

Научная статья  
УДК 519.213  
EDN YNLLUE  
DOI 10.17150/2713-1734.2024.6(1).31-46



**А.В. Боровский**  
*Байкальский государственный университет,  
г. Иркутск, Российская Федерация*

**А.А. Юменчук**  
*Байкальский государственный университет,  
г. Иркутск, Российская Федерация*

### Стохастические модели потребления электроэнергии

**Аннотация.** В статье рассмотрена стохастическая модель потребления электроэнергии на основе теории сверток. Сделано предположение, что процессы включения, выключения энергопотребления в масштабах города зависят от большого числа независимых случайных факторов и имеют вид нормального распределения. Представлены функции включения и выключения нагрузки, построены графики. Выполнено сравнение интеллектуальной системы электрообеспечения с существующей в Российской Федерации системой электрообеспечения. Выявлены причины медленного внедрения интеллектуальных сетей в Российской Федерации.

В Российской Федерации на данный момент интеллектуальные сети имеют низкую популярность, в то время как в странах Европейского союза, США и Китае активно получают финансовую поддержку государства проекты, связанные с разработкой, производством компонентов и повсеместным внедрением интеллектуальных сетей.

Так, Европейский союз выделяет более миллиарда долларов ежегодно на проекты в области электроэнергетики и интеллектуальных сетей. Эти средства выделяются согласно стратегии Европейского зеленого курса (European Green Deal).

В то же время, государственная сетевая корпорация Китая внедрила концепцию «глобального энергетического интернета» (Global Energy Internet), которая, в соответствии с ожиданием правительства, будет стимулировать рынок интеллектуальных сетей в стране.

Как и в других странах мира, электроэнергетика США тоже сталкивается с проблемами, связанными с повышением цен на коммунальные услуги, колебаниями пиковой нагрузки и необходимостью сокращения выбросов углекислого газа. Следствием этого стало принятие в конце 2021 г. «инфраструктурного» закона, предусматривающего масштабные инвестиции в проекты «зеленой энергетики».

**Ключевые слова.** Умный счетчик, интеллектуальная сеть, стохастические модели, график энергопотребления, прогнозирование спроса, правительственная политика.

**Информация о статье.** Дата поступления: 19 октября 2023 г.; дата принятия к публикации: 12 марта 2024 г.; дата онлайн-размещения: 30 марта 2024 г.

**A.V. Borovsky***Baikal State University,  
Irkutsk, Russian Federation***A.A. Yumenchuk***Baikal State University,  
Irkutsk, Russian Federation*

## Stochastic Models of Electricity Consumption

**Abstract.** The article considers a stochastic model of electricity consumption based on the convolution theory. It is assumed that the processes of switching on and off energy consumption on a city scale depend on a large number of independent random factors and have the form of a normal probability distribution. The functions of switching on and off the load are presented, graphs are plotted. The comparison of the intelligent power supply system with the existing power supply system in the Russian Federation is carried out. The reasons for the slow introduction of smart grids in the Russian Federation are revealed.

At the moment, smart grids are not very popular in the Russian Federation, while in the countries of the European Union, the USA and China, projects related to the development, production of components and the widespread introduction of smart grids are actively receiving state financial support.

Thus, the European Union allocates more than a billion dollars annually for projects in the field of electric power and smart grids. These funds are allocated according to the European Green Deal strategy.

At the same time, the State Grid Corporation of China has introduced the concept of the "Global Energy Internet", which, in accordance with the government's expectation, will stimulate the smart grid market in the country.

As in other countries of the world, the US electric power industry is also facing problems related to rising utility prices, fluctuations in peak load and the need to reduce carbon dioxide emissions. The consequence of this was the adoption at the end of 2021 of an "infrastructure" law providing for large-scale investments in green energy projects.

**Keywords.** Smart meter, smart grid, stochastic models, electric load profile, demand response, government policy.

**Article info.** Received 19 October, 2023; Accepted 12 March, 2024; Available online 30 March, 2024.

## Введение

Поскольку мир столкнулся с проблемами энергетического и климатического кризисов, многие государства продвигают «интеллектуальные» сети как способ экономии электроэнергии гражданами, а также как один из способов снижения потерь электроэнергии и уменьшения объемов загрязнения воздуха [1–6]. Например, Европейский Союз одобрил предложение инвестировать 1 млрд 147 млн дол. США в проекты энергетической инфраструктуры в 2020 г., 84 % от этой суммы направлено на электроэнергетику и проекты интеллектуальных сетей<sup>1</sup>. В то же время, по данным CEC (China Electronics

<sup>1</sup> EU states approve \$1.17bn investment in energy infrastructure // Power Technology. URL: <https://www.power-technology.com/news/european-union-eu-approves-energy-infrastructure-investment-connecting-europe-facility/>.

