в среднем вокруг момента времени $t = 0$:

$$F(t) = N \int_{-\infty}^{+\infty} f(t - t') g(t') dt'. \quad (19)$$

Если приборы включаются вокруг момента $t = t_1$:

$$F(t - t_1) = N \int_{-\infty}^{+\infty} f(t - t_1 - t') g(t') dt'. \quad (20)$$

Распределение нагрузки по сдвигам по времени t' :

$$g(t') = \frac{1}{\sqrt{\pi} \Delta t} e^{-\frac{(t')^2}{\Delta t^2}}, \quad (21)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} g(t') dt' = 1, \quad (22)$$

здесь Δt – экспоненциальная полуширина распределения (21).

При включении постоянной единичной нагрузки:

$$F(t) = N \int_{-\infty}^{+\infty} \theta(t-t')g(t')dt' = N \int_{-\infty}^t g(t')dt' = \frac{N}{2} \{1 + \operatorname{erf}(t/\Delta t)\}, \quad (23)$$

где $\theta(t-t')$ – функция Хэвисайда.

При выключении постоянной нагрузки:

$$\begin{aligned} F(t) &= N \int_{-\infty}^{+\infty} [1 - \theta(t-t')]g(t')dt' = N - \frac{N}{2} \{1 + \operatorname{erf}(t/\Delta t)\} = \\ &= \frac{N}{2} \{1 - \operatorname{erf}(t/\Delta t)\}. \end{aligned} \quad (24)$$

Стохастическое описание многоступенчатой нагрузки

Нагрузка от включения N прямоугольников высотой a :

$$F(t) = Na \int_{-\infty}^{+\infty} [\theta((t-t_1)-t') - \theta((t-t_2)-t')]g(t')dt', \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \frac{F(t)}{Na} &= \int_{-\infty}^{+\infty} \theta((t-t_1)-t')g(t')dt' - \theta((t-t_2)-t')g(t')dt' = \\ &= \frac{1}{2} [1 + \operatorname{erf}(t-t_1/\Delta t)] - \frac{1}{2} [1 + \operatorname{erf}(t-t_2/\Delta t)] = \frac{1}{2} [\operatorname{erf}(t-t_1/\Delta t) - \operatorname{erf}(t-t_2/\Delta t)], \end{aligned} \quad (26)$$

здесь $t_2 - t_1 = \tau$.

Рассмотрим предел $\tau \rightarrow 0$; $\tau \ll \Delta t$:

$$\begin{aligned} \frac{F(t)}{Na} &= \frac{1}{2} [\operatorname{erf}(t-t_1/\Delta t) - \operatorname{erf}(t-t_1/\Delta t - \frac{\tau}{\Delta t})] = \\ &= \frac{\tau}{2\Delta t} \cdot \frac{\operatorname{erf}(t-t_1/\Delta t) - \operatorname{erf}(t-t_1/\Delta t - \frac{\tau}{\Delta t})}{\frac{\tau}{\Delta t}} = \frac{\tau}{2\Delta t} \cdot \frac{d}{dx} \operatorname{erf}(x) \Big|_{x=t-t_1/\Delta t} = \\ &= \frac{\tau}{2\Delta t} \cdot \frac{d}{dx} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-y^2} dy \Big|_{x=t-t_1/\Delta t} = (t_2 - t_1) \frac{1}{\sqrt{\pi}\Delta t} e^{-\left(\frac{t-t_1}{\Delta t}\right)^2}, \end{aligned} \quad (27)$$

$$F(t) = N\varepsilon \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi}\Delta t} e^{-\left(\frac{t-t_1}{\Delta t}\right)^2}. \quad (28)$$

Здесь прямоугольники распределены по гауссовскому закону. Каждый несет энергию $\varepsilon = a(t_2 - t_1)$.

Возьмем интеграл

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} F(t)dt = \int_{-\infty}^{+\infty} N\varepsilon \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi}\Delta t} e^{-\left(\frac{t-t_1}{\Delta t}\right)^2} dt = N\varepsilon \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-\left(\frac{t-t_1}{\Delta t}\right)^2} d\frac{t}{\Delta t} \right\} = N\varepsilon \cdot 1. \quad (29)$$

Таким образом, потребление энергии составляет:

$$E = N\varepsilon, \quad (30)$$

где $\varepsilon = a \cdot (t_2 - t_1)$.

Ступенчатая нагрузка из 3-х прямоугольников:

$$\begin{aligned} \frac{F(t)}{N} &= \frac{a_1}{2} [\operatorname{erf}(t-t_1/\Delta t) - \operatorname{erf}(t-t_2/\Delta t)] + \frac{a_2}{2} [\operatorname{erf}(t-t_2/\Delta t) - \operatorname{erf}(t-t_3/\Delta t)] + \\ &+ \frac{a_3}{2} [\operatorname{erf}(t-t_3/\Delta t) - \operatorname{erf}(t-t_4/\Delta t)]. \end{aligned} \quad (31)$$

При $\tau_i \ll \Delta t$ получим формулу:

$$F(t) = \frac{N}{\sqrt{\pi}\Delta t} [\tau_1 a_1 e^{-\left(\frac{t-t_1}{\Delta t}\right)^2} + \tau_2 a_2 e^{-\left(\frac{t-t_2}{\Delta t}\right)^2} + \tau_3 a_3 e^{-\left(\frac{t-t_3}{\Delta t}\right)^2}]. \quad (32)$$

После взятия интеграла по распределению вероятностей:

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} F(t)dt = N(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) = N(a_1\tau_1 + a_2\tau_2 + a_3\tau_3) = N\varepsilon_{\Sigma}. \quad (33)$$

Формулы (31)–(33) элементарно обобщаются на большее количество ступеней нагрузки.

