

УДК 519.213

DOI: [10.26102/2310-6018/2024.47.4.034](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.47.4.034)

## Модель стохастической электрической нагрузки в жилом секторе с использованием плотности вероятности Вейбулла

А.В. Боровский, А.А. Юменчук✉

*Байкальский государственный университет, Иркутск, Российская Федерация*

**Резюме.** В статье предлагается способ имитационного моделирования суточных графиков электрических нагрузок в жилом секторе на основе теории сверток. Рассматриваются модели с использованием плотности вероятности Вейбулла и плотности вероятности нормального распределения для сдвигов по времени включения домашних приборов. Целью является выбор модели, результаты применения которой наиболее точно соответствуют реальному энергопотреблению в жилом секторе. Рассматривается энергопотребление бытовых приборов, выполняется сравнение результатов без сдвига и со сдвигом плотности вероятности Вейбулла. Определяется корректный вариант сравнения результатов имитационного моделирования с использованием плотности вероятности Вейбулла с результатами моделирования с использованием плотности вероятности нормального распределения. Далее рассматривается энергопотребление домохозяйств в сельской местности, учитывается работа электрических отопительных приборов, что позволяет провести имитационное моделирование энергопотребления населенных пунктов или их отдельных районов. Результаты сопоставляются с реальными данными энергопотребления поселка. По итогам работы выбрана модель, наиболее точно отражающая реальную динамику изменения уровней энергопотребления в жилом секторе. Описаны причины, по которым сделан выбор в ее пользу. Продемонстрирована достаточная точность имитационного моделирования с использованием выбранной модели.

**Ключевые слова:** стохастические модели энергопотребления, имитационное моделирование, суточный график энергопотребления, плотность вероятности Вейбулла, нормальное распределение.

**Для цитирования:** Боровский А.В., Юменчук А.А. Модель стохастической электрической нагрузки в жилом секторе с использованием плотности вероятности Вейбулла. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2024;12(4). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1755> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.47.4.034

## Model of stochastic electrical load in the residential sector using the Weibull probability density function

A.V. Borovskiy, A.A. Yumenchuk✉

*Baikal State University, Irkutsk, the Russian Federation*

**Abstract.** The article proposes a method for simulating daily schedules of electrical loads in the residential sector based on convolution theory. The authors consider models using the Weibull probability density and the probability density of the normal distribution for shifts in the time of switching on household appliances. The goal is to select a model, the results of which most accurately correspond to the actual energy consumption in the residential sector. First, the energy consumption of household appliances is considered, and the results are compared without a shift and with a shift in the Weibull probability density. The correct variant of comparing the results of simulation modeling using the Weibull probability density with the results of modeling using the probability density of the normal distribution is determined. Next, the energy consumption of households in rural areas is considered, which takes into account the use of electric heating devices by the population. This makes it possible to carry out simulation modeling of energy consumption of settlements or their individual areas. The results

are compared with real data on the energy consumption of the village. Based on the results of the work, a model was selected that most accurately reflects the real dynamics of changes in energy consumption levels in the residential sector. The reasons why the choice was made in favor of one of the models are described. Sufficient accuracy of simulation modeling using the selected model has been demonstrated.

**Keywords:** stochastic energy consumption models, simulation modeling, daily energy consumption schedule, Weibull probability density, normal distribution.

**For citation:** Borovskiy A.V., Yumenchuk A.A. Model of stochastic electrical load in the residential sector using the Weibull probability density function. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(4). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1755> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.47.4.034

## Введение

Объемы потребления электроэнергии в коммунально-бытовом секторе зависят от большого числа случайных факторов, таких как местоположение потребителя, время года, время суток, день недели, режим трудовой деятельности населения и другие. Заинтересованность поставщиков электроэнергии в моделях и решениях, позволяющих достаточно точно прогнозировать потребление электроэнергии, связана с потенциальной ощутимой финансовой выгодой в связи с уменьшением затрат на содержание энергосистемы. Сложность разработки точного прогноза увеличивает труднопрогнозируемый скачкообразный рост энергопотребления на цели добычи криптовалют, а также развитие инфраструктуры зарядных станций для электромобилей.