Corporation), общий объем инвестиций Китая в интеллектуальные сети в 2020 г. составил 1 018 млрд юаней<sup>2</sup>. США, аналогично действиям Европейского Союза и Китая, принимают инвестиционные программы, направленные на развитие интеллектуальных сетей. Примером может послужить программа выделения грантов на разработку умных счетчиков (Smart Grid Investment Grant)<sup>3</sup>.

Согласно отчету Управления Электроэнергетики США (Energy Information Administration), к 2021 г. в США было установлено около 111 млн «интеллектуальных» счетчиков, и около 88 % из них установлено в жилом секторе<sup>4</sup>. В Европейском союзе в 2018 г. по официальным данным общее количество установленных умных счетчиков составляет примерно 99 млн<sup>5</sup>.

Таблица 1

**Процент использования умных счетчиков от общего количества приборов учета в государствах-членах Европейского Союза в 2018 г.\***

Государство	Общее количество установленных приборов учета	Количество установленных умных счетчиков	Процент (%) использования умных счетчиков от общего количества приборов учета
Швеция	5,300,000	5,300,000	100,00
Финляндия	3,557,500	3,551,500	99,83
Эстония	707,900	700,000	98,88
Италия	36,789,000	36,237,165	98,50
Мальта	317,747	309,287	97,34
Испания	28,000,000	26,067,500	93,10
Дания	3,361,816	2,324,439	69,14
Словения	935,333	544,332	58,20
Нидерланды	8,600,000	4,000,000	46,51
Латвия	981,633	356,358	36,30
Люксембург	300,499	75,847	25,24
Португалия	6,000,000	1,500,000	25,00
Франция	40,743,844	9,045,000	22,00

<sup>2</sup> China smart grid network market trends // Mordor Intelligence. URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/china-smart-grid-network-market/market-trends>.

<sup>3</sup> Advanced metering infrastructure and customer systems / U.S. Department of Energy. URL: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/12/f34/AMI%20Summary%20Report\\_09-26-16.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/12/f34/AMI%20Summary%20Report_09-26-16.pdf).

<sup>4</sup> How many smart meters are installed in the united states, and who has them? // U.S. Energy Information Administration URL: <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=108&t=1>.

<sup>5</sup> Tractebel Impact. Benchmarking smart metering deployment in the EU-28 / Directorate-General for Energy (European Commission). URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/b397ef73-698f-11ea-b735-01aa75ed71a1/language-en>.

Окончание табл. 1

Государство	Общее количество установленных приборов учета	Количество установленных умных счетчиков	Процент (%) использования умных счетчиков от общего количества приборов учета
Великобритания	29,807,531	5,935,202	19,91
Австрия	6,148,094	728,477	11,85
Польша	17,719,000	1,469,661	8,29
Словакия	2,513,743	127,325	5,06
Румыния	9,237,788	442,206	4,79
Греция	7,485,000	195,000	2,61
Литва	1,722,925	40,687	2,36
Хорватия	2,424,060	55,000	2,27
Венгрия	7,500,000	75,000	1,00
Бельгия	5,975,000	Нет данных	Нет данных
Болгария	4,700,000	Нет данных	Нет данных
Кипр	546,500	Нет данных	Нет данных
Чехия	5,712,550	Нет данных	Нет данных
Германия	50,700,000	Нет данных	Нет данных
Ирландия	2,200,000	Нет данных	Нет данных

\* Составлена авторами по данным: Tractebel Impact. Benchmarking smart metering deployment in the EU-28 / Directorate-General for Energy (European Commission). URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/b397ef73-698f-11ea-b735-01aa75ed71a1/language-en>.

