



DOI: 10.22363/2312-8143-2024-25-3-280-287

УДК 519.86. 658

EDN: URFQYA

Научная статья / Research article

Минимизация оплаты по тарифу за сетевую энергию в условиях заданной динамики ее потребления при наличии аккумулятора

А.С. Демидов^{a,b}, А.С. Кочуров^a

^aМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

^bРоссийский университет дружбы народов, Москва, Россия

 demidov.alexandre@gmail.com

История статьи

Поступила в редакцию: 30 апреля 2024 г.

Доработана: 17 июля 2024 г.

Принята к публикации: 23 июля 2024 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов

Нераздельное соавторство

Аннотация. Негативные последствия пикового отбора сетевого продукта: электроэнергии, водных, газовых и других ресурсов, включая распределение времени в компьютерных программах, заставляют поставщика вводить тарифную повременную оплату. Как минимизировать оплату при заданном режиме потребления продукта при наличии системы его накопления для потребителя, проще говоря накопителя (аккумулятора, хранилища), восполняя или расходуя его запасы соответственно в моменты низкой и высокой тарифной цены? Для этого необходимо попытаться разумно использовать накопители (хранилища) ресурсов, из которых можно черпать ресурсы в периоды высоких тарифов оплаты, а тогда, когда потребность в них снижается и, соответственно, низки тарифы оплаты, пополнять хранилища ресурсами. С этой целью формулируется соответствующая математическая задача, относящаяся к вопросу минимизации оплаты за потребление электрической энергии и учитывающая эксплуатационные характеристики накопителя и различные режимы потребления энергии. Показано, что эта математическая задача на минимум может быть решена с помощью стандартного линейного программирования. Приведены результаты численных расчетов оплаты для конкретного предприятия как без накопителя, так и с использованием накопителя. Выигрыш в оплате составляет порядка 20 %.

Ключевые слова: повременной тариф, минимизация оплаты, накопитель, линейное программирование

Благодарности

Авторы выражают благодарность кандидату технических наук Е.С. Яценко за полезные обсуждения.

Для цитирования

Демидов А.С., Кочуров А.С. Минимизация оплаты по тарифу за сетевую энергию в условиях заданной динамики ее потребления при наличии аккумулятора // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2024. Т. 25. № 3. С. 280–287. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-3-280-287>

© Демидов А.С., Кочуров А.С., 2024



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Mains Electricity Base Rate Minimization Under Specified Conditions of Power Consumption with the use of Capacitors

Alexander S. Demidov^{a,b}✉, Alexander S. Kochurov^a✉

^aLomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

^bRUDN University, Moscow, Russia

✉ demidov.alexandre@gmail.com

Article history

Received: April 30, 2024

Revised: July 17, 2024

Accepted: July 23, 2024

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Authors' contribution

Undivided co-authorship

Abstract. The negative consequences of the peak selection of network products (electricity, water, gas, and other resources, including time distribution in computer programs) force the supplier to introduce tariff-based time payments. Thus, the question arises as to whether the consumer's payment can indeed be minimized at a specific mode of product consumption if there is a system of its accumulation, that is, capacitor or storage, which replenishes or consumes its reserves at times of low and high tariff prices. To achieve this objective, it is necessary to make optimal use of accumulator resources, which can be drawn upon during periods of high tariffs and replenished when the need for them is less urgent and tariffs are lower. To achieve this, an appropriate mathematical problem is formulated (for the purposes of concretization, relating to the question of minimizing the payment for electricity consumption) that considers the operational characteristics of the storage and the different modes of energy consumption. This mathematical problem for the minimum can be solved using standard linear programming. The results of the numerical calculations of payments for a particular enterprise both without storage and with the use of capacitor are presented. The gain in payment was approximately 20 per cent.

Keywords: Time-based payment, energy charge minimization, capacitor, linear programming

Acknowledgments

The authors express their gratitude to E.S. Yatsenko for useful discussions.