Ранее авторами моделировалось энергопотребление домохозяйств на основе свертки функции плотности вероятности нормального распределения для временных смещений включения домашних электрических приборов со ступенчатой (прямоугольной) функцией энергопотребления, описываемой разностью двух функций Хевисайда [1]. Сравнение результатов имитационного моделирования с реальным графиком энергопотребления показало затягивание правого хвоста у реальных данных. Это указывает на необходимость замены плотности вероятности нормального распределения на асимметричную функцию.

В связи с этим, авторами в данной статье произведена замена плотности вероятности нормального распределения на плотность вероятности Вейбулла для временных смещений включения бытовых электроприборов. Функция плотности вероятности Вейбулла является асимметричной и имеет затянутый правый хвост. Она широко используется в промышленной инженерии, электротехнике, анализе надежности, гидрологии, а также в различных аспектах здравоохранения [2–7].

## Общая формула для стохастической нагрузки при включении одинаковых устройств

Плотность вероятности распределения Вейбулла имеет следующий вид:

$$g(t; \lambda; k) = \left(\frac{k}{\lambda}\right) \left(\frac{t}{\lambda}\right)^{(k-1)} e^{-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^k}, t > 0, \quad (1)$$

где  $k$  – параметр формы;  $\lambda$  – параметр масштаба распределения Вейбулла.

При включении устройства со сдвигом по времени  $\Delta t$  функция потребления электроэнергии будет равна  $f(t - \Delta t)$ . Причем, если  $\Delta t > 0$ , то сдвиг вправо 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:

$$F(t) = \int_0^{+\infty} f(t - \Delta t) N g(\Delta t) d\Delta t = N \int_0^{+\infty} f(t - \Delta t) g(\Delta t) d\Delta t. \quad (2)$$

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

$$F(t) = N \int_0^{+\infty} f(t - t') g(t') dt'. \quad (3)$$

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

$$E_{\Sigma} = N \int_0^{+\infty} \left\{ \int_0^{+\infty} f(t - t') dt' \right\} g(t') dt' = N \int_0^{+\infty} \varepsilon g(t') dt' = N\varepsilon. \quad (4)$$

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

### Точка максимума, величина максимума плотности вероятности Вейбулла

Для корректного сравнения нормального распределения и распределения Вейбулла нужно совмещать точки максимума. Для отыскания точки максимума распределения Вейбулла приравняем к нулю производную:

$$\{(k-1)(t/\lambda)^{(k-2)} - k(t/\lambda)^{(k-1)}(t/\lambda)^{(k-1)}\} = 0, \quad (5)$$

$$(t/\lambda)^{(k)} = \frac{k-1}{k}, \quad (6)$$

$$t' = \lambda e^{\frac{1}{k} \ln \frac{k-1}{k}}. \quad (7)$$

Максимальное значение:

$$g(t') = (k/\lambda)(t'/\lambda)^{(k-1)} e^{-(t'/\lambda)^k} = (k/\lambda) \left(\frac{k-1}{k}\right)^{\frac{1}{k}(k-1)} e^{-\frac{k-1}{k}} = \frac{k-1}{e\lambda} \left(\frac{ek}{k-1}\right)^{\frac{1}{k}}. \quad (8)$$

### Ширина плотности вероятности Вейбулла

Ширина плотности вероятности Вейбулла на полувывоте определяется из уравнения:

$$g(t) = \frac{1}{2} g(t'), \quad (9)$$

$$\left(\frac{k}{\lambda}\right) \left(\frac{t}{\lambda}\right)^{(k-1)} e^{-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^k} = \frac{k-1}{2e\lambda} \left(\frac{ek}{k-1}\right)^{\frac{1}{k}}, \quad (10)$$

$$(t/\lambda)^{(k-1)} e^{-(t/\lambda)^k} = \frac{1}{2} \left(\frac{k-1}{k}\right) \left(\frac{k}{k-1}\right)^{\frac{1}{k}} e^{\frac{1}{k}-1} = \frac{1}{2} \left(\frac{ek}{k-1}\right)^{\frac{1}{k}-1}. \quad (11)$$