Стохастическое описание линейно-нарастающей нагрузки

Коэффициенты a, b связаны с p, q соотношением (Рисунок 1):

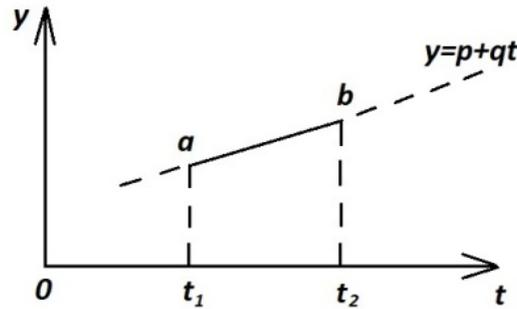


Рисунок 1 – График линейно-нарастающей нагрузки
Figure 1 – Linearly increasing load graph

$$q = \frac{b-a}{\tau}, \quad (34)$$

$$p = \frac{at_2 - bt_1}{\tau}, \quad (35)$$

$$\tau = t_2 - t_1. \quad (36)$$

Энергия равна площади трапеции:

$$\varepsilon = \frac{a+b}{2} \cdot (t_2 - t_1) = \frac{a+b}{2} \cdot \tau = \left[p + q(t_1 + t_2) \frac{1}{2} \right] \cdot \tau = p \cdot \tau + \frac{q}{2} (t_2^2 - t_1^2). \quad (37)$$

Описание линейной нагрузки:

$$f(t) = y(t) \cdot [\theta(t - t_1) - \theta(t - t_2)]. \quad (38)$$

В квадратных скобках – описание столбика единичной высоты с шириной $\tau = t_2 - t_1$.

$\theta(t - t_1), \theta(t - t_2)$ – функции Хэвисайда.

Подставим (38) в формулу для стохастической нагрузки (5):

$$F(t) = N \int_{-\infty}^{+\infty} y(t-t') [\theta(t-t_1-t') - \theta(t-t_2-t')] g(t') dt', \quad (39)$$

$$F(t) = I_1 - I_2. \quad (40)$$

Найдём I_1 :

$$\begin{aligned} I_1(t) &= N \int_{-\infty}^{+\infty} y(t-t') \theta(t-t_1-t') g(t') dt' = N \int_{-\infty}^{t-t_1} y(t-t') g(t') dt' = \\ &= N \int_{-\infty}^{t-t_1} [p + q(t-t')] \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi} \cdot \Delta t} \cdot e^{-\left(\frac{t'}{\Delta t}\right)^2} dt' = N \frac{(p + qt)}{\sqrt{\pi} \cdot \Delta t} \int_{-\infty}^{t-t_1} \cdot e^{-\left(\frac{t'}{\Delta t}\right)^2} dt' - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 -\frac{q}{\sqrt{\pi} \cdot \Delta t} \int_{-\infty}^{t-t_1} e^{-\left(\frac{t'}{\Delta t}\right)^2} t' dt' &= N \frac{(p+qt)}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{t-t_1} e^{-x^2} dx - \frac{q}{2\sqrt{\pi}} \cdot \Delta t \int_{-\infty}^{t-t_1} (-1) de^{-\left(\frac{t'}{\Delta t}\right)^2} = \\
 &= N \frac{(p+qt)}{2} \cdot \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{t-t_1}{\Delta t}\right)\right] + N \frac{q\Delta t}{2\sqrt{\pi}} e^{-\left(\frac{t-t_1}{\Delta t}\right)^2}. \quad (41)
 \end{aligned}$$

Аналогично вычисляется I_2 :

$$I_2(t) = N \frac{(p+qt)}{2} \cdot \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{t-t_2}{\Delta t}\right)\right] + N \frac{q\Delta t}{2\sqrt{\pi}} e^{-\left(\frac{t-t_2}{\Delta t}\right)^2}. \quad (42)$$

Функция стохастической нагрузки находится вычитанием:

$$F(t) = N \frac{(p+qt)}{2} \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{t-t_1}{\Delta t}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{t-t_2}{\Delta t}\right)\right] + N \frac{q\Delta t}{2\sqrt{\pi}} \left[e^{-\left(\frac{t-t_1}{\Delta t}\right)^2} - e^{-\left(\frac{t-t_2}{\Delta t}\right)^2}\right]. \quad (43)$$

Отличие случая линейной нагрузки от случая постоянной нагрузки заключается в появлении второго слагаемого с экспонентами в (43) и множителя $(p+qt)$ вместо постоянного коэффициента a .

Графики нагрузки для отдельных бытовых приборов

Авторы статьи с помощью измерительных блоков-ваттметров провели собственное наблюдение за энергопотреблением бытовых приборов в одной из квартир в течение 24 часов одних суток. Авторы рассматривают именно 24-часовой интервал, так как данный интервал длительностью в одни сутки используется в качестве стандартного для удобного представления данных в общедоступных базах данных энергопотребления, а также при формировании журналов энергопотребления умными счетчиками [5]. На начальном этапе наблюдения производились за энергопотреблением в одной квартире, в дальнейшем авторы планируют провести наблюдения за энергопотреблением многоквартирного дома в целом.

Результаты измерений представлены в Таблице 1, Таблице 2 и на Рисунке 2. Значение напряжения в сети при измерениях составило 217 В.