For citation

Demidov AS, Kochurov AS. Mains electricity base rate minimization under specified conditions of power consumption with the use of capacitors. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2024;25(3):280–287. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-3-280-287>

Введение

Сетевой поставщик энергии, например, электрической, заинтересован в том, чтобы потребители, прежде всего крупные промышленные предприятия, не создавали пикового отбора. В связи с этим поставщик энергии обычно взимает плату с потребителя в зависимости от динамики $Q:t \rightarrow Q(t)$ отбора энергии из сети за тот или иной временной период T . Этот период подразделяется на N равных интервалов длительности τ , разделенных моментами времени $t_n = n\tau$, $n = 0, 1, 2, \dots, N$. Интервал τ также может быть разделен на одинаковые подынтер-

валы и т.д. Но чтобы не загромождать изложение многоуровневым разбиением временного периода T (год, месяц, сутки, минуты, секунды), ограничимся здесь лишь разбиением T на три уровня (сутки, часы, минуты). Этого обычно достаточно даже в наиболее типичной ситуации, когда плата за отбираемую энергию берется ежемесячно, поскольку функционирование имеющейся у предприятия системы накопления (накопителя энергии, газа, воды и др.), как правило, одинаково и в дальнейшем (для конкретизации постановки задачи и простоты изложения) будем считать, что $T = N\tau$ — это одни сутки, а τ — это один час, т.е. $N = 24$.

Одной из возможных формул оплаты в течение периода T (одни сутки) за отбираемую из сети энергию является следующая¹ [1–9]:

$$S = S_1 + S_2 + S_3, \quad (1)$$

$$S_1 = K_1 \int_{t_{17}}^{t_{18}} Q(t) dt,$$

$$S_2 = K_2 \int_{t_0}^{t_{24}} Q(t) dt, \quad (2)$$

$$S_3 = K_3 \max_{8 \leq n \leq 19} \int_{t_n}^{t_{n+1}} Q(t) dt,$$

где $K_j, j = 1, 2, 3$, — тарифные коэффициенты, а функция $Q: t \rightarrow Q(t)$, характеризующая *почасовой* отбор энергии из сети, является ступенчатой (иначе говоря, кусочно-постоянной): она принимает некоторое постоянное значение

$$Q(t) = u_n \text{ при } t \in [t_n, t_{n+1}), \quad (3)$$

$$n = 0, 1, 2, \dots, N-1.$$

Через $t_{n,m}$ будем обозначать момент времени n часов и m минут, считая, что $t_{n,M} = t_{n+1,0}$, где $n = 0, 1, \dots, N-1, N = 24$ и $m = 0, 1, 2, \dots, M, M = 60$.

Фиксированная для данного предприятия функция *поминутного* потребления энергии $P: t \rightarrow P(t)$ тоже является ступенчатой с интер-

валами постоянства, определяемыми *узлами*

$$t_{n,m} = n + \frac{m}{M}.$$

Замечание 1. Очевидно, что зарядка/разрядка накопителя, характеризуемая функцией Q , не должна происходить чаще минимального интервала изменения функции потребления P . Поэтому шкала разбиения временного периода T (год, месяц, сутки, часы, минуты, секунды) для функции потребления P может либо совпадать, либо быть более мелкой, чем у функции отбора Q . Для большей общности рассмотрения здесь выбран второй вариант: для P трехуровневый (сутки, часы, минуты), а для Q двухуровневый (сутки, часы). Впрочем, в расчетах был взят двухуровневый (сутки, часы) как для P , так и для Q , что соответствует реальной ситуации по данным потребления электроэнергии на конкретном промышленном производстве.

Если предприятие имеет накопитель² [10–12], то при *заданной динамике* потребления энергии $P: t \rightarrow P(t)$ предприятие может снизить плату за отбираемую из сети энергию за счет снижения отбора сетевой энергии в каждый период $[t_n, t_{n+1}]$ ($0 \leq n \leq N-1$) до некоторого *искомого* уровня u_n , компенсируя ее недобор $\max\{P(t) - u_n, 0\}$ в период $[t_n, t_{n+1})$ энергией из системы накопления, запасенной ранее, когда максимум $P(t)$ был меньше u_n . Таким образом,

