

## Оценки инвестиционной доходности для накопителей электроэнергии

Васин А.А.<sup>1\*</sup>, Цыганов Н.И.<sup>1</sup>, Саносян Г.А.<sup>1</sup>, Абдулаев С.Ю.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Кафедра исследования операций, факультет ВМК, МГУ имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы, д.1, стр. 52, 2-й учебный корпус, Москва, 119991, Россия.

\*Автор(ы), ответственный(ые) за переписку. E-mail(s):

[foravas@yandex.ru](mailto:foravas@yandex.ru);

Соавторы: [nikita--93@mail.ru](mailto:nikita--93@mail.ru); [hhunrey@yandex.ru](mailto:hhunrey@yandex.ru);

[said\\_v15@mail.ru](mailto:said_v15@mail.ru);

### Аннотация

Развитие электроэнергетики является важной задачей для ускорения экономического роста в России. Использование новых экономических и технических инструментов для оптимизации производства и потребления электроэнергии играет важную роль в этом процессе. Среди таких инструментов отметим накопители электрической энергии. Для рынков электроэнергии характерны большие перепады цен между пиковыми периодами с большими объемами потребления и ночными периодами с низким потреблением. В этой ситуации полезную роль для потребителя может сыграть накопитель энергии: потребитель накапливает в нем энергию при низких ценах и использует ее при высоких ценах. Накопители могут также использоваться для получения прибыли от перепродажи энергии в указанном режиме.

Цель настоящей работы - оценка доходности инвестиций в разные типы накопителей на разных рынках. Обычно оценка инвестиционной доходности основывается на расчете чистой приведенной стоимости (ЧПС или NPV) потока затрат и доходов, соответствующих данной инвестиции.

**Ключевые слова:** накопители энергии, инвестиционный анализ, оптимальное управление, чистая приведённая стоимость

Получено редакцией 05.05.2025; внесены авторские правки 15.05.2025; принята к публикации 02.06.2025

# 1 Введение

Развитие электроэнергетики является важной задачей для ускорения экономического роста в России. Использование новых экономических и технических инструментов для оптимизации производства и потребления электроэнергии играет важную роль в этом процессе. Среди таких инструментов отметим накопители электрической энергии. Для рынков электроэнергии характерны большие перепады цен между пиковыми периодами с большими объемами потребления и ночными периодами с низким потреблением. В этой ситуации полезную роль для потребителя может сыграть накопитель энергии: потребитель накапливает в нем энергию при низких ценах и использует ее при высоких ценах. Накопители могут также использоваться для получения прибыли от перепродажи энергии в указанном режиме.

Цель настоящей работы - оценка доходности инвестиций в разные типы накопителей на разных рынках. Обычно оценка инвестиционной доходности основывается на расчете чистой приведенной стоимости (ЧПС или NPV) потока затрат и доходов, соответствующих данной инвестиции. При этом будущие платежи дисконтируются с учетом банковской процентной ставки для безрисковых вложений. Если найденная ЧПС положительна, то инвестиция считается выгодной, в противном случае - убыточной. В случае случайного или неопределенного характера будущих платежей коэффициент дисконтирования может меняться с целью учета рисков, связанных с этой неопределенностью. В случае накопителей основная компонента затрат - единовременная стоимость покупки накопителя данного типа с определенными значениями мощности  $V$  (скорости загрузки и разгрузки) и объема накопителя  $E$ . Далее рассматриваются небольшие накопители, работа каждого из которых не влияет на рыночные цены. При пропорциональном изменении характеристик накопителя можно использовать одинаковую стратегию управления, пропорционально меняя поток энергии между ним и внешней сетью. Удельная доходность при этом не меняется. Поэтому далее для каждого типа накопителей рассматриваются мощность 1 кВт и емкость  $e$  кВт\*ч. Методы расчета оптимальной стратегии управления накопителем разработаны в наших предшествующих работах [1, 2]. Нужные результаты по этому вопросу изложены ниже в разделе 1. Далее в разделе 2 для разных вариантов динамики цен (тарифов на электроэнергию в течение суток) указываются оптимальное управление и прибыль в зависимости от параметров накопителя и емкости  $e$ . В разделе 3 определяется оптимальный объем накопителя в зависимости от тарифного плана. В разделе 4 на основе данных о накопителях различных типов [3] определяются инвестиционные доходности и указываются типы накопителей, представляющие интерес с точки зрения инвестиций. В заключительном разделе 5 обсуждаются проблемы точности оценки ЧПС

и темпа роста мощности, возможности обобщения и уточнения полученных результатов. Наши результаты сопоставляются с данными из статьи [4] относительно распространения технологий накопления энергии с 2000 по 2025 год и прогнозом до 2030 г.