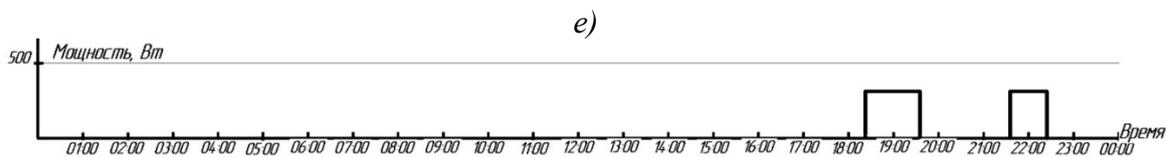
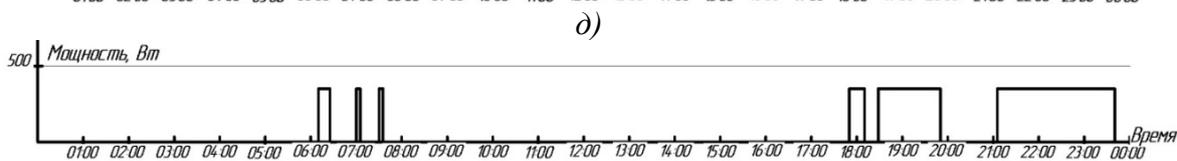
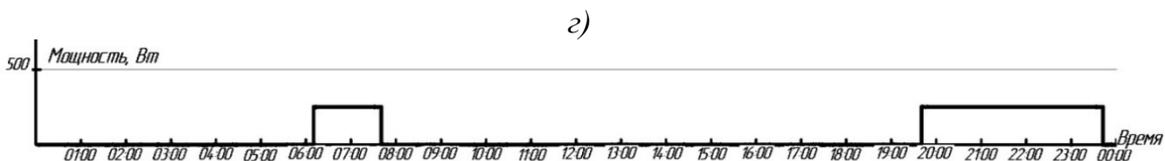
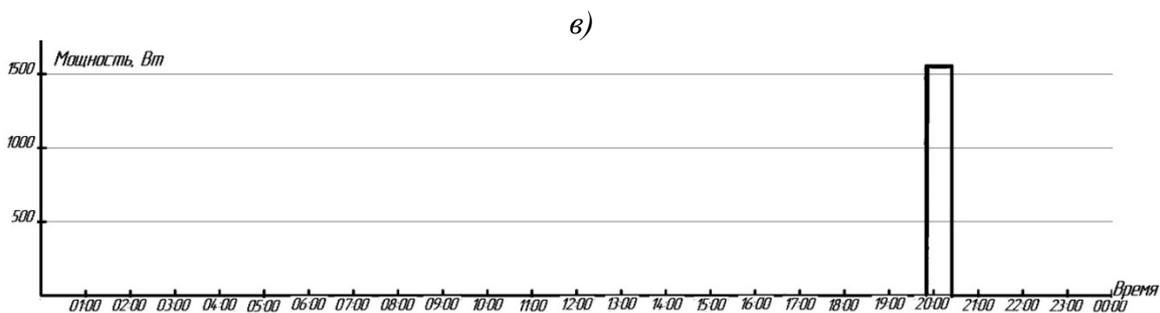
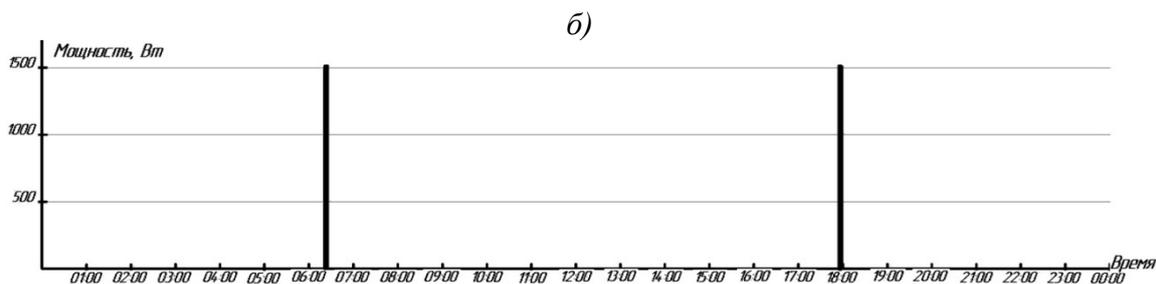
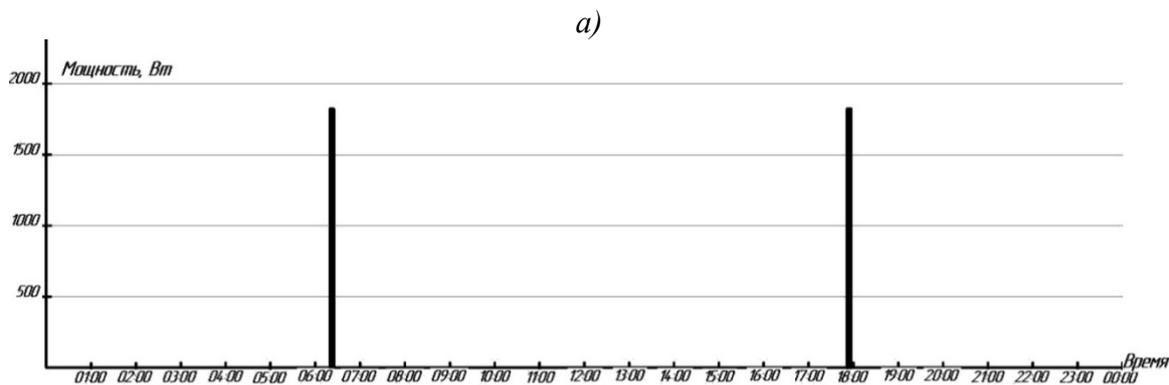
Таблица 1 – Мощность, потребляемая бытовыми приборами

Table 1 – Capacity of the household appliances

Прибор	Потребляемая мощность, Вт
Чайник	1820
Микроволновая печь	1510
Плита	1550 (одна конфорка)
Светодиодная лампа	14
Кондиционер	350
Компьютер	46 (режим ожидания), 190–280 (во время работы)
Монитор	42
Фен	970 (средняя мощность), 1560 (высокая мощность)
Стиральная машина	62 (стирка), 1460 (нагрев воды), 121 (отжим)
Посудомоечная машина	47 (мойка), 1580 (нагрев воды), 28 (ополаскивание, слив)
Холодильник	185