¹ См.: Арктик-энерго. Плановые часы пиковой нагрузки по месяцам 2022 г. URL: <http://www/arctic-energo.ru> (дата обращения: 22.03.2024); ЭНКОСТ. Я энергетик. Как перейти на более выгодный тариф по электроэнергии. URL: <https://encost.com/publikacii/cenovye-kategorii/> (дата обращения: 22.03.2024); Об установлении единых (котловых) тарифов на услуги по передаче электрической энергии по сетям г. Москвы на 2022 г. URL: <https://www.mos.ru/depr/documents/tarifnaia-politika/pa-v-sfere-gosudarstvennogo-regulirovaniya-tarifov/view/263421220/> (дата обращения: 22.03.2024); Предельные уровни нерегулируемых цен на электрическую энергию (мощность), поставляемую АО «Мосэнергосбыт» потребителям. С. 2, 30. URL: <https://www.mosenergosbyt.ru/legals/tariffs-n-prices/between-670kW-10MW.php> (дата обращения: 22.03.2024); Ценовые категории. URL: <https://encost.com/publikacii/cenovye-kategorii/> (дата обращения: 15.03.2024); Насколько вырастут тарифы на электроэнергию для предприятий в 2024 году? URL: <https://encost.com/publikacii/na-skolko-vyrastut-tarify-na-elektroenergiju-dlya-predpriyatij-v-2024-godu/> (дата обращения: 22.03.2024).

² Сетевые накопители энергии Лиотех // Сетевые накопители энергии. Характеристики. URL: <https://www.liotech.ru/products/nakopiteli-i-ibp/setevye-nakopiteli-energii-01/> (дата обращения: 23.03.2024);

Li-ion для предприятий — NEOSUN Energy // Аккумуляторные батареи NEOSUN — NS48112-S и NS48112-P. www.so-ups.ru <https://neosun.com/ru/industrial-ess/> (дата обращения: 12.03.2024).

надо найти значения u_n , при которых величина S , определяемая формулой (1), будет минимальна. Как можно это сделать, изложено ниже.

1. Математическая постановка задачи

Заметим, что поиск минимума требуемой величины

$$S^{(1)-(2)} = K_1 u_{17} + K_2 \sum_{n=0}^{23} u_n + K_3 \max_{8 \leq n \leq 19} u_n$$

эквивалентен поиску минимума функции, линейно зависящей от компонент вектора

$$u = (u_0, u_1, u_2, \dots, u_{24}),$$

а именно функции

$$u \rightarrow S(u) = K_1 u_{17} + K_2 \sum_{n=0}^{23} u_n + K_3 u_{24} \quad (4)$$

при ограничениях, задаваемых линейными неравенствами

$$u_n \stackrel{def}{\leq} u_{24} = \max_{8 \leq s \leq 19} u_s, \quad n = 8, 9, \dots, 19,$$

т.е. неравенствами

$$\begin{aligned} u_8 \leq u_{24}, u_9 \leq u_{24}, u_{10} \leq u_{24}, \dots, u_{18} \leq \\ \leq u_{24}, u_{19} \leq u_{24}. \end{aligned} \quad (5)$$

При этом необходимо учитывать, что суммарное потребление энергии не может превышать отбираемую из сети энергию, т.е. должно быть выполнено неравенство

$$\sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} P(t_{n,m}) \frac{1}{M} \leq \sum_{n=0}^{N-1} u_n. \quad (6)$$

Кроме того, при эксплуатации накопителя должно быть выполнено ограничение

$$W^- \leq W(t) \leq W^+ \quad (7)$$

на емкость накопителя $W(t_{n,m})$ в момент

$t_{n,m} = n + \frac{m}{M}$ (n часов и m минут), представленную формулой

$$W(t_{n,m}) = W(0) + \int_0^{t_{n,m}} Q(t) dt - \int_0^{t_{n,m}} P(t) dt, \quad (8)$$

где константы W^\pm заданы изготовителем, а $W(0)$ потребителем.

При этом $0 \leq n \leq N-1$, $N = 24$, и $0 \leq m \leq M-1$, $M = 60$.

Поскольку кусочно-постоянная функция потребления P задана *по минутно* значениями $P(t_{n,m})$, а искомый *почасовой* отбор энергии определяется значениями $Q(t) = u_k$ при

$$t_k \leq t \leq t_{k+1} = t_k + \tau,$$

где $\tau = T / N = 1$ (ибо в рассматриваемом временном периоде T ровно N часов), то

$$\begin{aligned} \int_0^{t_{n,m}} P(t) dt &= \int_0^n P(t) dt + \int_n^{t_{n,m}} P(t) dt = \\ &= \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{M-1} P(t_{k,j}) \frac{1}{M} + \sum_{j=0}^{m-1} P(t_{n,j}) \frac{1}{M}, \end{aligned}$$

а

$$\begin{aligned} \int_0^{t_{n,m}} Q(t) dt &= \int_0^n Q(t) dt + \int_n^{t_{n,m}} Q(t) dt = \\ &= \sum_{k=0}^{n-1} u_k + u_n \frac{m}{M}. \end{aligned}$$