Рассмотрим переменную:

$$z = t/\lambda. \quad (12)$$

Уравнение для определения  $z$  имеет вид:

$$z^{(k-1)} e^{-z^k} = \frac{1}{2} \left(\frac{ek}{k-1}\right)^{\frac{1}{k}-1} \quad (13)$$

и зависит от одного параметра  $k$ .

В области  $k > 1$  уравнение имеет два корня. В области  $k \leq 1$  уравнение не определено. В области значений параметра  $k$ , в которой уравнение имеет два решения, можно найти зависимость:

$$\Delta z(k) = z_1(k) - z_2(k). \quad (14)$$

Тогда ширина плотности вероятности распределения Вейбулла будет равна:

$$\Delta t(k) = \lambda \Delta z(k). \quad (15)$$

При  $k = 2, \lambda = 0,5$ :  $z_1(k) = 1,3588, z_2(k) = 0,2256$ . Тогда ширина плотности вероятности распределения Вейбулла равна:  $\Delta t(k) = 0,5666$ .

При  $k = 1,5, \lambda = 0,5$ :  $z_1(k) = 1,3311, z_2(k) = 0,0637$ . Тогда ширина плотности вероятности распределения Вейбулла равна:  $\Delta t(k) = 0,6337$ .

### Стохастическое включение и выключение постоянной нагрузки с использованием плотности вероятности Вейбулла

Сдвинем распределение Вейбулла на величину  $t'$ , на которую сдвинут максимум распределения. При включении постоянной единичной нагрузки (Рисунок 1):

$$F(t) = N \int_0^{+\infty} \theta(t - t'') g(t'' + t') dt'' = N \int_{-t'}^t g(t'' + t') dt'' =$$

$$= N \left\{ 1 - e^{-((t+t')/\lambda)^k} \right\}, \quad (16)$$

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

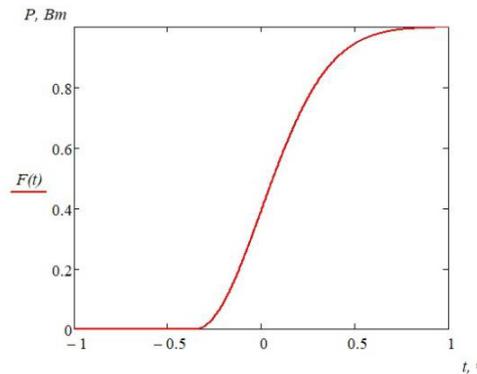


Рисунок 1 – Функция энергопотребления  $F(t)$  при включении постоянной единичной нагрузки,  $\lambda = 0,5, k = 2$

Figure 1 – Energy consumption function  $F(t)$  when turning on a constant unit load,  $\lambda = 0,5, k = 2$

При выключении постоянной единичной нагрузки (Рисунок 2):

$$F(t) = N \int_0^{+\infty} [1 - \theta(t - t'')] g(t'' + t') dt'' = N - N \left\{ 1 - e^{-\left(\frac{t+t'}{\lambda}\right)^k} \right\} =$$

$$= N e^{-((t+t')/\lambda)^k}. \quad (17)$$

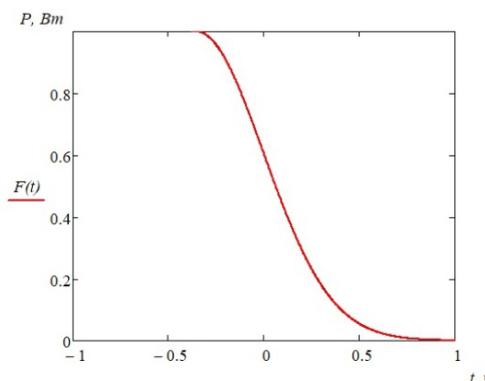


Рисунок 2 – Функция энергопотребления  $F(t)$  при выключении постоянной единичной нагрузки,  $\lambda = 0,5, k = 2$