Таблица 2 – Журнал энергопотребления
Table 2 – Energyconsumptionlog

Прибор	Потребляемая мощность, Вт	Время начала работы	Время окончания работы	Кол-во приборов
Холодильник	185	1:12	1:27	1
Холодильник	185	4:26	4:41	1
Светодиодные лампы	252	6:10	7:40	18
Кондиционер	350	6:10	6:25	1
Чайник	1820	6:20	6:24	1
Микроволновая печь	1510	6:22	6:24	1
Холодильник	185	6:23	6:38	1
Кондиционер	350	7:00	7:05	1
Кондиционер	350	7:30	7:35	1
Холодильник	185	10:22	10:37	1
Холодильник	185	13:01	13:16	1
Холодильник	185	16:07	16:22	1
Кондиционер	350	17:50	18:10	1
Чайник	1820	17:52	17:56	1
Микроволновая печь	1510	17:55	17:57	1
Холодильник	185	17:56	18:11	1
Компьютер	270	18:22	19:35	1
Монитор	42	18:22	19:35	1
Кондиционер	350	18:28	19:50	1
Светодиодные лампы	252	19:40	23:42	18
Холодильник	185	19:44	19:59	1
Плита	1550	19:50	20:25	1
Посудомоечная машина	47	20:40	20:43	1
Посудомоечная машина	1580	20:43	20:55	1
Посудомоечная машина	47	20:55	21:01	1
Посудомоечная машина	1580	21:01	21:05	1
Посудомоечная машина	28	21:05	21:10	1
Фен	970	20:55	21:00	1
Стиральная машина	62	21:00	21:06	1
Стиральная машина	1460	21:06	21:08	1
Стиральная машина	62	21:08	21:25	1
Стиральная машина	121	21:25	21:30	1
Кондиционер	350	21:05	23:40	1
Холодильник	185	21:12	21:27	1
Компьютер	270	21:35	22:24	1
Монитор	42	21:35	22:24	1
Холодильник	185	22:40	22:55	1



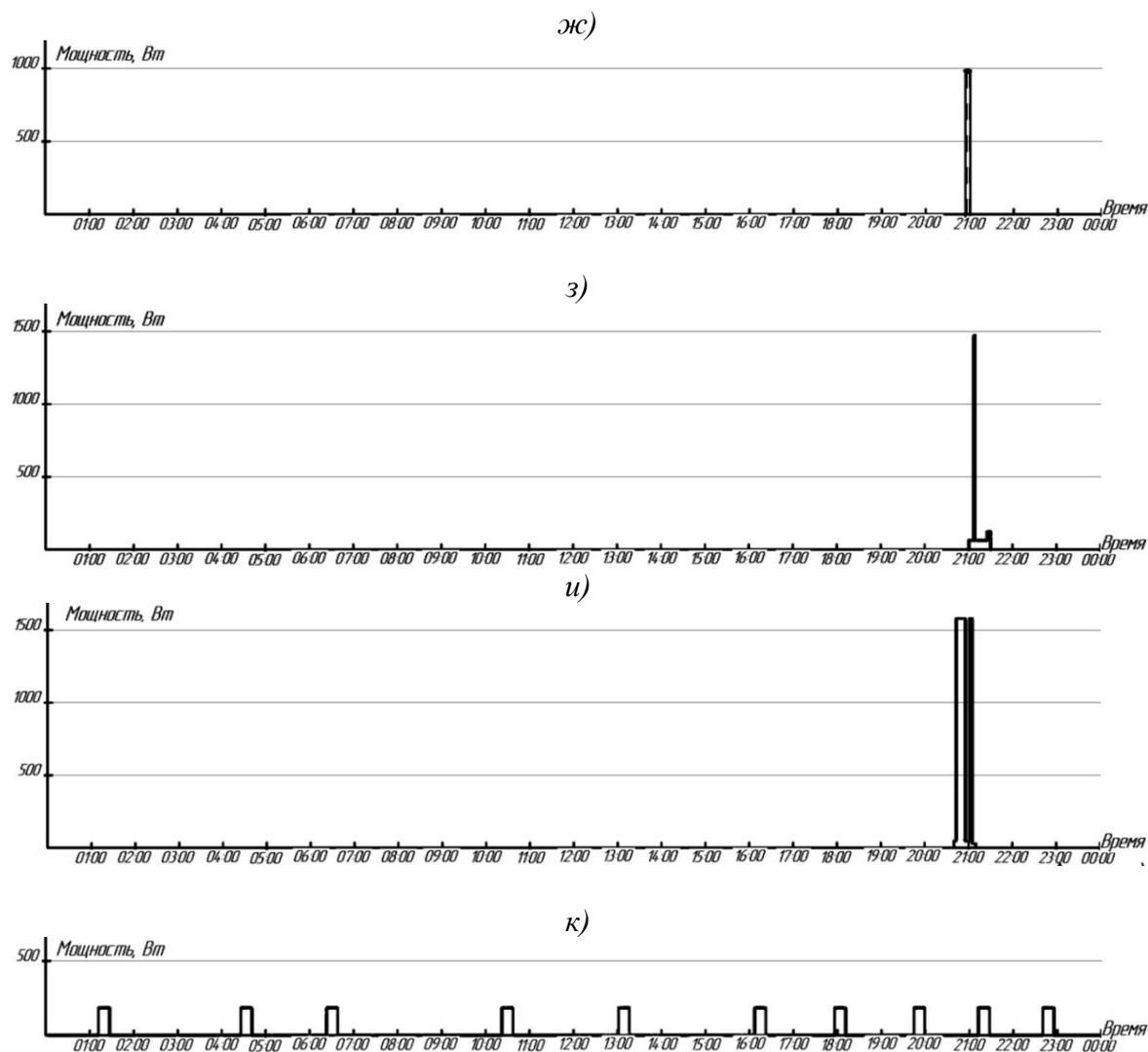


Рисунок 2 – График энергопотребления: а) чайника; б) микроволновой печи; в) плиты (одна конфорка); з) светодиодных ламп; д) кондиционера; е) компьютера с монитором; жс) фена; з) стиральной машины; и) посудомоечной машины; к) холодильника.