## 2 Оптимальные стратегии управления накопителем для типичных суточных тарифов

Рассматриваются два типа суточных тарифов на электроэнергию:  $P^a(t)$  и  $P^b(t)$  (рис. 1 и 2). Тип  $a$  соответствует российскому рынку,  $b$  - рынкам Великобритании, Индии, США и ряда других стран. Типы различаются количеством интервалов с постоянными ценами. Моменты изменения цен обозначаются через  $\tau_i$ ,  $i = 0, 1, \dots, n$ , длина интервала  $[\tau_i, \tau_j]$  - через  $\Delta_{ji} = \tau_j - \tau_i$ , при этом  $\Delta_{n0} = T$  - продолжительность суток.

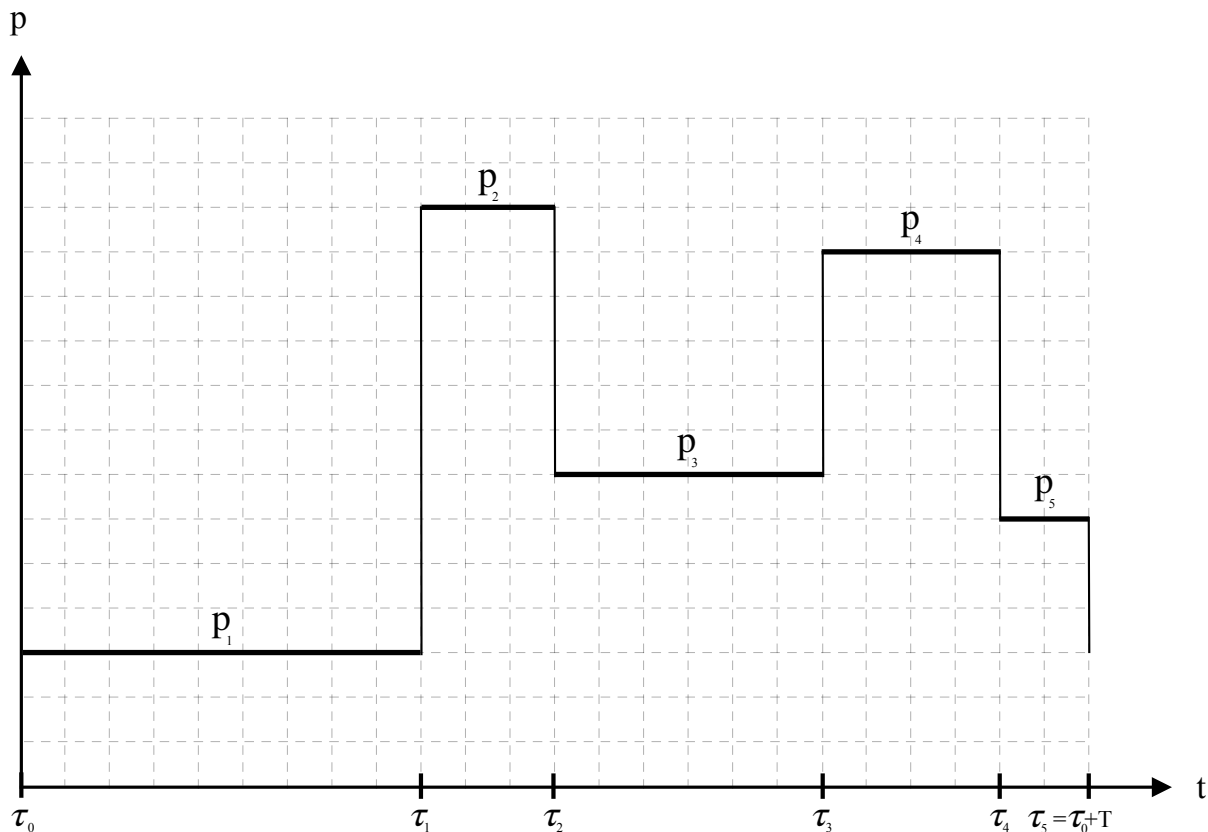


Рис. 1: Тип  $a$  тарифов на электроэнергию

Тип  $a$  тарифов включает пять интервалов постоянной цены: ночной интервал, утренний пик, дневной полупик и вечерние пик и полупик. При этом предполагается выполнение следующих ограничений на цены и на длины временных промежутков:  $\Delta_{21} < \Delta_{43} < \Delta_{32}$ ,  $\Delta_{21} + \Delta_{43} < \Delta_{10} < \Delta_{41}$ ,  $p_3/p_5 < \eta$ ,  $p_2 \geq p_4$ ,  $p_3 \geq p_5$ ,  $p_2/p_1$ ,  $p_3/p_1$ ,  $p_2/p_3$ ,  $p_4/p_3$ ,  $p_4/p_5$ ,  $p_5/p_1 > \eta > 1$ . Здесь  $\eta$  - обратный коэффициент эффективности цикла

загрузки и разгрузки накопителя. Последние неравенства означают, что покупка по меньшей цене и продажа по большей прибыльны с учетом потерь.