Большинство умных счетчиков производят замер почасового потребления электроэнергии и обеспечивают двустороннюю связь, которая передает информацию о ценах и объемах потребления между поставщиками электроэнергии и ее потребителями. Например, коммунальные службы США и Европейского Союза используют умные счетчики для получения данных о потреблении электроэнергии в режиме реального времени, эти данные используются при расчете платы за пользование электроэнергией. 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 [7; 8]. 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 [9; 10]. Кроме того, внедрение умных счетчиков потенциально может уменьшить необходимость в строительстве дополнительных электростанций, которые используются только при колебаниях пиковой нагрузки, что, в свою очередь, сократит выбросы загрязняющих веществ и парниковых газов [11].

Таблица 2

**Основные различия между существующей  
в Российской Федерации системой электроснабжения  
и интеллектуальной системой электроснабжения**

Характеристика	Существующая система электроснабжения	«Интеллектуальная» система электроснабжения
Потребительская активность	Потребитель следует определенным тарифам и выставлению счетов	Потребитель имеет возможность следить за изменением цены электроэнергии в режиме реального времени и принимать действия по изменению своего потребления в сторону уменьшения или увеличения в соответствии со своими потребностями
Устройство сети	Централизованная система препятствует простому и комфортному использованию возобновляемых источников электроэнергии	Децентрализованная система позволяет потребителю переключаться на возобновляемые источники электроэнергии (например, солнечные панели) в случаях скачков цен на электроэнергию
Работа энергосистемы	Ограниченные возможности прогнозирования спроса, сложности с составлением профилей потребителей из-за малого объема данных о потреблении	Возможно точно прогнозировать спрос на электроэнергию, составлять профили потребителей, использовать динамическое ценообразование благодаря отслеживанию энергопотребления в режиме реального времени

**Влияние инвестиционных программ на исследования  
в области прогнозирования энергопотребления**

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.

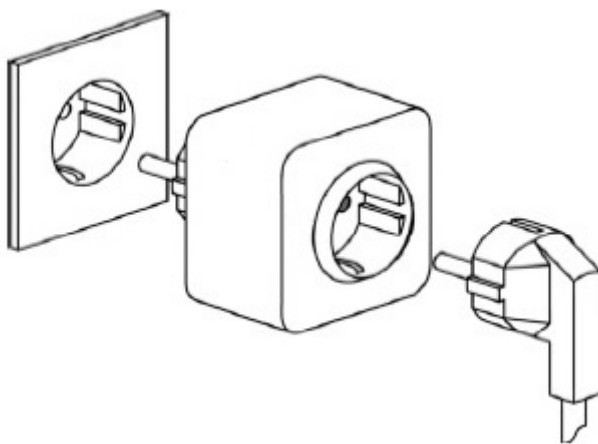
Таблица 3

**Общедоступные базы данных энергопотребления**

Название базы данных	Составитель/владелец БД	Частота сбора значений энергопотребления
1. Tracebase «Набор «следов, отпечатков» энергопотребления»	Дармштадский и Клаустальский технические университеты, Германия	Каждые 3-5 секунд
2. Smart* (Smart Star) «Умная звезда»	Массачусетский государственный университет Амхерст, США	Каждую секунду

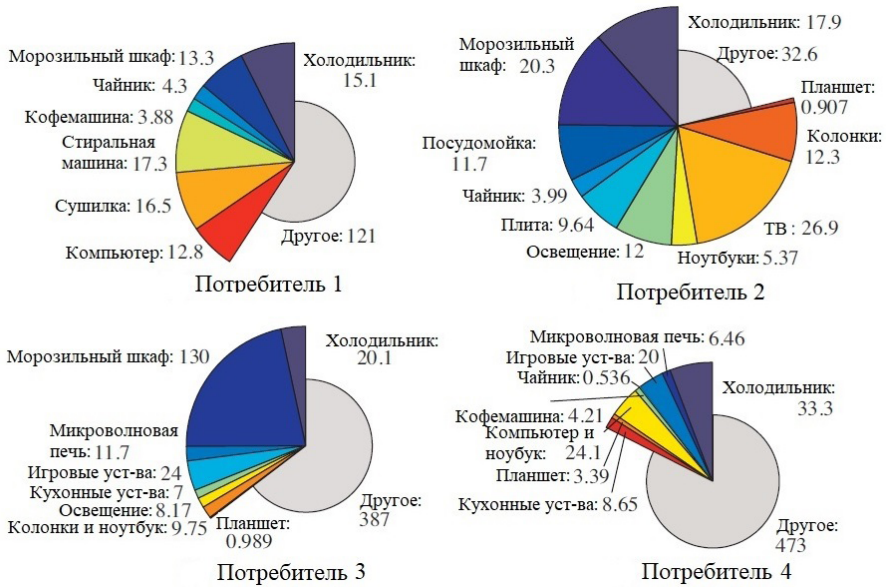
Название базы данных	Составитель/владелец БД	Частота сбора значений энергопотребления
3. AMPD «Общедоступный набор данных для исследования нагрузок»	Гарвард, США	Каждую минуту
4. ECO «Потребление электроэнергии»	Федеральный институт технологий, Германия	Каждую секунду
5. Greend «База данных по электрической энергии»	Альпийско-Адриатический университет Клагенфурта, Австрия	Каждую секунду