Figure 2 – The schedule of energy consumption of: а) a kettle; б) a microwave oven; в) a stove (one burner); з) LED lamps; д) an air conditioner; е) a personal computer; жс) a hair dryer; з) a washing machine; и) a dishwasher; к) a refrigerator.

Для проведения измерений было выбрано 11 типов наиболее распространенных бытовых приборов. Как видно из графиков энергопотребления (Рисунок 2), большинство приборов потребляют электроэнергию только тогда, когда люди находятся в помещении. Исключение могут составлять холодильное оборудование, климатическая техника и обогреватели.

Моделирование стохастической ступенчатой нагрузки

В качестве примера рассмотрим циклы работы посудомоечных и стиральных машин. Данные о циклах работы приборов приведены в Таблицах 3 и 4.

Таблица 3 – Цикл работы посудомоечной машины
Table 3 – The cycle of work of the dishwasher

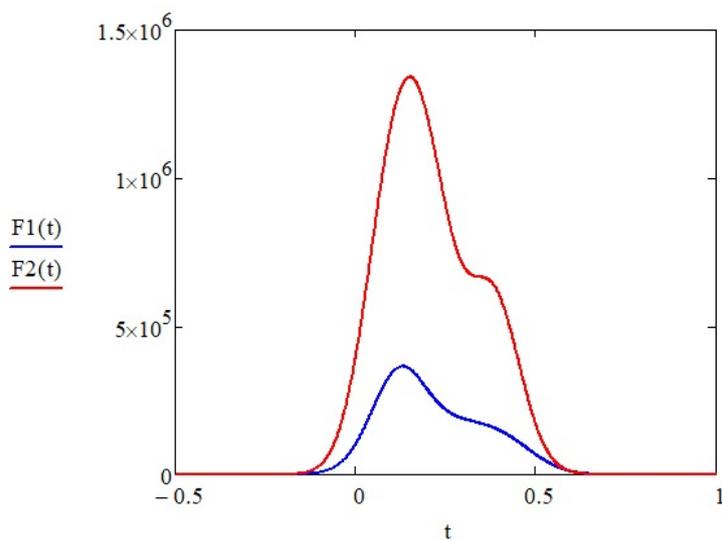
Время начала работы	Время окончания работы	Потребляемая мощность, Вт	Тип операции
20:40	20:43	47	Набор воды, ополаскивание
20:43	20:55	1580	Нагрев воды, мойка
20:55	21:01	47	Мойка
21:01	21:05	1580	Нагрев воды, мойка
21:05	21:10	28	Ополаскивание, слив воды

Таблица 4 – Цикл работы стиральной машины
Table 4 – The cycle of work of the washing machine

Время начала работы	Время окончания работы	Потребляемая мощность, Вт	Тип операции
21:00	21:06	62	Набор воды, стирка
21:06	21:08	1460	Нагрев воды, стирка
21:08	21:25	62	Стирка
21:25	21:30	121	Отжим, слив воды

Построим графики энергопотребления посудомоечных и стиральных машин (Рисунок 3), подставив значения в формулу (31). Возьмем число устройств $N = 1000$.

a)



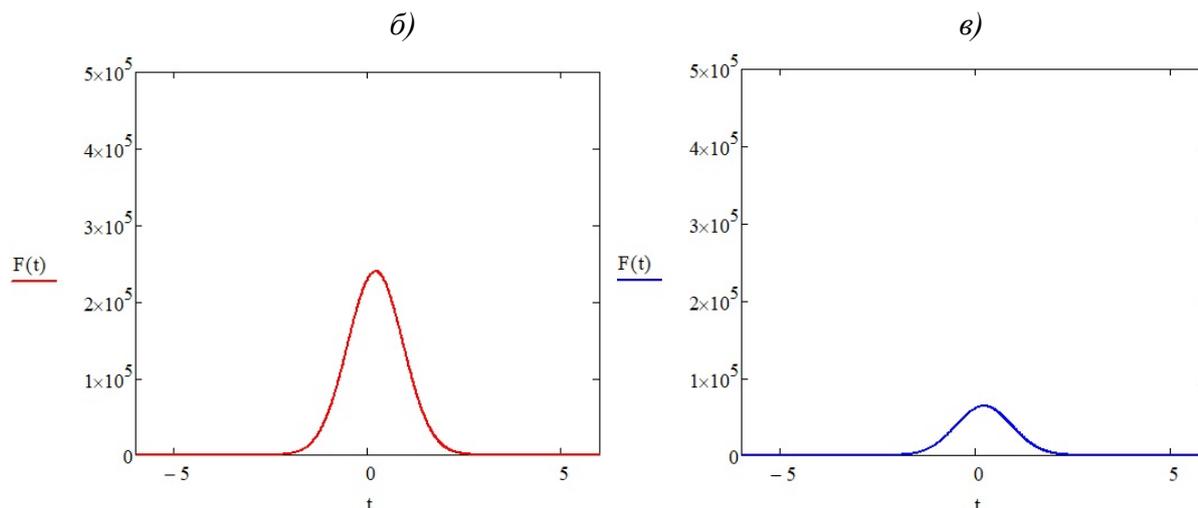


Рисунок 3 – Функция энергопотребления $F(t)$: а) для 1000 посудомоечных машин (красным), для 1000 стиральных машин (синим), $\Delta t = 0,1$ часа; б) для 1000 посудомоечных машин, $\Delta t = 1$ час; в) для 1000 стиральных машин, $\Delta t = 1$ час
 Figure3 – Energy consumption function $F(t)$: а) for 1000 dishwashers (red line), for 1000 washing machines (blue line), $\Delta t = 0.1$ hour; б) for 1000 dishwashers, $\Delta t = 1$ hour; в) for 1000 washing machines, $\Delta t = 1$ hour

Как видно из графиков (Рисунок 3), если устройства включаются в течение достаточно долгого интервала времени (Рисунок 3 б, в), то график энергопотребления «размывается» и максимальная потребляемая мощность не достигает таких больших значений, как в случае, если устройства включаются в течение нескольких минут (Рисунок 3 а).