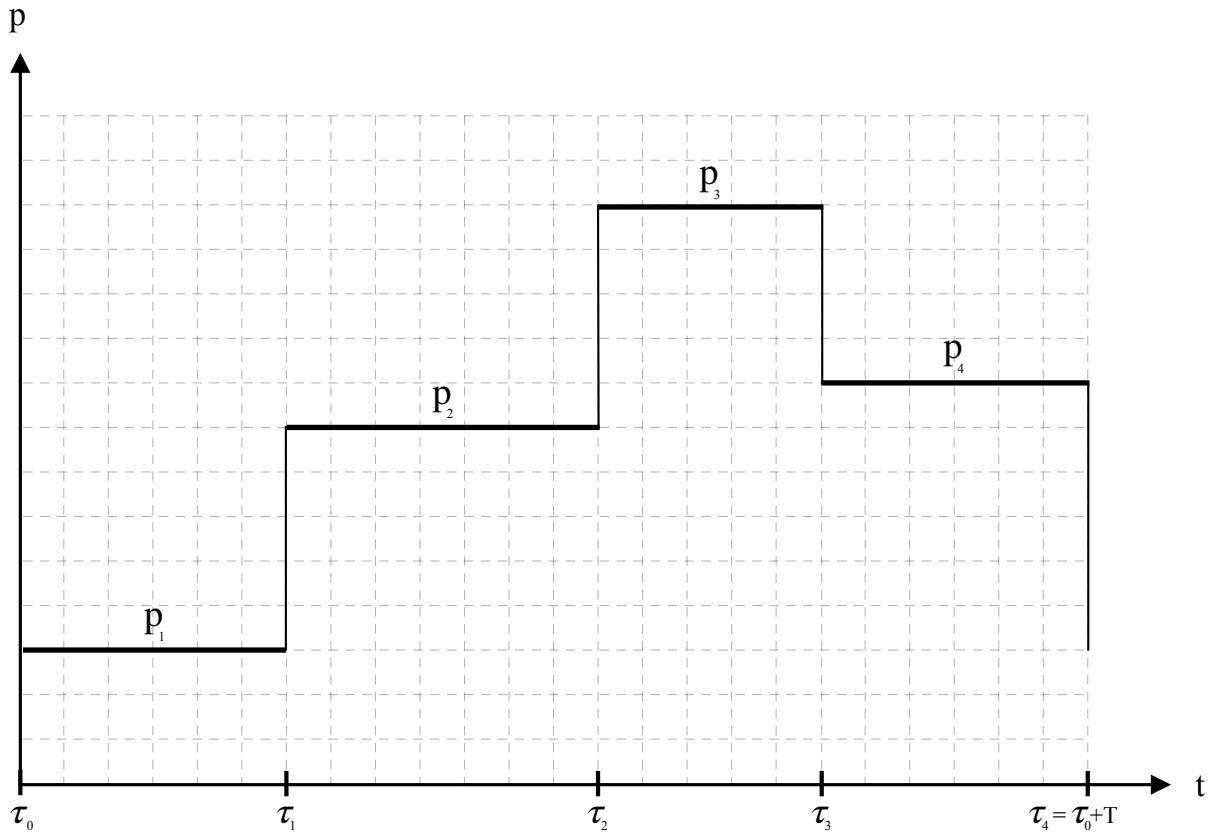


Рис. 2: Тип  $b$  тарифов на электроэнергию

Тип  $b$  тарифов включает четыре интервала постоянной цены: ночной, утренний полупик, пик и вечерний полупик. При этом предполагается выполнение следующих ограничений:  $\Delta_{32} < \Delta_{10} < \Delta_{42}$ ,  $p_1 \leq p_2 \leq p_4 \leq p_3$ ,  $p_2/p_1, p_3/p_2, p_3/p_4 > \eta$ ,  $p_4/p_2 < \eta$ .

Задача оптимального управления для накопителя с непрерывным временем  $t$  в течение интервала планирования  $(\tau_0, \tau_0 + T)$  сформулирована и исследована в нашей предыдущей работе. Приведем нужные определения и результат с учетом предположений о мощности и объеме накопителя, сделанных во введении. Обозначим через  $e$  - объем накопителя,  $1$  - максимальную скорость его зарядки и разрядки,  $\eta_{ch}$  и  $\eta_{dis}$  - обратные коэффициенты эффективности зарядки и разрядки соответственно,  $\lambda$  - коэффициент интенсивности саморазрядки накопителя,  $v(t)$  - интенсивность, с которой заряжается энергией (если  $> 0$ ) или разряжается (если  $< 0$ ) накопитель в момент  $t$ . Стратегия управления накопителем задается функцией  $v(t)$ ,  $t \in (\tau_0, \tau_0 + T)$ , а его состояние в момент  $t$  - функцией  $E(t)$ , указывающей объем накопленной энергии.

Эти величины удовлетворяют следующим уравнениям и ограничениям:

$$\forall t |v(t)| \leq 1; E'(t) = -\lambda E(t) + v(t); 0 \leq E(t) \leq e; E(0) = E(T).$$

Оптимальная стратегия накопителя  $v^*(t)$  максимизирует прибыль от перепродажи энергии при данных ценах  $p(t)$ ,  $t \in (\tau_0, \tau_0 + T)$ :

$$v^*(\cdot) \rightarrow \max_{v(\cdot)} \int_0^T -p_0(t) \hat{\eta}(t) v(t) dt,$$

где

$$\hat{\eta}(t) = \begin{cases} \eta_{ch}, & \text{если } v(t) > 0, \\ 1/\eta_{dis}, & \text{если } v(t) < 0. \end{cases}$$

Укажем оптимальную стратегию управления накопителем и соответствующую максимальную прибыль для тарифа типа  $a$  в зависимости от объема накопителя  $e$ .