Например, Tracabase содержит данные об энергопотреблении более 35 типов бытовых приборов, среди которых холодильники, кухонные плиты, пылесосы, микроволновые печи, телевизоры, ноутбуки, чайники и др. Для каждого прибора имеется как минимум 1 журнал энергопотребления за 1 полные сутки работы прибора. Энергопотребление измеряется каждые 3-5 секунд, соответственно каждый журнал имеет около 30 тысяч значений энергопотребления для одного прибора. Измерение для большинства баз данных было выполнено с помощью измерительных блоков, которые подключаются к розеткам совместно с вилками наблюдаемых приборов.



*Рис. 1. Измерительный блок*

Результатом обработки данных являются графики энергопотребления приборов, на основе которых составляются профили разных типов потребителей. На рис. 2 изображены примеры полученных профилей нескольких потребителей жилого сектора. Цифры обозначают количество киловатт-часов, которые были потреблены конкретным устройством у потребителя.



**Рис. 2. Пример составления профилей потребителей**

Аналогично, данные, собранные умными счетчиками, используются для прогнозирования спроса на электроэнергию.

### **Моделирование потребления электроэнергии большим количеством бытовых приборов**

Общедоступные базы данных, содержащие сведения об энергопотреблении приборов, позволяют легко построить график энергопотребления конкретного прибора, а также смоделировать энергопотребление и составить профиль одного потребителя, но не группы потребителей. Для решения задач 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:

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

В реальности устройства включают со сдвигом по времени  $\Delta t$ , 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:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} g(\Delta t) d\Delta t = 1. \quad (2)$$

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, 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:

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

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

$$F(t) = N \int_{-\infty}^{+\infty} f(t - t') g(t') dt'. \quad (4)$$

Выражение (4) в математике носит название «свертки» двух функций. Существует теория сверток. Для случайных процессов  $g(t')$  может иметь вид нормального распределения:

$$g(t') = \frac{1}{\sqrt{\pi} \Delta t'} e^{-\left(\frac{t'}{\Delta t'}\right)^2}, \quad (5)$$

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

График энергопотребления одного прибора в большинстве случаев описывается функцией Хэвисайда. Поэтому далее нужно вычислить свертку нормального распределения с функцией Хэвисайда:

$$F(t) = N \int_{-\infty}^{+\infty} f(t - t') g(t') dt'. \quad (6)$$

$$f(t - t') = \begin{cases} 1, & t - t' > 0; \\ 0, & t - t' < 0. \end{cases} \quad (7)$$



$$g(t') = \frac{1}{\sqrt{\pi\Delta t}} e^{-\frac{(t')^2}{\Delta t^2}}. \quad (8)$$

Свертка будет равна:

$$F(t) = N \int_{-\infty}^t g(t') dt' = N \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sqrt{\pi\Delta t}} e^{-\frac{(t')^2}{\Delta t^2}} dt' = \frac{N}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(t')^2}{\Delta t^2}} d\frac{t'}{\Delta t}. \quad (9)$$

Делаем замену переменных:

$$\frac{t'}{\Delta t} = y. \quad (10)$$

Тогда:

$$F(t) = \frac{N}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{t/\Delta t} e^{-y^2} dy. \quad (11)$$