Поэтому условие $W(t_{n,m}) \in [W^-, W^+]$ на емкость накопителя принимает вид

$$\begin{aligned} W^- \leq W(0) + \sum_{k=0}^{n-1} u_k + u_n \frac{m}{M} - \\ - \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{M-1} P(t_{k,j}) \frac{1}{M} - \sum_{j=0}^{m-1} P(t_{n,j}) \frac{1}{M} \leq W^+, \end{aligned} \quad (9)$$

где для $n = 0$ опускаются суммы $\sum_{k=0}^{n-1} = \sum_{k=0}^{-1}$.

Кроме того, в каждый момент времени $t = t_{n,m}$ (n часов и m минут) скорость изменения емкости накопителя лимитируется параметром $P_* > 0$, а именно

$$\begin{aligned}
 -P_* &\leq u_n - P(t_{n,m}) \leq P_*, \\
 n &= 0, 1, \dots, N-1, \\
 m &= 0, 1, \dots, M-1,
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

где параметр P_* задается требованиями к эксплуатации накопителя, а $N = 24$ (в сутках 24 часа) и $M = 60$ (в одном часе 60 минут).

Таким образом, получаем задачу линейного программирования [13] о минимизации функции

$$S: u \rightarrow S(u) = K_1 u_{17} + K_2 \sum_{n=0}^{23} u_n + K_3 u_{24},$$

линейно зависящей от компонент вектора

$$u = (u_0, u_1, u_2, \dots, u_{23}, u_{24}),$$

которые подчинены линейным неравенствам (5), (6), (9) и (10). Эти неравенства задают в 25-мерном пространстве R^{25} векторов u выпуклый многогранник, в одной из вершин которого линейная функция достигает искомого минимального значения. Оно может быть найдено, например, с помощью программного пакета³.

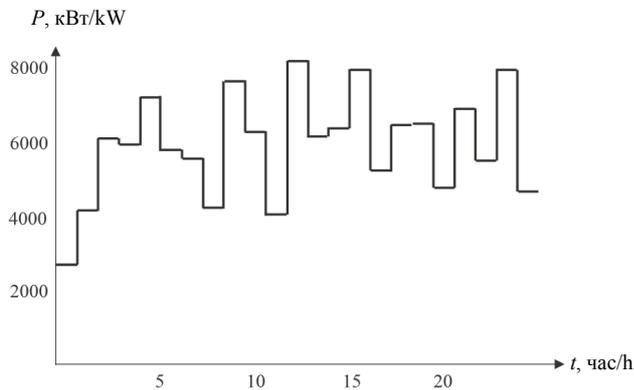


Рис. 1. Почасовое потребление
Источник: выполнено
А.С. Демидовым, А.С. Кочуровым
Figure 1. Hourly consumption
Source: made by A.S. Demidov, A.S. Kochurov

2. Численные результаты

На рис. 1 представлены *почасовые* данные $P(t_n)$ динамики потребления одного из предприятий. Диаграмма почасовой оплаты за отбираемую из сети энергию по тарифу (рис. 2), соответствующему коэффициентам [5; 6]

$$\begin{aligned}
 K_1 &= 45 \text{ у.е./кВт/ч}, \\
 K_2 &= 2 \text{ у.е./кВт/ч}, \\
 K_3 &= 45,8 \text{ у.е./кВт/ч}
 \end{aligned}$$

позволяет нам предположить, что с наступлением стабилизации оплаты за отбираемую из сети энергию после завершения активной фазы ее потребления должна начаться фаза подзарядки системы накопления. Это «физической строгости» предположение в целом соответствует строго математически обоснованным численно полученным значениям функции $Q: t \rightarrow Q(t)$ *почасового* отбора сетевой энергии, которые представлены на рис. 3 для следующих числовых значений [3; 4]:

$$\begin{aligned}
 W^- &= 229,2 \text{ кВт/ч}, P_* = 2292 \text{ кВт}, \\
 W^+ &= 2292 \text{ кВт/ч}, W(0) = 229,2 \text{ кВт/ч}.
 \end{aligned}$$