**Утверждение 1.** Для тарифа  $P^a(t)$  оптимальная стратегия  $v^{a*}(t)$  управления накопителем и прибыль  $Pr^a(e)$  в зависимости от его объема  $e$  при использовании данной стратегии определяются следующим образом.

1) Если  $e \leq \Delta_{21}$ , то  $Pr^a(e) = e(p_2 - \eta p_1 + p_4 - \eta p_3) / \eta_{dis}$ ,

$$v^{a*}(t) = \begin{cases} 0, & t \in (\tau_0, \tau_1 - e), \\ 1, & t \in (\tau_1 - e, \tau_1), \\ -1, & t \in (\tau_1, \tau_1 + e), \\ 0, & t \in (\tau_1 + e, \tau_3 - e), \\ 1, & t \in (\tau_3 - e, \tau_3), \\ -1, & t \in (\tau_3, \tau_3 + e), \\ 0, & t \in (\tau_3 + e, T). \end{cases}$$

2) Если  $e \in [\Delta_{21}, \Delta_{43}]$ , то  $Pr^a(e) = (\Delta_{21}(p_2 - \eta p_3) + e(p_4 - \eta p_1)) / \eta_{dis}$ ,

$$v^{a*}(t) = \begin{cases} 0, & t \in (\tau_0, \tau_1 - e), \\ 1, & t \in (\tau_1 - e, \tau_1), \\ -1, & t \in (\tau_1, \tau_2), \\ 0, & t \in (\tau_2, \tau_3 - \tau_2 + \tau_1), \\ 1, & t \in (\tau_3 - \tau_2 + \tau_1, \tau_3), \\ -1, & t \in (\tau_3, \tau_3 + e), \\ 0, & t \in (\tau_3 + e, T). \end{cases}$$

3) Если  $e \in [\Delta_{43}, \Delta_{21} + \Delta_{43}]$ , то

$$Pr^a(e) = (\Delta_{21}(p_2 - \eta p_3) + \Delta_{43}(p_4 - \eta p_3) + \eta e(p_3 - p_1)) / \eta_{dis},$$

$$v^{a*}(t) = \begin{cases} 0, & t \in (\tau_0, \tau_1 - e), \\ 1, & t \in (\tau_1 - e, \tau_1), \\ -1, & t \in (\tau_1, \tau_2), \\ 0, & t \in (\tau_2, 2\tau_3 - \tau_4 - \tau_2 + \tau_1 + e), \\ 1, & t \in (2\tau_3 - \tau_4 - \tau_2 + \tau_1 + e, \tau_3), \\ -1, & t \in (\tau_3, \tau_4), \\ 0, & t \in (\tau_4, T). \end{cases}$$

4) Если  $e \in [\Delta_{21} + \Delta_{43}, \Delta_{10}]$ , то

$$Pr^a(e) = (\Delta_{21}(p_2 - p_3) + \Delta_{43}(p_4 - p_3) + e(p_3 - \eta p_1)) / \eta_{dis},$$

$$v^{a*}(t) = \begin{cases} 0, & t \in (\tau_0, \tau_1 - e), \\ 1, & t \in (\tau_1 - e, \tau_1), \\ -1, & t \in (\tau_1, \tau_1 + \tau_3 - \tau_4 + e), \\ 0, & t \in (\tau_1 + \tau_3 - \tau_4 + e, \tau_3), \\ -1, & t \in (\tau_3, \tau_4), \\ 0, & t \in (\tau_4, T). \end{cases}$$