Получили интеграл, который выражается через специальную функцию Эрфик (интеграл вероятности):

$$\begin{aligned} F(t) &= \frac{N}{\sqrt{\pi}} \left\{ \int_{-\infty}^0 e^{-y^2} dy + \int_0^{t/\Delta t} e^{-y^2} dy \right\} = \frac{N}{\sqrt{\pi}} \left\{ \frac{\sqrt{\pi}}{2} + \int_0^{t/\Delta t} e^{-y^2} dy \right\} = \\ &= \frac{N}{2} \left\{ 1 + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{t/\Delta t} e^{-y^2} dy \right\} = \frac{N}{2} \{ 1 + \operatorname{erf}(t/\Delta t) \}. \end{aligned} \quad (12)$$

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-y^2} dy. \quad (13)$$

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{+\infty} e^{-y^2} dy. \quad (14)$$

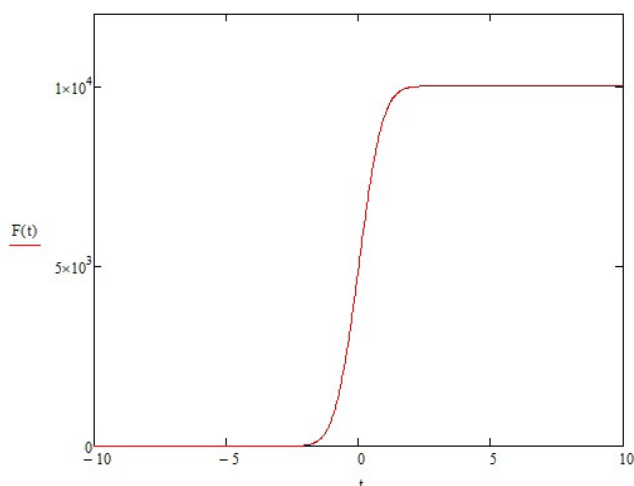
Легко убедиться в выполнении равенства:

$$\operatorname{erf}(x) + \operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} e^{-y^2} dy = 1. \quad (15)$$

Таким образом, свертка функции Хэвисайда с нормальным распределением выражается через функцию Эрфик. Здесь  $\Delta t$  —

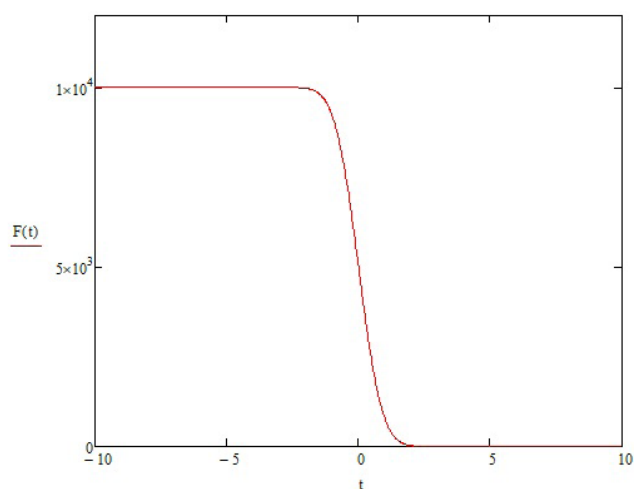
константа, которая определяет экспоненциальную полуширину нормального распределения.

В качестве примера построим график для включения 1 000 ламп мощностью 10 Вт:



**Рис. 3. Функция включения  $F(t)$  для 1 000 ламп мощностью 10 Вт,  $\Delta t = 1$**

Для того, чтобы получить функцию выключения, нужно перевернуть (зеркально отразить относительно разрыва) функцию Хэвисайда. При этом получится следующий результат (рис. 4)



**Рис. 4. Функция выключения  $F(t)$  для 1 000 ламп мощностью 10 Вт,  $\Delta t = 1$**

$$F(t) = \frac{N}{2} \times \operatorname{erfc}(t/\Delta t); \quad (16)$$

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-y^2} dy, x = t/\Delta t. \quad (17)$$

В качестве примера построим график включения и выключения 1 000 ламп (рис. 5):

$t_1$  — момент включения;

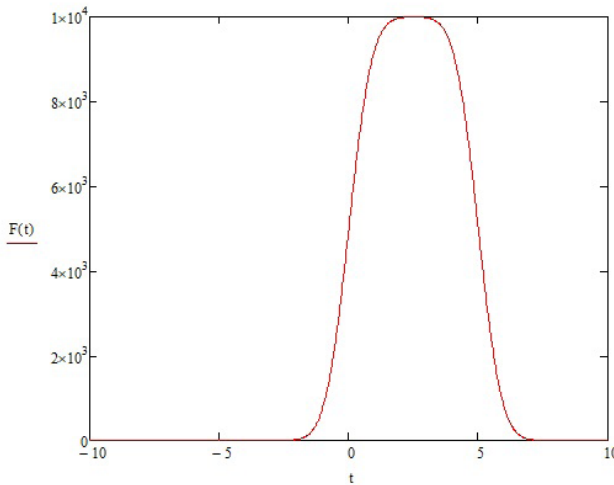
$t_2$  — момент выключения;

$\Delta t$  — экспоненциальная полуширина нормального распределения.