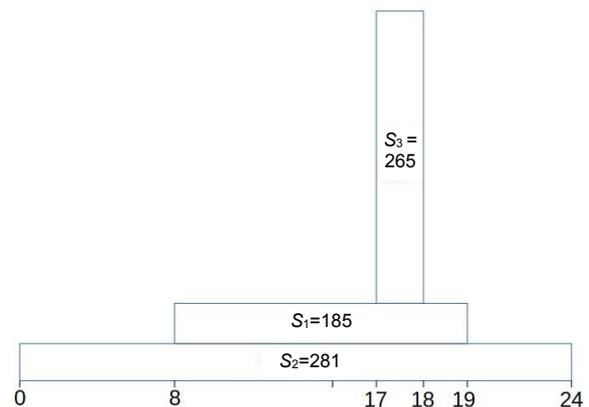


Рис. 2. Диаграмма почасовой оплаты $S_1 + S_2 + S_3$
Источник: выполнено
А.С. Демидовым, А.С. Кочуровым
Figure 2. Hourly payment diagram $S_1 + S_2 + S_3$
Source: made by A.S. Demidov, A.S. Kochurov

³ Linear Program Solver (LIPS) — бесплатный оптимизационный пакет, предназначенный для решения задач линейного, целочисленного и целевого программирования. URL: <https://linexp.ru/mathematic-modeling-algorithms/lipside.html> (дата обращения: 12.03.2024).

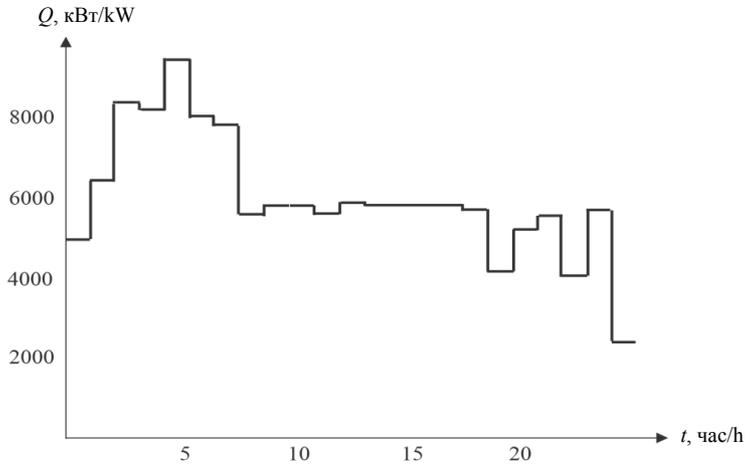


Рис. 3. Почасовой отбор энергии из сети при наличии накопителя
Источники: выполнено А.С. Демидовым, А.С. Кочуровым
Figure 3. Hourly extraction of energy from the network in the presence of a battery
Source: made by A.S. Demidov, A.S. Kochurov

Суммы

$$SB_1 = 288336, SB_2 = 281181, B_3 = 370583,$$

$$SB = SB_1 + SB_2 + SB_3 = 940100$$

в условных единицах, соответствующие режиму потребления без аккумулятора, ощутимо выше (на 22 %) сумм

$$S_1 = 185196, S_2 = SB_2 = 281181,$$

$$S_3 = 265609, S = S_1 + S_2 + S_3 = 731986,$$

соответствующих режиму потребления с использованием накопителя.

Замечание 2. Изложенный алгоритм решения исходной задачи предполагает, что априори известна функция P для данного временного периода T , в качестве которого выше были взяты 24 часа. Если такая априорная информация отсутствует, то можно, как и в случае с прогнозом погоды, сделать ориентировочные оценки на следующий день, используя данные «метеостанций» в виде случайных ε -возмущений, добавляющих случайным образом к функции P одно из трех значений $-\varepsilon, 0, +\varepsilon$. Если при этом функция Q , соответствующая этому ε -возмущению, будет «мало» отличаться от невозмущенной, то можно предполагать, что на следующий день функция Q почти не изменится.