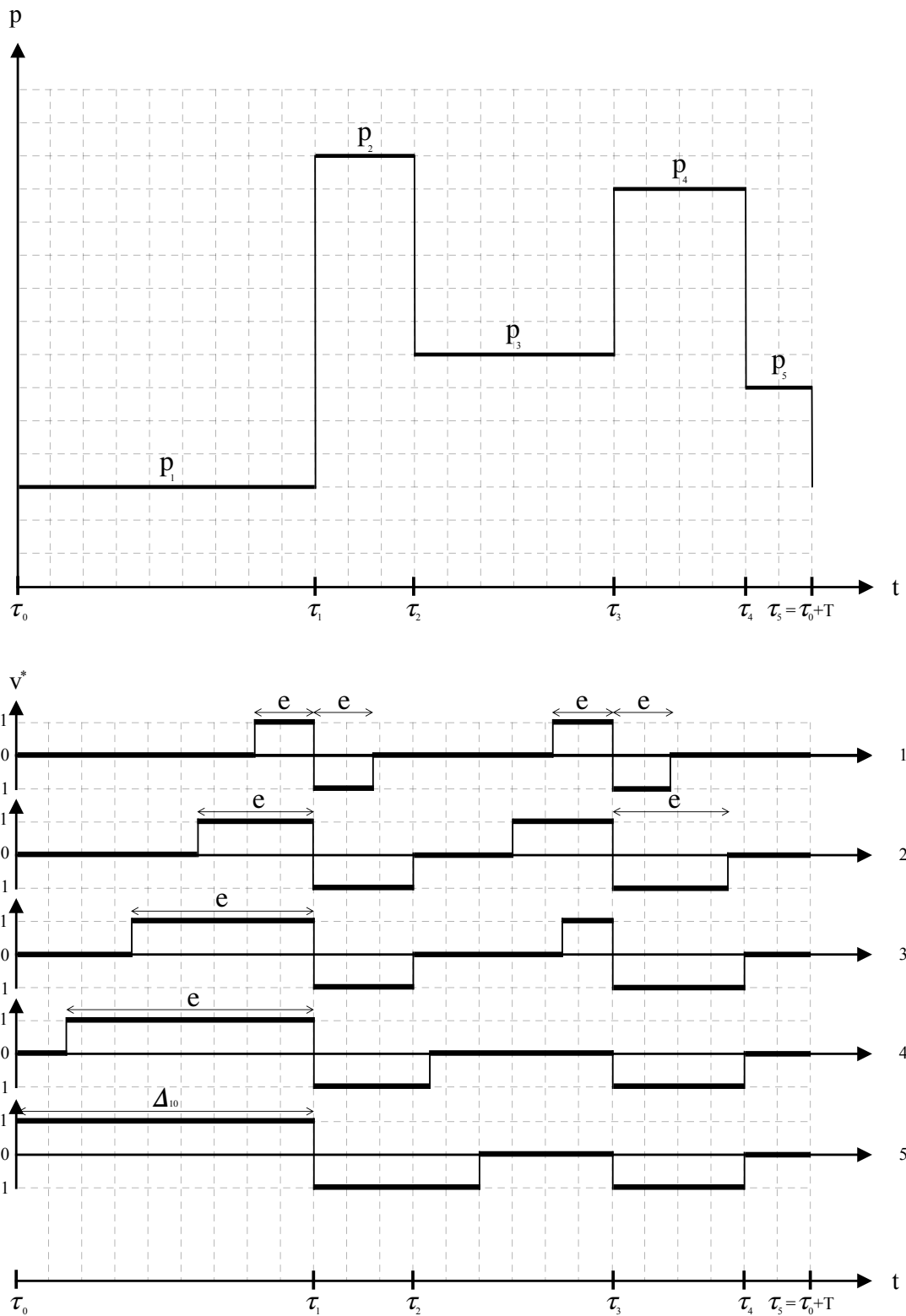
5) Если  $e \geq \Delta_{10}$ , то

$$Pr^a(e) = (\Delta_{21}(p_2 - p_3) + \Delta_{43}(p_4 - p_3) + \Delta_{10}(p_3 - \eta p_1)) / \eta_{dis},$$

$$v^{a*}(t) = \begin{cases} 1, & t \in (\tau_0, \tau_1), \\ -1, & t \in (\tau_1, 2\tau_1 - \tau_0 + \tau_3 - \tau_4), \\ 0, & t \in (2\tau_1 - \tau_0 + \tau_3 - \tau_4, \tau_3), \\ -1, & t \in (\tau_3, \tau_4), \\ 0, & t \in (\tau_4, T). \end{cases}$$

Стоит отметить, что при  $e \geq \Delta_{10}$  функция прибыли  $Pr^a(e)$  постоянна, поэтому увеличение  $e$  выше  $\Delta_{10}$  экономически нецелесообразно.

Графики оптимальных стратегий управления накопителем для тарифа типа  $a$  и различных диапазонов объема накопителя приводятся на рис. 3.



**Рис. 3:** Графики оптимальных стратегий управления накопителем для тарифа типа  $a$ ; диапазоны 1)-5) объема накопителя соответствуют утверждению 1

Приведем также оптимальную стратегию управления накопителем и соответствующую максимальную прибыль для тарифа типа  $b$ .

**Утверждение 2.** Для тарифа  $P^b(t)$  оптимальная стратегия  $v^{b*}(t)$  управления накопителем и прибыль  $Pr^b(e)$  в зависимости от его объема при использовании данной стратегии определяются следующим образом.