Figure 2 – Energy consumption function  $F(t)$  when turning off a constant unit load,  $\lambda = 0,5, k = 2$

В таком случае функция, описывающая энергопотребление  $N$  приборов мощностью  $a$ , если эталонный прибор был включен в момент времени  $t_1$ , а выключен в момент времени  $t_2$ , имеет вид (Рисунок 3):

$$F(t; t_1; t_2; \lambda; k; t') = Na \cdot \theta(t - (t_1 - t')) \cdot \left\{ 1 - e^{-\left(\frac{t - (t_1 - t')}{\lambda}\right)^k} \right\} - Na \cdot \theta(t - (t_2 - t')) \cdot \left\{ 1 - e^{-\left(\frac{t - (t_2 - t')}{\lambda}\right)^k} \right\}, \quad (18)$$

где  $\theta(t - (t_1 - t'))$  – функция Хевисайда;  $t' = \lambda e^{\frac{1}{k} \ln^{k-1} \frac{1}{k}}$ .

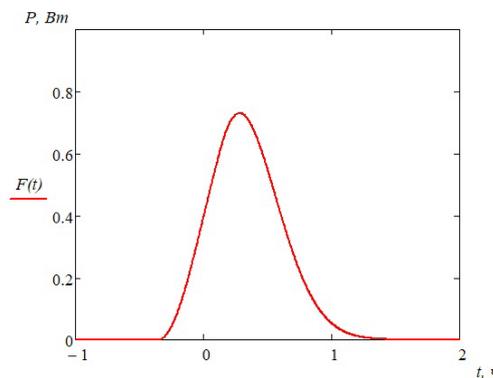


Рисунок 3 – Функция энергопотребления  $F(t)$  при включении постоянной единичной нагрузки в момент времени  $t_1 = 0$ , выключении в момент времени  $t_2 = 0,5$  ч,  $\lambda = 0,5$ ,  $k = 2$   
Figure 3 – Energy consumption function  $F(t)$  when a constant unit load is turned on at time  $t_1 = 0$ , turned off at time  $t_2 = 0,5$  h,  $\lambda = 0,5$ ,  $k = 2$

На Рисунке 4 приведено сравнение графиков энергопотребления без сдвига и со сдвигом при моделировании с использованием плотности вероятности Вейбулла и плотности вероятности нормального распределения:

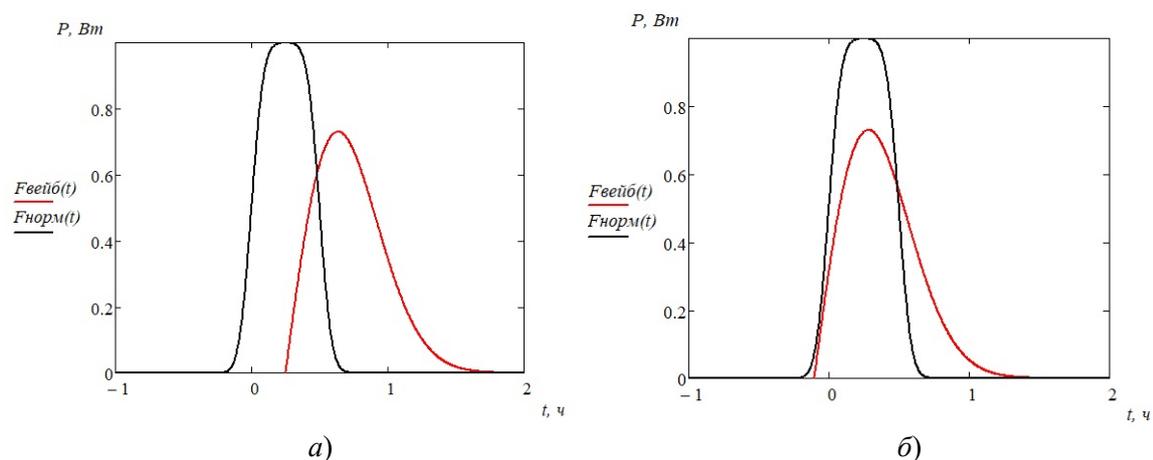


Рисунок 4 – Функция энергопотребления  $F(t)$  при моделировании с использованием распределения Вейбулла (красным), нормального распределения (черным),  $t_1 = 0$ ,  $t_2 = 0,5$  ч,  $\lambda = 0,5$ ,  $k = 2$ : а) без сдвига распределения Вейбулла; б) со сдвигом распределения Вейбулла  
Figure 4 – Energy consumption function  $F(t)$  when modeling using the Weibull distribution (red), normal distribution (black),  $t_1 = 0$ ,  $t_2 = 0,5$  h,  $\lambda = 0,5$ ,  $k = 2$ : а) without shifting the Weibull distribution; б) with the Weibull distribution shift

Корректным вариантом сравнения графиков энергопотребления является вариант со сдвигом распределения Вейбулла (Рисунок 4б).

### Модель стохастической нагрузки в жилом секторе с использованием плотности вероятности Вейбулла

В качестве примера рассмотрим циклы работы посудомоечных и стиральных машин. Данные о циклах работы приборов приведены в Таблицах 1, 2.

Таблица 1 – Цикл работы посудомоечной машины  
Table 1 – 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 2 – Цикл работы стиральной машины  
Table 2 – 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 5), подставив значения в формулу (18). Примем число устройств  $N = 1000$ .

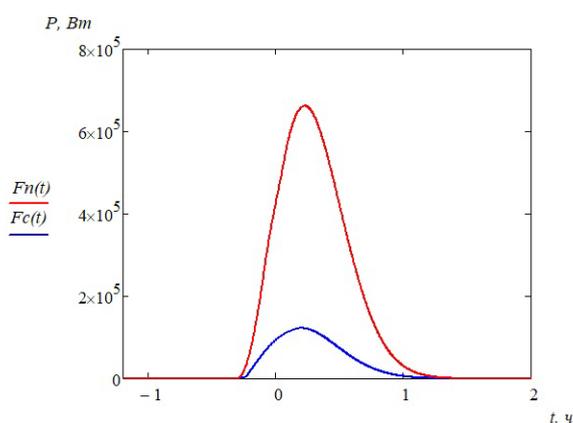


Рисунок 5 – Функция энергопотребления  $F(t)$  для 1000 посудомоечных машин (красным), для 1000 стиральных машин (синим),  $\lambda = 0,5$ ,  $k = 2$   
Figure 5 – Energy consumption function  $F(t)$  for 1000 dishwashers (red), for 1000 washing machines (blue),  $\lambda = 0,5$ ,  $k = 2$

Ранее авторами моделировалось энергопотребление 500 городских квартир на основе свертки функции плотности вероятности нормального распределения с

прямоугольной функцией энергопотребления, описываемой разностью двух функций Хевисайда [1]. На Рисунке 6 приведено сравнение графиков функции энергопотребления 500 квартир в многоэтажных городских домах за 24 часа одних суток при имитационном моделировании с использованием нормального распределения и распределения Вейбулла для временных смещений включения бытовых электрических устройств.