В качестве примера были взяты «метеостанции» на двух временных участках с априори наиболее непредсказуемой «погодой» потребления энергии. В итоге были просчитаны $9 = 3^2$ случайных изменений потребления энергии, таких, что $|P_e^j - P|/P \leq 0,05, j = 1, 2$. Если считать, что такими наиболее непредсказуемыми временными участками являются $t_1 = 8$ и $t_2 = 12$, то, как оказалось, соответствующие суммы незначительно изменились от приведенной выше $S = 731986$. А именно они для просчитанных $9 = 3^2$ случаев были таковы:

$$736266, 738471,$$

$$\max = 756249, 752379, 728867,$$

$$\min = 708296, 733733, 720571, 740248.$$

Заключение

1. Вполне очевидной является идея снизить плату за потребляемые ресурсы в условиях повышенной тарифной платы в периоды пиковых потреблений. Для этого необходимо попытаться разумно использовать накопители (хранилища) ресурсов, из которых можно черпать ресурсы в периоды высоких тарифов оплаты, а тогда, когда потребность в них снижается и, соответственно, низки тарифы оплаты, пополнять хра-

нилища ресурсами. В работе доказана возможность минимизации оплаты и представлен простой метод реализации этой возможности. Показано, как такая задача минимизации сводится к стандартной задаче линейного программирования.

2. Хотя в работе проблема минимизации иллюстрируется лишь на примере промышленного потребления сетевой электроэнергии, однако предложенный метод минимизации может быть применен во многих других областях, где имеются пиковые нагрузки как различных материальных, так и временных ресурсов, например при распределении времени в суперкомпьютерах.

Список литературы

1. Богдан Е.В., Карницкий Н.Б. Структурно-экономический подход при выборе пиковых регулирующих мощностей на тепловых электростанциях // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2023. Т. 66. № 6. С. 497–508. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-6-497-508>

2. Crew M.A., Fernando C.S., Kleindorfer P.R. The theory of peak-load pricing: A survey // *Journal of Regulatory Economics*. 1995. Vol. 8. P. 215–248. <https://doi.org/10.1007/BF01070807>

3. Arnott R., de Palma A., Lindsey R. A Structural Model of Peak-Period Congestion: A Traffic Bottleneck with Elastic Demand // *The American Economic Review*. 1993. Vol. 83. No. 1. P. 161–179. URL: <http://www.jstor.org/stable/2117502> (accessed: 15.03.2024).

4. Andersson R., Taylor L. The Social Cost of Un-supplied Electricity: A Critical Review // *Energy Economic*. 1986. Vol. 8. No. 3. P. 139–146. [https://doi.org/10.1016/0140-9883\(86\)90012-5](https://doi.org/10.1016/0140-9883(86)90012-5)

5. Ault R.W., Ekelund R.B. The Problem of Unnecessary Originality in Economics // *Southern Economic Journal*. 1987. Vol. 53. No. 3. P. 650–661. URL: <https://www.jstor.org/stable/1058761?origin=crossref> (accessed: 15.03.2024).

6. Berry L. A Review of the Market Penetration of U.S. Residential and Commercial Demand Side Management Programmes // *Energy Policy*. 1993. Vol. 21. No. 1. P. 53–67. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(93\)90208-W](https://doi.org/10.1016/0301-4215(93)90208-W)

7. Bös D. Pricing and Price Regulation: An Economic Theory for Public Enterprises and Public utilities. Amsterdam: North-Holland Publ.; 1994. ISBN 10: 0444884785. ISBN 13: 9780444884787

8. Borenstein S., Nancy L.R. Competition and Price Dispersion in the U.S. Airline Industry // *Journal of Political Economy*. 1994. Vol. 4. No. 4. P. 653–83. <https://doi.org/10.1086/261950>

9. Brookshire D.S., Coursey D.L. Measuring the Value of a Public Good: An Empirical Comparison of Elicitation Procedures. *American Economic Review*. 1987. Vol. 77. No. 4. P. 554–566. URL: <http://library.wrds.uwyo.edu/wrp/87-04/87-04.pdf> (accessed: 15.03.2024).

10. Добрего К.В., Козначеев И.А. Моделирование функционального взаимодействия блоков гибридного накопителя электроэнергии // *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2023. Т. 66. № 5. С. 405–422. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-405-422>

11. Молочко А.Ф., Привалов А.С., Жученко Е.А., Ивашко Е.В. Концепция применения систем накопления энергии на базе литий ионных аккумуляторов в Белорусской энергосистеме // Отчет о НИР заключительный. ГПО «Белэнерго» РУП «БелГЭИ». Минск, 2022. Т. 1, 2. № Б 22-3/4. 189 с.