1) Если  $e \leq \Delta_{32}$ , то  $Pr^b(e) = e(p_3 - \eta p_1) / \eta_{dis}$ ,

$$v^{b*}(t) = \begin{cases} 1, & t \in (\tau_1 - e, \tau_1), \\ -1, & t \in (\tau_2, \tau_2 + e), \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

2) Если  $e \in [\Delta_{32}, \Delta_{10}]$ , то

$$Pr^b(e) = (\Delta_{32}(p_3 - p_1) + (e - \Delta_{32})(p_4 - p_1) - (\eta - 1)e p_1) / \eta_{dis},$$

$$v^{b*}(t) = \begin{cases} 1, & t \in (\tau_1 - e, \tau_1), \\ -1, & t \in (\tau_2, \tau_2 + e), \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

3) Если  $e \geq \Delta_{10}$ , то

$$Pr^b(e) = (\Delta_{32}(p_3 - p_1) + (\Delta_{10} - \Delta_{32})(p_4 - p_1) - (\eta - 1)\Delta_{10}p_1) / \eta_{dis},$$

$$v^{b*}(t) = \begin{cases} 1, & t \in (\tau_0, \tau_1), \\ -1, & t \in (\tau_2, \tau_2 + \tau_1 - \tau_0), \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

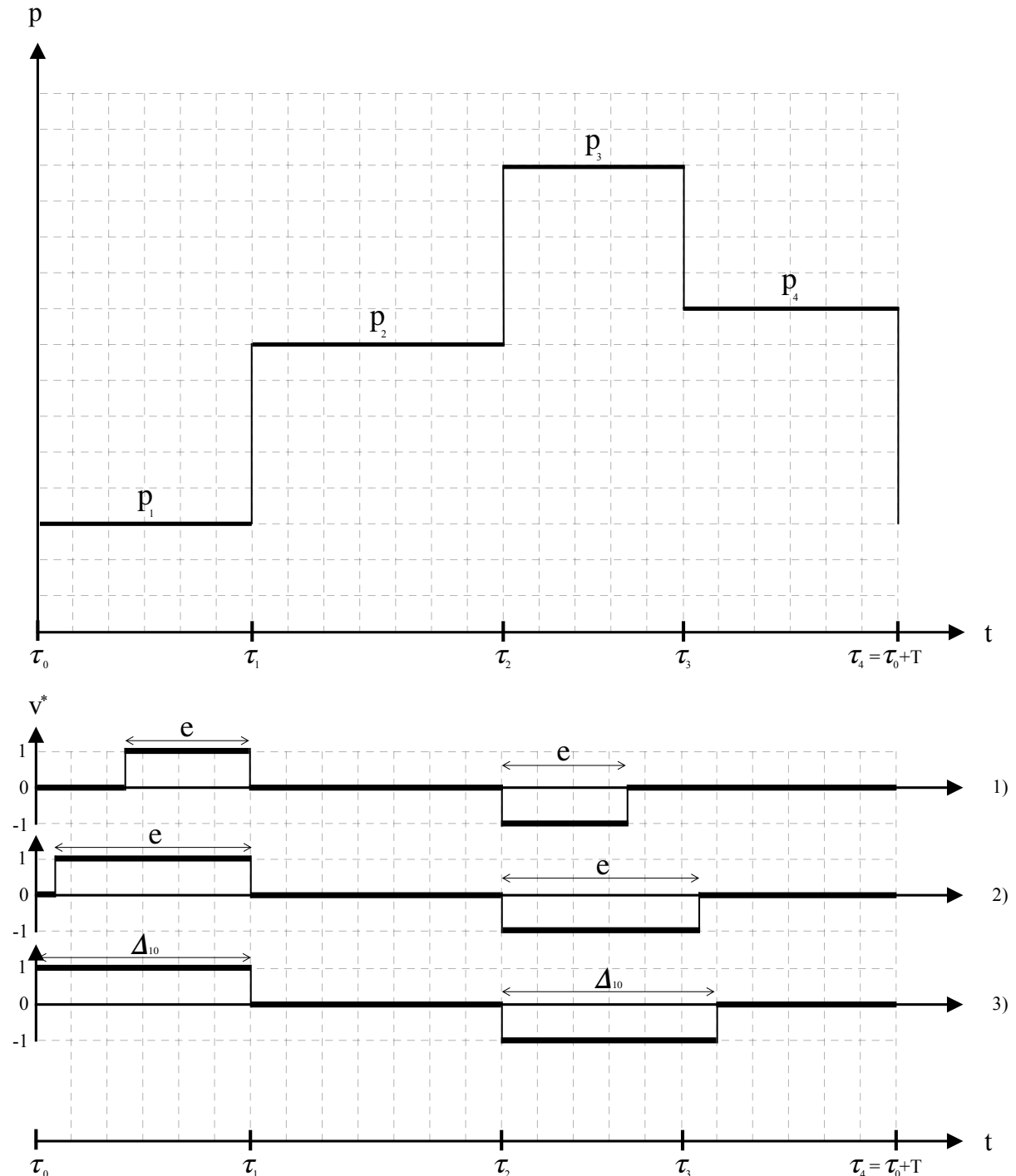
Графики оптимальных стратегий управления накопителем для тарифа типа  $b$  и различных диапазонов объема накопителя приводятся на рис. 4.

### 3 Расчет ЧПС для инвестиции в накопитель энергии

При расчете ЧПС возникают следующие проблемы.

1. Срок работы накопителя - от 5 до 30 (иногда и более) лет. Цены и тарифы на электроэнергию могут существенно меняться в течение такого времени. Как оценить ожидаемую прибыль от использования накопителя в перспективе?
2. Банковская процентная ставка также подвержена существенным изменениям. Например, вряд ли текущая годовая ставка около 20% сохранится длительное время. Как учесть эту неопределенность при расчете ЧПС?
3. Еще одна неопределенность связана с изменением цен накопителей, поскольку максимизация инвестиционного дохода связана с реинвестированием прибыли в увеличение мощности.