Моделирование стохастической нагрузки на фоне майнинга

Для подавляющего большинства квартир в жилых домах, гаражей и других построек физических лиц, предназначенных для бытовых и иных нужд, не связанных с осуществлением предпринимательской деятельности, энергоснабжающая организация устанавливает ограничение на максимальную потребляемую мощность до 15 кВт¹. Однако с ростом популярности криптовалют участились случаи выявления у физических лиц оборудования, связанного с их добычей. При этом счета выставлялись по тарифу для населения, а не по тарифу для осуществления коммерческой деятельности, в связи с чем регулярно появляются новости о выявлении случаев нецелевого использования электроэнергии.

В жилых объектах популярность обрел способ добычи криптовалют с помощью видеокарт (GPU), которые установлены в большинстве современных компьютеров и ноутбуков. В качестве примера возьмем результаты измерения энергопотребления бытовых приборов (Рисунок 2) и добавим к ним энергопотребление нескольких компьютеров с установленными GPU для добычи криптовалют суммарной мощностью в 3000 Вт. График суммарного энергопотребления объекта в данном случае будет иметь вид, как на Рисунке 4.

¹В соответствии с п. 35 «Правил предоставления коммунальных услуг собственникам и пользователям помещений в многоквартирных домах и жилых домов», утвержденных Постановлением Правительства Российской Федерации от 6 мая 2011 г. N 354

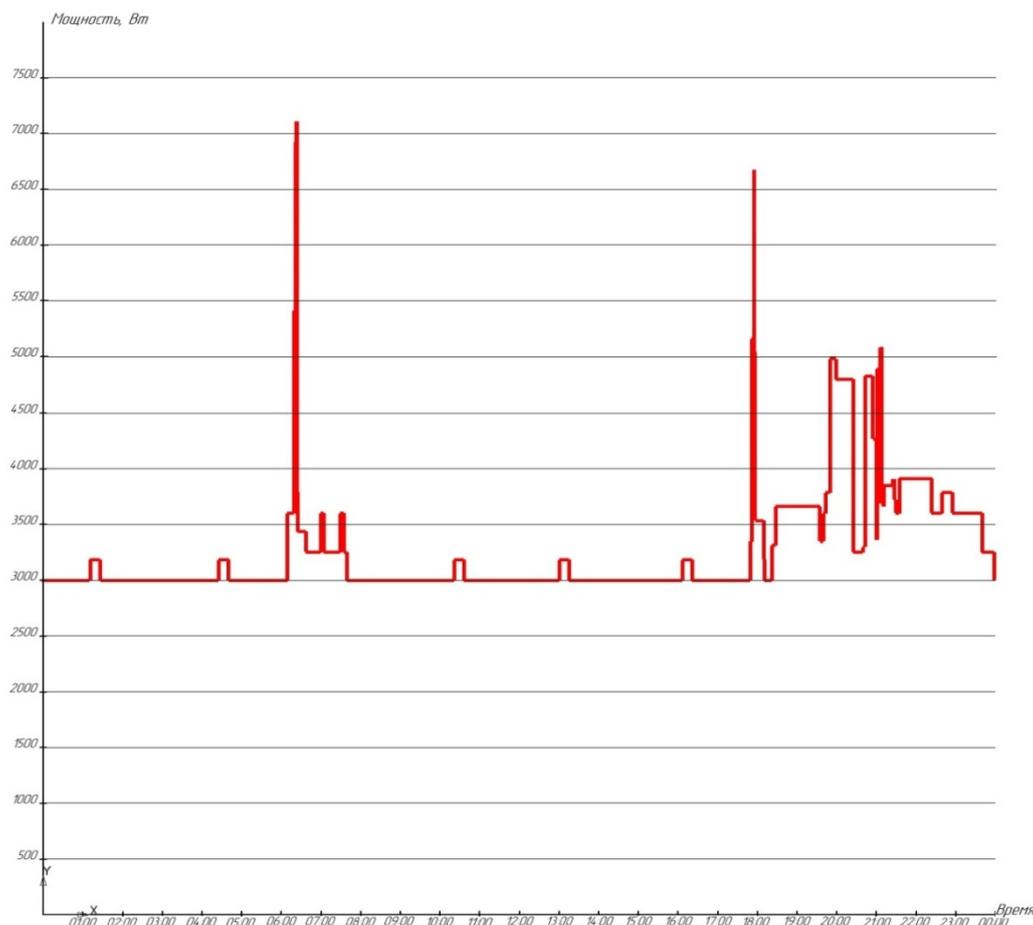


Рисунок 4 – График суммарного энергопотребления бытовых приборов совместно с оборудованием для добычи криптовалют мощностью в 3000 Вт
Figure 4 – The graph of the total energy consumption of household appliances and mining devices with a capacity of 3000 watts

На графике суммарного энергопотребления (Рисунок 4) видно, насколько колоссальную нагрузку на сеть создают устройства для добычи криптовалют по сравнению с устройствами, используемыми для бытовых нужд. Поэтому выявление нагрузки, связанной с добычей криптовалют в жилом секторе, крайне важно для энергоснабжающих организаций, а следовательно, вопросы, касающиеся мониторинга, анализа и прогнозирования энергопотребления в жилом секторе являются актуальными и востребованными.