Считается, что

$$t_2 - t_1 > \Delta t. \quad (18)$$

$$F(t) = \frac{N}{2} \times \left[ \operatorname{erf}\left((t-t_1)/\Delta t\right) + \operatorname{erfc}\left((t-t_2)/\Delta t\right) \right], -\infty < t < \infty. \quad (19)$$



**Рис. 5. Функция включения и выключения  $F(t)$  для 1 000 ламп мощностью 10 Вт,  $t_1 = 0$ ,  $t_2 = 5$ ,  $\Delta t = 1$**

### Выводы

Для решения задач прогнозирования потребления электроэнергии, когда в расчет берутся несколько районов, предприятий или даже городов, необходимо составление вероятностной модели потребления электроэнергии. Однако, в Российской Федерации слабо развито данное направление. По мнению авторов, причин здесь несколько.

Первая причина — популярность одноставочного тарифа. В Российской Федерации применяются три вида тарифов на электроэнергию: одноставочный тариф; одноставочный тариф, дифференцированный по двум зонам суток; и одноставочный тариф, дифференцированный по трем зонам суток<sup>6</sup>.

Таблица 4

#### Виды тарифов на электроэнергию в Российской Федерации\*

Вид тарифа	
Одноставочный тариф	Без дифференциации
Одноставочный тариф, дифференцированный по двум зонам суток	Дневная зона 07:00-23:00
	Ночная зона 23:00-07:00
Одноставочный тариф, дифференцированный по трем зонам суток	Пиковая зона 07:00-10:00 17:00-21:00
	Полупиковая зона 10:00-17:00 21:00-23:00
	Ночная зона 23:00-07:00

\* Составлена авторами по данным: О тарифах на электроэнергию, дифференцированных по зонам суток // Государственная служба Чувашской Республики по конкурентной политике и тарифам. URL: <https://tarif.cap.ru/news/2023/01/19/o-tarifah-na-elektroenergiyu-differencirovannih-po>.

Самый распространенный тариф у населения — одноставочный. Дифференцированные тарифы не так популярны, поскольку для их подключения необходим многозональный счетчик электроэнергии, который несколько дороже обычного. К тому же, чтобы дифференцированный тариф действительно оказался выгодным, включение приборов, таких как стиральные, посудомоечные машины, обогреватели, нужно откладывать на период ночной зоны тарифа, во время которой пользование электричеством дешевле, чем в дневную или пиковую/полупиковую зону. Это не всегда удобно.

Вторая причина — повсеместная застройка многоквартирными домами. Одним из удобств пользования умными счетчиками во время пиковой зоны является переход на возобновляемые источники электроэнергии, например, использование солнечных панелей на крышах частных домов и коттеджей. В многоквартирном доме в 99,9 % случаев отсутствует техническая возможность установки солнечных панелей.

<sup>6</sup> О тарифах на электроэнергию, дифференцированных по зонам суток // Государственная служба Чувашской Республики по конкурентной политике и тарифам. URL: <https://tarif.cap.ru/news/2023/01/19/o-tarifah-na-elektroenergiyu-differencirovannih-po>.

Третьей причиной являются климатические особенности регионов, в которых становится экономически нецелесообразно использовать возобновляемые источники электроэнергии.

С другой стороны, в последнее время государством совершаются шаги в сторону внедрения умных счетчиков и интеллектуальных систем.

Один из шагов — принятие 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.