Начнем с анализа наиболее простого случая, когда цены на энергию и стоимости накопителей меняются в соответствии с банковской процентной ставкой. Таким образом, приведенные цены остаются постоянными. Предположим, что вся получаемая прибыль реинвестируется в увеличение мощности накопителя, и опишем динамику мощности в этом случае. Один из важных параметров - это коэффициент износа оборудования.



**Рис. 4:** Графики оптимальных стратегий управления накопителем для тарифа типа  $b$ ; диапазоны 1)-3) объема накопителя соответствуют утверждению 2

Допустим, что этот коэффициент является постоянным и равен  $r$ . Тогда динамика мощности описывается уравнением  $p_{t+1} = p_t \left( 1 - r + \frac{Pr(e)}{C(e)} \right)$ , где  $C(e)$  - это стоимость накопителя единичной мощности с данным объемом  $e$ ;  $Pr(e)$  - это максимальная суточная прибыль для накопителя с данным объемом. В работах по анализу использования накопителей приводятся данные о среднем времени действия в днях  $\tau$  для каждого типа. Опишем взаимосвязь этого показателя с коэффициентом износа оборудования.

**Лемма 1.** *В данных предположениях среднее время действия и коэффициент износа оборудования для накопителя связаны соотношением  $r = \frac{1}{\tau}$ .*

*Доказательство.*

$$\begin{aligned} \tau &= r \left( \sum_{t=1}^{\infty} t \cdot (1-r)^{t-1} \right) = r (1 + 2(1-r) + 3(1-r)^2 + \dots) = \\ &= r \left( 1 \cdot (1 + (1-r) + (1-r)^2 + \dots) + (1-r) (1 + (1-r) + (1-r)^2 + \dots) \right. \\ &\quad \left. + \dots \right) = r (1 + (1-r) + (1-r)^2 + \dots)^2 = r \left( \frac{1}{1-(1-r)} \right)^2 = \frac{1}{r}. \end{aligned}$$

□

Таким образом, динамика мощности накопителя описывается уравнением

$$p_{t+1} = p_t \left( 1 - \frac{1}{\tau} + \frac{Pr(e)}{C(e)} \right). \quad (1)$$

Мощность и соответствующая ей приведенная стоимость растут или убывают с постоянным темпом, зависящим от объема  $e$ . Если величина  $\max_e \frac{Pr(e)}{C(e)} - \frac{1}{\tau} > 0$ , то приведенная стоимость растет и инвестиция целесообразна, иначе - нет.

Рассмотрим задачу оптимизации темпа роста  $g(e) = \frac{Pr(e)}{C(e)} - \frac{1}{\tau}$ .

Согласно данным о накопителях [3], стоимость для многих типов является линейной функцией:  $C(e) = c_w + c_e e$ . Исходя из утверждения 1, зависимость прибыли от объема  $e$  для тарифа типа  $a$  описывается кусочно-линейной вогнутой функцией, вид которой приводится на рис. 5.

Выясним, как меняется темп роста  $g(e)$ , когда прибыль зависит от  $e$  линейно:  $Pr(e) = Pr_0 + ke$ .

**Лемма 2.** *Темп роста  $g(e)$  возрастает, если  $\frac{k}{Pr_0} > \frac{c_e}{c_w}$ .*

Доказательство.

$$\frac{Pr_0 + ke}{c_w + c_e e} = \frac{k}{c_e} \left( \frac{\frac{Pr_0}{k} + e}{\frac{c_w}{c_e} + e} \right) = \frac{k}{c_e} \left( 1 + \frac{\frac{Pr_0}{k} - \frac{c_w}{c_e}}{\frac{c_w}{c_e} + e} \right) \uparrow e \Leftrightarrow \frac{k}{Pr_0} > \frac{c_e}{c_w}.$$