Варианты нагрузки для отдельных квартир

Еще одним из результатов измерений энергопотребления, проведенного авторами статьи, стал график суммарного энергопотребления в одной из квартир за 24 часа одних суток. Данный график будет иметь вид, приведенный на Рисунке 4, только без постоянной нагрузки в 3000 Вт, создаваемой оборудованием для добычи криптовалют.

Стоит отметить, что на фоне продвижения государствами «интеллектуальных» сетей и принятия многочисленных инвестиционных программ стало появляться большое число общедоступных баз данных энергопотребления, которые могут свободно использовать любые лица для своих научных исследований. В качестве примеров таких баз данных можно выделить: Tracebase, SmartStar, AMPD, ECO, Greend [5]. Также существует несколько моделей электрической нагрузки, в которых потребителями

являются бытовые приборы небольших домохозяйств, аналогичные тем, графики энергопотребления которых приведены на Рисунке 2 [2–4].

Большинство умных счетчиков, используемых в интеллектуальных сетях, производят замер почасового потребления электроэнергии и формируют журналы энергопотребления (аналогичные приведенному в Таблице 2), а также обеспечивают двустороннюю связь между поставщиками и потребителями электроэнергии [6, 7]. На основании журналов энергопотребления могут быть составлены профили потребителей (Рисунок 5), характеризующие траты электроэнергии в отдельных квартирах или частных домах. Цифры обозначают количество киловатт-часов, которые были потреблены конкретным устройством у потребителя.

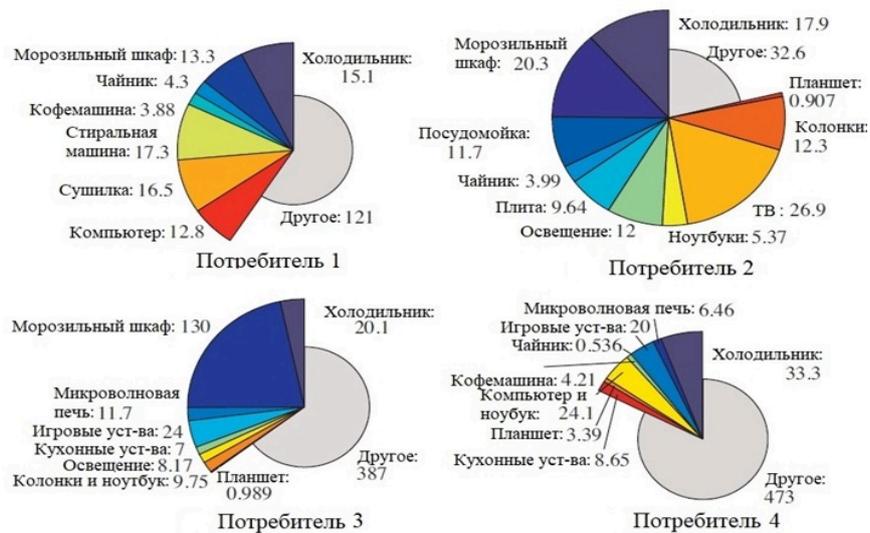


Рисунок 5 – Пример составления профилей потребителей
Figure 5 – An example of compiling consumer profiles

Коммунальные службы США и Европейского Союза широко используют умные счетчики. Так, согласно отчету Управления Электроэнергетики США (EnergyInformationAdministration), к 2021 году в США было установлено около 111 миллионов умных счетчиков, и около 88 % из них – в жилом секторе. В ЕС в 2018 году по официальным данным общее количество установленных умных счетчиков составило примерно 99 миллионов. При этом используется динамическое ценообразование, то есть цена электроэнергии зависит от типа клиента (жилой или производственный сектор), его местоположения, времени суток и времени года. Такой принцип используется, чтобы сбалансировать использование услуг для снижения риска отключения электроэнергии [6, 7]. Благодаря обратной связи клиенты лучше осведомлены о структуре своих расходов на использование электроприборов, и могут вносить коррективы в график потребления электроэнергии, чтобы снизить счета и добиться сокращения потребления [8, 9]. Кроме того, с помощью создания профилей типичного потребления, поставщики электроэнергии могут достаточно точно прогнозировать спрос на электроэнергию, использовать динамическое ценообразование, а также подготовиться к сезонным скачкам энергопотребления, например, в сильные холода или аномальную жару.

Заключение

В данной статье на основе теории сверток составлена модель потребления электроэнергии, в которой в роли потребителей электроэнергии выступают наиболее

распространенные среди населения бытовые приборы. Выполнено моделирование ступенчатой нагрузки, создаваемой бытовыми устройствами в отдельном районе города (на примере стиральных и посудомоечных машин). Моделирование выполнялось на основе журналов энергопотребления, составленных авторами статьи с помощью измерительных блоков-ваттметров. При использовании данных, собираемых аналогичными измерительными блоками-ваттметрами или интеллектуальными счетчиками, возможно составление профилей потребителей, которые в перспективе могут увеличить точность составления прогнозов потребления электроэнергии (Рисунок 5).