12. Бельский А.А., Скамьин А.Н., Васильков О.С. Применение гибридных накопителей электроэнергии для выравнивания графика нагрузки предприятий. *Энергетика // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2020. Т. 63. № 3. С. 212–222. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-212-222>

13. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест П., Шмай К. Алгоритмы: построение и анализ. 2-е изд. М.: Вильямс, 2006. С. 1296. ISBN 5-8459-0857-4

References

1. Bogdan EB, Karnitsky NB. Structural and economic approach to the selection of peak regulating capacities at thermal power plants. *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 2023;66(6):497–508. (In Russ.) <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-6-497-508>

2. Crew MA, Fernando CS, Kleindorfer PR. The theory of peak-load pricing: A survey. *Journal of Regulatory Economics*. 1995;8:215–248. <https://doi.org/10.1007/BF01070807>

3. Arnott R, de Palma A, Lindsey R. A Structural Model of Peak-Period Congestion: A Traffic Bottleneck with Elastic Demand. *The American Economic Review*. 1993;83(1):161–179. Available from: <http://www.jstor.org/stable/2117502> (accessed: 15.03.2024)

4. Andersson R, Taylor L. The Social Cost of Un-supplied Electricity: A Critical Review. *Energy Economic*. 1986;8(3):139–46. [https://doi.org/10.1016/0140-9883\(86\)90012-5](https://doi.org/10.1016/0140-9883(86)90012-5)

5. Ault RW, Ekelund RB. The Problem of Unnecessary Originality in Economics. *Southern Economic Journal*. 1987;53(3):650–661. Available from: <https://www.jstor.org/stable/1058761?origin=crossref> (accessed: 15. 03.2024)
6. Berry L. A Review of the Market Penetration of U.S. Residential and Commercial Demand Side Management Programmes. *Energy Policy*. 1993;21(1):53–67. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(93\)90208-W](https://doi.org/10.1016/0301-4215(93)90208-W)
7. Bös D. *Pricing and Price Regulation: An Economic Theory for Public Enterprises and Public utilities*. Amsterdam: North-Holland Publ.; 1994. ISBN 10: 0444884785 ISBN 13: 9780444884787
8. Borenstein S, Nancy LR. Competition and Price Dispersion in the U.S. Airline Industry, *Journal of Political Economy*. 1994;102(4):653–683. <https://doi.org/10.1086/261950>
9. Brookshire DS, Coursey DL. Measuring the Value of a Public Good: An Empirical Comparison of Elicitation Procedures. *American Economic Review*. 1987;77(4):554–566. Available from: <http://library.wrds.uwyo.edu/wrp/87-04/87-04.pdf> (accessed: 15. 03.2024).
10. Dobrego KV, Koznacheev IA. Modeling the functional interaction of hybrid energy storage units. *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 2023;66(5):405–422. (In Russ.) <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-405-422>
11. Molochko AF, Privalov AS, Zhuchenko EA, Ivashko EV. The concept of using energy storage systems (ESS) based on lithiumion batteries in the Belarusian energy system. *Research report (Stage 2)*, RUE “BELTEI”. Minsk, 2022. No. B 22-4/3.
12. Belsky AA, Skamin AN, Vasilkov OS. The use of hybrid energy storage devices to level the load curve of enterprises. *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 2020;63(3):212–222. (In Russ.) <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-212-222>
13. Cormen T, Leiserson C, Rivest R, Stein K. *Algorithms: construction and analysis*. 2nd ed. Moscow: Williams Publ.; 2006. (In Russ.) ISBN 5-8459-0857-4

Сведения об авторах:

Демидов Александр Сергеевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общих проблем управления, Механико-математический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия; доцент кафедры механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; AuthorID: 7693, ORCID: 0000-0002-0245-233X; e-mail: demidov.alexandre@gmail.com

Кочуров Александр Савельевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общих проблем управления, Механико-математический факультет; старший научный сотрудник, Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия; AuthorID: 6978; ORCID: 0009-0002-6307-8609; e-mail: kchrvas@yandex.ru

About the authors

Alexander S. Demidov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of General Problems of Management, Faculty of Mechanics and Mathematics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; Associate Professor of the Department of Mechanics and Control Processes, Engineering Academy, RUDN University, Moscow, Russia; AuthorID: 7693, ORCID: 0000-0002-0245-233X; e-mail: demidov.alexandre@gmail.com

Alexander S. Kochurov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of General Problems of Management, Faculty of Mechanics and Mathematics; Senior Researcher, Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; AuthorID: 6978, ORCID: 0009-0002-6307-8609; e-mail: kchrvas@yandex.ru