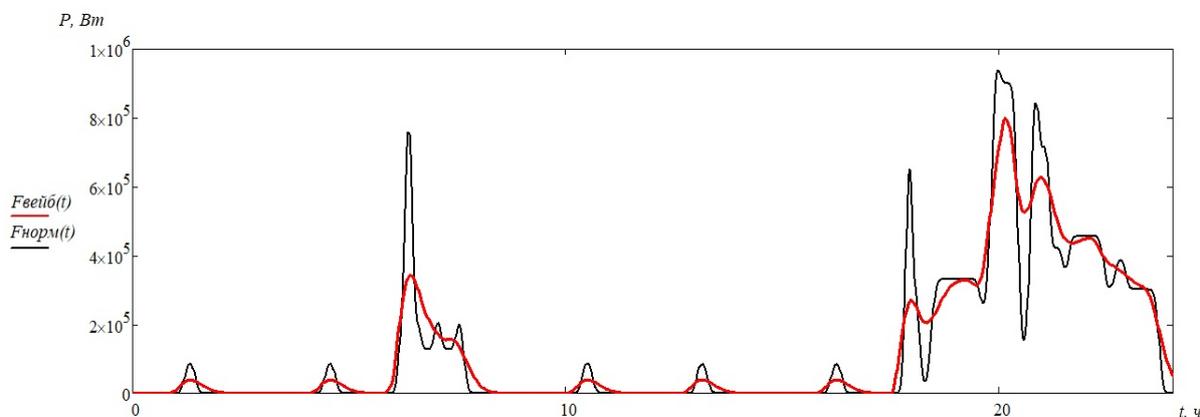


Рисунок 6 – Функция энергопотребления  $F(t)$  для 500 городских квартир: с использованием нормального распределения,  $\Delta t = 0,1$  часа (черным); с использованием распределения Вейбулла (красным),  $\lambda = 0,5$ ,  $k = 2$

Figure 6 – Energy consumption function  $F(t)$  for 500 city apartments: when modeling using the normal distribution  $\Delta t = 0,1$  h (black); when modeling using the Weibull distribution (red),  $\lambda = 0,5$ ,  $k = 2$

Как видно из графиков (Рисунки 1–6), распределение Вейбулла является асимметричным, имеет колоколообразную форму с затянутой правой стороной.

### Моделирование энергопотребления поселка с использованием плотности вероятности Вейбулла

Авторами был проведен анализ обезличенных данных энергопотребления, предоставленных Иркутскими электрическими сетями для одного ввода ячейки, обслуживающей поселок на 500 сельских домов и дачных участков. Анализ энергопотребления поселка за несколько месяцев показал, что на графиках присутствуют утренние и вечерние пики потребления электроэнергии. Они имеют колоколообразную форму с затянутой правой стороной. Присутствие на графиках энергопотребления жилых домов утренних и вечерних пиков также подтверждается соответствующими исследованиями и наблюдениями [8–13]. На графиках также просматривается уровень постоянной нагрузки, которая может быть обусловлена: использованием населением систем электрического отопления; добычей криптовалют в жилых помещениях с помощью специализированного оборудования; ночным освещением территории поселка и придомовых земельных участков.

На основе данных об энергопотреблении бытовых приборов, полученных с помощью измерительных блоков-ваттметров [1], авторами моделируется энергопотребление 500 домохозяйств и выполняется сравнение с реальным энергопотреблением поселка сопоставимого размера (Рисунок 7). В утреннее время в будний день учитывается работа чайника, микроволновой печи и светодиодных ламп. В вечернее – работа электроплиты, чайника, микроволновой печи, посудомоечной машины, компьютера, телевизора, светодиодных ламп и фена. На протяжении суток

учитывается работа приборов электроотопления мощностью 5 кВт на жилой дом, а также периодическая работа холодильника.