Второй шаг связан с ростом популярности криптовалют в мире, а также с их добычей (майнингом). В СМИ часто появляются новости о необходимости выявления майнеров в жилых домах, пользующихся электроэнергией по тарифу для населения [12]. В Минэнерго по прогнозу на 2024-2029 годы назвали энергодефицитные районы: юго-восточная часть Сибири (юг Иркутской области, Республика Бурятия и Забайкальский край); Дальний Восток (Приморский и Хабаровский края); Республика Крым и Краснодарский край. Было предложено в несколько раз повысить тарифы на электроэнергию для промышленных майнинговых ферм, находящихся в энергодефицитных регионах, в том числе, чтобы заставить центры по добыче криптовалют уйти в регионы с избытком энерго мощностей<sup>7</sup>. Более широкое внедрение умных счетчиков позволит выявлять пользование электроэнергией по несоответствующим тарифам проще.

В последнее время среди энергосбытовых компаний обретают популярность счетчики с дистанционным снятием показаний, широко устанавливаемые в сельской местности [13]. Также умные счетчики используются на предприятиях, объектах промышленности.

Таким образом, постепенно и в Российской Федерации начинают обретать популярность интеллектуальные сети, а задачи, позволяющие прогнозировать электропотребление, составлять профили потребителей, выявлять неправомерное пользование электроэнергией, необходимо решать уже сейчас.

---

<sup>7</sup> В Минэнерго запланировали повысить тарифы для российских майнеров // РБК.. URL: <https://www.rbc.ru/crypto/news/650a99419a794708cdd9c13e>.

### Список использованной литературы

1. How Smart Grid Contributes to Energy Sustainability / Z. Hu, C. Li, Y. Cao [et al.] // *Energy Procedia*. — 2014. — Vol. 61. — P. 858–861.
2. Hledik R. How green is the smart grid? / R. Hledik // *Electr. J.* — 2009. — Vol. 22. — P. 29–41.
3. Autonomous Demand-Side Management Based on Game-Theoretic Energy Consumption Scheduling for the Future Smart Grid / A. Mohsenian-Rad, V. Wong, J. Jatskevich [et al.] // *IEEE Trans. Smart Grid*. — 2010. — Vol. 1. — P. 320–331.
4. Clastres C. Smart Grids: Another Step towards Competition, Energy Security and Climate Change Objectives / C. Clastres // *Energy Policy*. — 2011. — Vol. 39. — P. 5399–5408.
5. Energy Efficiency Actions Related to the Rollout of Smart Meters for Small Consumers, Application to the Austrian System / L. Olmos, S. Ruester, S.-J. Liong, J.-M. Glachant // *Energy* 2011, 36, 4396–4409.
6. Gao Y. Spatial Analysis of Smart Meter Adoptions: Empirical Evidence from the U.S. Data / Y. Gao, C. Fang, J.A. Zhang // *Sustainability*. — 2022. — Vol. 14. — P. 1126.
7. Demand Side Management Techniques for Home Energy Management Systems for Smart Cities / M. Hussain, R. Akram, Z. Memon [et al.] // *Sustainability*. — 2021. — Vol. 13. — P. 11740.
8. Mansouri M. Impact of Demand Response on Reliability Enhancement in Distribution Networks / M. Mansouri, M. Simab, B. Bahmani // *Sustainability*. — 2021. — Vol. 13. — P. 13201.
9. Cortés-Cediel M. Analyzing Citizen Participation and Engagement in European Smart Cities / M. Cortés-Cediel, I. Cantador, M. Bolívar // *Soc. Sci. Comput. Rev.* — 2021. — Vol. 39. — P. 592–626.
10. Bolívar M. Identifying Strategic Planning Patterns of Smart Initiatives / M. Bolívar, C.A. Muñoz, L. Muñoz // *An Empirical Research in Spanish Smart Cities : Proceedings of the International Conference on Electronic Government, Granada, 7–9 September, 2020*. — Granada, 2020. — pp. 374–386.
11. Gil-Garcia J. Conceptualizing Smartness in Government: An Integrative and Multi-Dimensional View / J. Gil-Garcia, J. Zhang, G. Puron-Cid // *Gov. Inf. Q.* — 2016. — Vol. 33. — P. 524–534.
12. Колобова М. Становление суда: в России начали выявлять незаконных майнеров в жилых домах / М. Колобова // *Известия*. — 2022. — 11 дек.
13. Юменчук А.А. Обзор современных устройств учета электроэнергии / А.А. Юменчук. — DOI 10.17150/2713-1734.2022.4(1).38-45. — EDN OEYJYB // *System Analysis and Mathematical Modeling*. — 2022. — Т. 4, № 1. — С. 38–45.