Система, активно использующая инструменты реагирования на изменение спроса и динамическое ценообразование, позволяет очень эффективно ограничивать пиковую нагрузку и колебание спроса, что в свою очередь увеличивает энергоэффективность, снижает потери электроэнергии, позволяет внедрять возобновляемые источники электроэнергии, способствует широкому распространению инфраструктуры для электромобилей, уменьшает финансовые затраты на эксплуатацию и обслуживание энергосистемы. В случае внезапного скачка нагрузки, во время аномальной жары, сильных холодов или чрезвычайных ситуаций цена на электроэнергию будет подвержена меньшим колебаниям. Однако, на текущий момент как в Российской Федерации, так и в странах ЕС и США большинство действующих программ изменения тарифов и ограничения потребления касаются только крупных промышленных потребителей, а программы и инструменты, влияющие на потребление домохозяйств и малых коммерческих предприятий только начинают внедрять. Основным барьером на пути развития систем реагирования на изменение спроса в Российской Федерации являются главным образом отсутствие крупных инвестиционных затрат на разработку, модернизацию и внедрение интеллектуальных систем энергоснабжения, низкая распространенность возобновляемых источников электроэнергии, климатические особенности регионов и особенности проектирования и застройки территорий городов. В противовес этому появляется заинтересованность поставщиков электроэнергии в интеллектуальных системах энергоснабжения, что связано с потенциальной ощутимой финансовой выгодой в связи с уменьшением затрат на содержание энергосистемы, развивающейся инфраструктурой для электромобилей [10], с увеличением числа выявлений нецелевого использования электроэнергии и ее хищения при добыче криптовалют. Развитию интеллектуальных сетей также способствует принятие Правительством РФ различных программ субсидирования и федеральных законов, связанных с интеллектуальными системами учета, а также легализацией и расчетами в криптовалютах: № 522-ФЗ от 27.12.2018 «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с развитием систем учета электрической энергии (мощности) в Российской Федерации»; № 259-ФЗ от 31.07.2020 «О цифровых финансовых активах, цифровой валюте и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» и № 45-ФЗ от 11.03.2024 «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», позволяющий использовать цифровые финансовые активы в международных расчетах; и других.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Binyet E., Chiu M.-Ch., Hsu H.-W., Lee M.-Y., Wen Ch.-Yu. Potential of Demand Response for Power Reallocation, a Literature Review. *Energies*. 2022;15(3). <https://doi.org/10.3390/en15030863>
2. Доброго К.В. Модель электрической нагрузки жилищно-коммунального объекта для исследования систем «генератор – накопитель – потребитель» методом Монте-

- Карло. *Наука и техника*. 2017;16(2):160–170. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-2-160-170>
- Dobrego K.V. Model for Electric Load of Community Housing Projects to Investigate «Generator – Accumulator – Consumer» System while Using Monte-Carlo Method. *Nauka i tekhnika = Science and Technique*. 2017;16(2):160–170. (In Russ.). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-2-160-170>
3. Кузнецов Б.Ф., Клибанова Ю.Ю., Сукьясов С.В., Луговнина В.В. Построение стохастической модели бытовой нагрузки на примере водонагревателя. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(5):958–966. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-958-966>
- Kuznetsov B.F., Klibanova Yu.Yu., Sukyaysov S.V., Lugovnina V.V. Building a stochastic model of residential load on example of a water heater. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(5):958–966. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-958-966>
4. Тарнижевский М.В., Михайлов В.И. Моделирование суточных графиков электрических нагрузок коммунально-бытовых потребителей методом ортогональных разложений. *Электричество*. 1985;(5):66–68.
- Tarnizhevskii M.V., Mikhailov V.I. Modelirovanie sutochnykh grafikov elektricheskikh nagruzok kommunal'no-bytovykh potrebitel'ei metodom ortogonal'nykh razlozhenii. *Elektrichestvo*. 1985;(5):66–68. (In Russ.).
5. Боровский А.В., Юменчук А.А. Стохастические модели потребления электроэнергии. *System Analysis & Mathematical Modeling*. 2024;6(1):31–46. [https://doi.org/10.17150/2713-1734.2024.6\(1\).31-46](https://doi.org/10.17150/2713-1734.2024.6(1).31-46)
- Borovsky A.V., Yumenchuk A.A. Stochastic Models of Electricity Consumption. *System Analysis & Mathematical Modeling*. 2024;6(1):31–46. (In Russ.). [https://doi.org/10.17150/2713-1734.2024.6\(1\).31-46](https://doi.org/10.17150/2713-1734.2024.6(1).31-46)
6. Hussain M.M., Akram R., Memon Z.A., Nazir M.H., Javed W., Siddique M. Demand Side Management Techniques for Home Energy Management Systems for Smart Cities. *Sustainability*. 2021;13(21). <https://doi.org/10.3390/su132111740>
7. Mansouri M.R., Simab M., Bahmani Firouzi B. Impact of Demand Response on Reliability Enhancement in Distribution Networks. *Sustainability*. 2021;13(23). <https://doi.org/10.3390/su132313201>
8. Cortés-Cediel M.E., Cantador I., Rodríguez Bolívar M.P. Analyzing Citizen Participation and Engagement in European Smart Cities. *Social Science Computer Review*. 2019;39(4). <https://doi.org/10.1177/0894439319877478>
9. Rodríguez Bolívar M.P., Alcaide Muñoz C., Alcaide Muñoz L. Identifying Strategic Planning Patterns of Smart Initiatives. An Empirical Research in Spanish Smart Cities. *Electronic Government*. 2020;12219:374–386. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57599-1_28
10. Шкитина Н., Акимов Д. Анализ влияния стохастической нагрузки электромобилей на распределительную сеть. *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2021;(1):40–45.
- Shkitina N., Akimov D. Analiz vliyaniya stokhasticheskoi nagruzki elektromobilei na raspredelitel'nyuyu set'. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie = Electric Power. Transmission and Distribution*. 2021;(1):40–45. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Боровский Андрей Викторович, доктор физико-математических наук, профессор Байкальского государственного университета, Иркутск, Российская Федерация.
e-mail: andrei-borovskii@mail.ru

Andrey V. Borovskiy, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of Baikal State University, Irkutsk, the Russian Federation.

Юменчук Андрей Анатольевич, аспирант Байкальского государственного университета, Иркутск, Российская Федерация.
e-mail: andrey.yumenchuk@mail.ru

Andrey A. Yumenchuk, Graduate Student, Baikal State University, Irkutsk, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 08.05.2024; одобрена после рецензирования 24.05.2024; принята к публикации 28.05.2024.

The article was submitted 08.05.2024; approved after reviewing 24.05.2024; accepted for publication 28.05.2024.