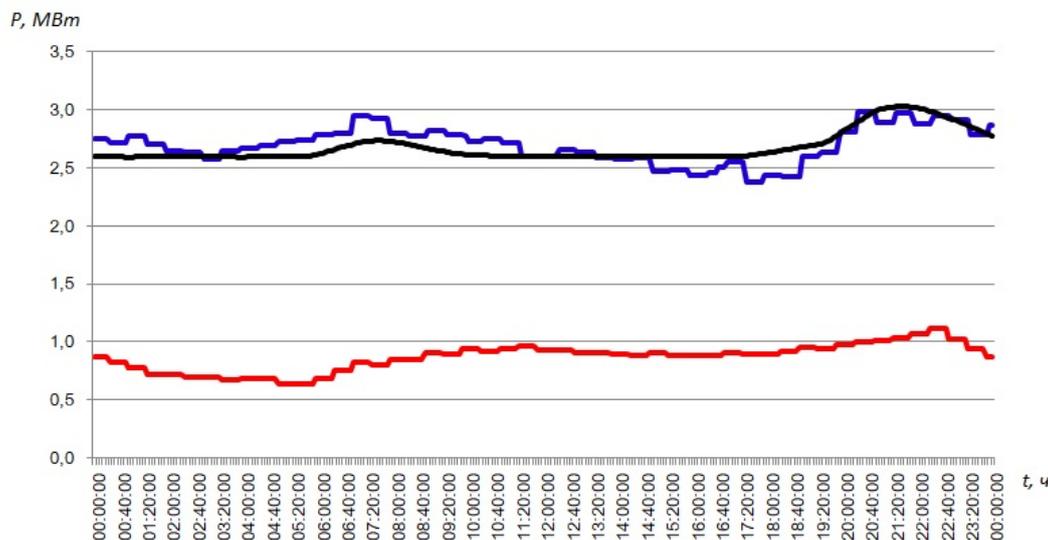


Рисунок 7 – Функция энергопотребления для 500 домохозяйств с использованием распределения Вейбулла,  $\lambda = 2$ ,  $k = 2$  (черным); графики энергопотребления поселка в самый холодный день апреля (синим) и в самый жаркий день июля (красным)

Figure 7 – Energy consumption function for 500 households when modeling using Weibull distribution,  $\lambda = 2$ ,  $k = 2$  (black); graphs of the village's energy consumption on the coldest day in April (blue) and on the hottest day in July (red)

Полученная модель на основе свертки функции плотности вероятности Вейбулла с функцией энергопотребления прямоугольного типа в большей степени соответствует реальным графикам потребления электроэнергии населением в жилом секторе, нежели модель на основе свертки с функцией плотности вероятности нормального распределения. Данная модель в том числе учитывает утренние и вечерние пики энергопотребления, а также демонстрирует практически идентичную суммарную величину расходов мегаватт-часов электроэнергии населенным пунктом за одни сутки.

### Заключение

В статье предложен способ имитационного моделирования суточных графиков электрических нагрузок коммунально-бытовых потребителей на основе теории сверток. Приведен пример имитационного моделирования потребления электроэнергии населенным пунктом в весенний месяц, в рамках которого учтена нагрузка, создаваемая отопительными приборами. Учет такой нагрузки особенно важен для регионов с холодным климатом, Сибири и Дальнего Востока. Электрическое отопление домов наиболее удобно и безопасно по сравнению с использованием газовых котлов или дровяных печей. К тому же, постоянное сжигание дров и угля является серьезным загрязняющим фактором. В переходе с печного отопления на электрическое заинтересовано и Правительство Российской Федерации, для улучшения экологической обстановки и снижения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу реализуется федеральная программа «Чистый воздух», рассчитанная на сокращение выбросов в 2 раза к 2030 году.

Выполнено сравнение результатов имитационного моделирования с использованием плотности вероятности Вейбулла и плотности вероятности нормального