### References

1. Hu Z., Li C., Cao Y., Fang B., He L., Zhang M. How smart grid contributes to energy sustainability. *Energy Procedia*, 2014, vol. 61, pp. 858–861.
2. Hledik R. How Green is the Smart Grid? *Electr. J.*, 2009, vol. 22, pp. 29–41.
3. Mohsenian-Rad A., Wong V., Jatskevich J., Schober R., Leon-Garcia A. Autonomous Demand-Side Management Based on Game-Theoretic Energy Consumption Scheduling for the Future Smart Grid. *IEEE Trans. Smart Grid*, 2010, vol. 1, pp. 320–331.
4. Clastres C. Smart Grids: Another Step towards Competition, energy security and climate change objectives. *Energy Policy*, 2011, vol. 39, pp. 5399–5408.

5. Olmos L., Ruester S., Liong S.-J., Glachant J.-M. Energy efficiency actions related to the rollout of smart meters for small consumers, application to the Austrian system. *Energy*, 2011, vol. 36, pp. 4396–4409.
6. Gao Y., Fang, C., Zhang, J.A Spatial Analysis of Smart Meter Adoptions: Empirical Evidence from the U.S. Data. *Sustainability*, 2022, vol. 14, pp. 1126.
7. Hussain M., Akram R., Memon Z., Nazir M., Javed W., Siddique M. Demand Side Management Techniques for Home Energy Management Systems for Smart Cities. *Sustainability*, 2021, vol. 13, pp. 11740.
8. Mansouri M., Simab M., Bahmani B. Impact of Demand Response on Reliability Enhancement in Distribution Networks. *Sustainability*, 2021, vol. 13, pp. 13201.
9. Cortés-Cediel M., Cantador, Bolívar M. Analyzing Citizen Participation and Engagement in European Smart Cities. *Soc. Sci. Comput. Rev.*, 2021, vol. 39, P. 592–626.
10. Bolívar M., Muñoz C.A., Muñoz L. Identifying Strategic Planning Patterns of Smart Initiatives. In *An Empirical Research in Spanish Smart Cities. Proceedings of the International Conference on Electronic Government, Granada, 7–9 September 2020, Granada, 2020*, pp. 374–386.
11. Gil-Garcia J., Zhang J., Puron-Cid G. Conceptualizing Smartness in Government: An Integrative and Multi-Dimensional View. *Gov. Inf. Q.*, 2016, vol. 33, pp. 524–534.
12. Kolobova M. Formation of the court: in Russia they began to identify illegal miners in residential buildings. *Izvestiya*, 2022, December, 11.
13. Yumenchuk A.A. Review of Modern Electricity Metering Devices. *System Analysis and Mathematical Modeling*, 2022, vol. 4, no. 1, pp. 38–45. (In Russian). EDN: OEJVYB. DOI: 10.17150/2713-1734.2022.4(1).38-45.

### Информация об авторах

**Боровский Андрей Викторович** — доктор физико-математических наук, профессор, кафедра математических методов и цифровых технологий, Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: andrei-borovskii@mail.ru.

**Юменчук Андрей Анатольевич** — аспирант, кафедра математических методов и цифровых технологий, Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: andrey.yumenchuk@mail.ru.

### Information about the Authors

**Andrey V. Borovsky** — D.Sc. in Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Mathematical Methods and Digital Technologies, Baikal State University, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: andrei-borovskii@mail.ru.

**Andrey A. Yumenchuk** — PhD. Student, Department of Mathematical Methods and Digital Technologies, Baikal State University, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: andrey.yumenchuk@mail.ru.

### Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Contribution of the Authors

The authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.



**Для цитирования**

Боровский А.В. Стохастические модели потребления электроэнергии / А.В. Боровский, А.А. Юменчук. — DOI 10.17150/2713-1734.2024.6(1).31-46. — EDN YNLLUE // *System Analysis & Mathematical Modeling*. — 2024. — Т. 6, № 1. — С. 31–46.

**For Citation**

Borovsky A.V., Yumenchuk A.A. Stochastic Models of Electricity Consumption. *System Analysis & Mathematical Modeling*, 2024, vol. 6, no. 1, pp. 31–46. (In Russian). EDN: YNLLUE. DOI: 10.17150/2713-1734.2024.6(1).31-46.