распределения для временных смещений включения электрических бытовых приборов, по итогам которого сделан вывод о том, что модель с использованием распределения Вейбулла в большей степени соответствует реальному энергопотреблению в коммунально-бытовом секторе. По мнению авторов, с использованием вышеуказанной модели возможно оценивать энергопотребление жилых поселений за длительные периоды, а в достаточной степени точные прогнозы позволят планировать необходимые объемы подключения электроэнергии, снизить экономические издержки и минимизировать потери.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Боровский А.В., Юменчук А.А. Моделирование стохастической нагрузки в жилом секторе. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2024;12(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1573>  
Borovskiy A.V., Yumenchuk A.A. Stochastic load modeling in the residential sector. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(2). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1573>
2. Иванова Ю.П., Соколова Е.В., Сахарова А.А., Иванова О.О., Азаров В.Н. Проверка выполнения закона Вейбулла для различных направлений ветра, характерных для линейного города Волгограда. *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2020;(3):134–141.  
Ivanova Yu.P., Sokolova E.V., Sakharova A.A., Ivanova O.O., Azarov V.N. Checking compliance with Weibull's law for various wind directions typical of the linear city of Volgograd. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2020;(3):134–141. (In Russ.).
3. Бойко Ю.М., Марихин В.А., Мясникова Л.П., Москалюк О.А., Радованова Е.И. Статистический анализ прочности ультраориентированных пленочных нитей сверхвысокомолекулярного полиэтилена в рамках модели Вейбулла. *Физика твердого тела*. 2016;58(10):2065–2068.  
Boiko Y.M., Marikhin V.A., Myasnikova L.P., Moskalyuk O.A., Radovanova E.I. Statistical analysis of the strength of ultra-oriented ultra-high-molecular-weight polyethylene film filaments in the framework of the Weibull model. *Physics of the Solid State*. 2016;58(10):2141–2144. <https://doi.org/10.1134/S1063783416100103>
4. Прохоров С.А., Даниленко М.С. Модель прогнозирования дефектных участков магистральных газопроводов с помощью заданного закона распределения Вейбулла. *Естественные и технические науки*. 2016;(4):220–224.
5. Гродзенская И.С. Исследование эффективности последовательных методов обнаружения сигналов на фоне помех, имеющих распределение Вейбулла. *Метрология*. 2006;(7):30–35.
6. Шнейдеров Е.Н. Использование распределения Вейбулла для группового прогнозирования параметрической надёжности изделий электронной техники. В сборнике: *Современные средства связи: Материалы XVII Международной научно-технической конференции, 16–18 октября 2012 года, Минск, Беларусь*. Минск: Высший государственный колледж связи; 2012. С. 152–153.
7. Осовец С.В., Азизова Т.В., Гергенрейдер С.Н. Методы оценки неопределенности дозовых порогов для детерминированных эффектов. *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2010;55(3):11–16.

- Osovets S.V., Azizova T.V., Gergenreider S.N. Methods of Uncertainty Assessment for Deterministic Effects Dose Thresholds. *Medical Radiology and Radiation Safety*. 2010;55(3):11–16. (In Russ.).
8. Соловьева А.С., Шведов Г.В. Сравнительный анализ зимних и летних графиков электрической нагрузки рабочих и выходных дней многоквартирных домов с электроплитами в системах электроснабжения крупных городов. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. 2023;23(1):27–37.  
Solovyova A.S., Shvedov G.V. A comparative analysis of the electric load on weekdays and weekends of multi-apartment buildings with electric stoves in the power supply system of large cities. *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2023;23(1):27–37. (In Russ.).
9. Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р., Солуянов В.И. Исследование электрических нагрузок многоквартирных жилых комплексов в период распространения новой коронавирусной инфекции. *Вопросы электротехнологии*. 2021;(2):57–67.  
Soluyanov Yu.I., Fedotov A.I., Akhmetshin A.R., Soluyanov V.I. Analysis of electric loads in multi-apartment residential complexes during an outbreak of coronavirus disease. *Voprosy elektrotekhnologii*. 2021;(2):57–67. (In Russ.).
10. Тарнижевский М.В., Михайлов В.И. Моделирование суточных графиков электрических нагрузок коммунально-бытовых потребителей методом ортогональных разложений. *Электричество*. 1985;(5):66–68.
11. 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>
12. 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>
13. 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>

#### 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](mailto: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](mailto:andrey.yumenchuk@mail.ru)

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

*Статья поступила в редакцию 29.11.2024; одобрена после рецензирования 17.12.2024; принята к публикации 20.12.2024.*

*The article was submitted 29.11.2024; approved after reviewing 17.12.2024; accepted for publication 20.12.2024.*