□

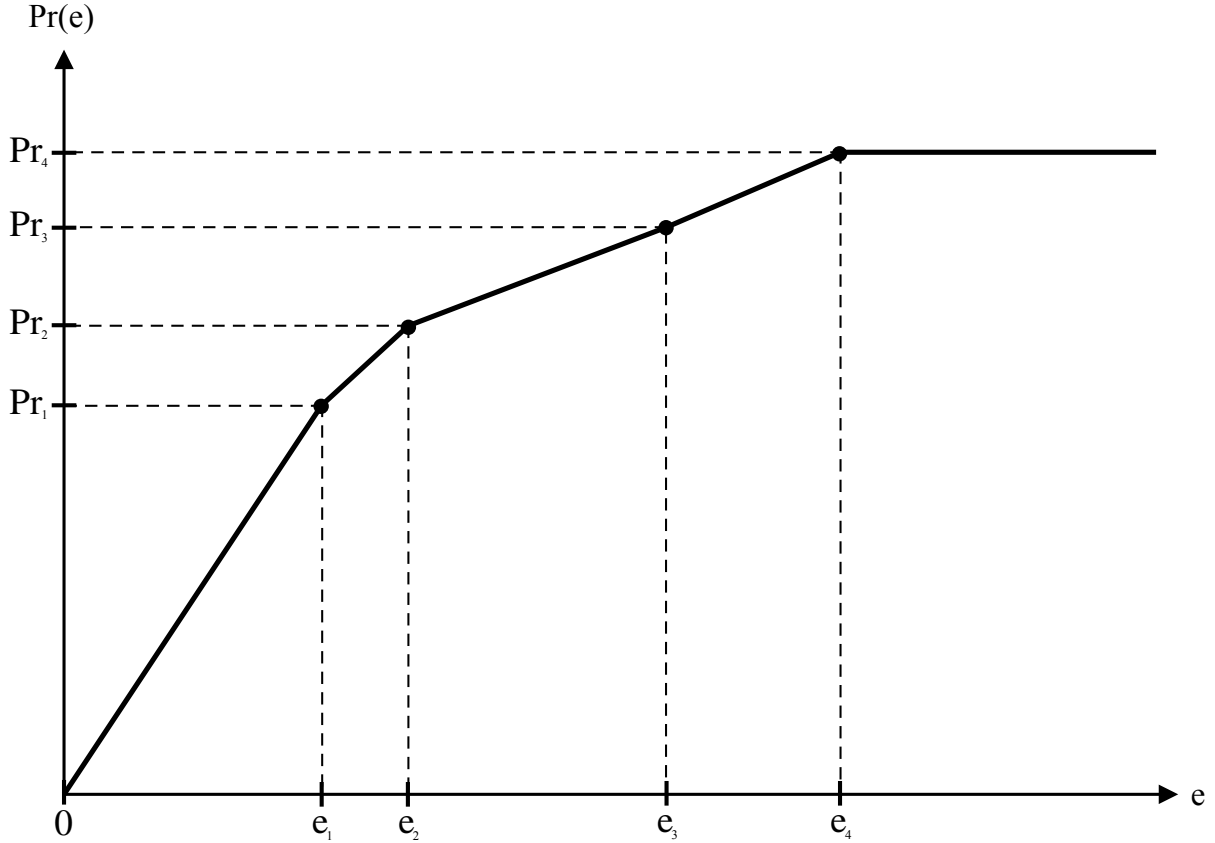


Рис. 5: График зависимости прибыли от объема  $e$  для тарифа типа  $a$

## 4 Определение оптимального объема накопителя

Рассмотрим задачу оптимизации темпа роста мощности по объему для двух указанных в разделе 1 вариантов суточных тарифов. Вариант  $a$  (рис. 1) соответствует российскому рынку.

Исходя из результатов раздела 1, прибыль при оптимальном управлении накопителем зависит от объема  $e$  следующим образом:

1. при  $e \leq \Delta_{21}$   $Pr^a(e) = e(p_2 - \eta p_1 + p_4 - \eta p_3) / \eta_{dis}$ ;
2. при  $e \in [\Delta_{21}, \Delta_{43}]$   $Pr^a(e) = (\Delta_{21}(p_2 - \eta p_3) + e(p_4 - \eta p_1)) / \eta_{dis}$ ;
3. при  $e \in [\Delta_{43}, \Delta_{21} + \Delta_{43}]$   
 $Pr^a(e) = (\Delta_{21}(p_2 - \eta p_3) + \Delta_{43}(p_4 - \eta p_3) + \eta e(p_3 - p_1)) / \eta_{dis}$ ;
4. при  $e \in [\Delta_{21} + \Delta_{43}, \Delta_{10}]$   
 $Pr^a(e) = (\Delta_{21}(p_2 - p_3) + \Delta_{43}(p_4 - p_3) + e(p_3 - \eta p_1)) / \eta_{dis}$ ;

5. при  $e \geq \Delta_{10}$

$Pr^a(e) = (\Delta_{21}(p_2 - p_3) + \Delta_{43}(p_4 - p_3) + \Delta_{10}(p_3 - \eta p_1)) / \eta_{dis}$ ,  $e^* = \Delta_{10}$ ; в данном случае прибыль от  $e$  не зависит, и увеличение объема накопителя выше  $\Delta_{10}$  не имеет смысла.

Укажем выражение для оптимального объема в зависимости от параметров модели.

**Утверждение 3.** Для тарифа типа  $a$  оптимальное значение объема накопителя и соответствующая прибыль определяются в зависимости от параметров тарифа и накопителя следующим образом:

$$\frac{p_4 - \eta p_1}{\Delta_{21}(p_2 - \eta p_3)} < \frac{c_e}{c_w} \Rightarrow e^* = \Delta_{21}, Pr^* = \frac{\Delta_{21}(p_2 - \eta p_1 + p_4 - \eta p_3)}{\eta_{dis}}; \quad (2)$$

$$\text{иначе } \frac{\eta(p_3 - p_1)}{\Delta_{21}(p_2 - \eta p_3) + \Delta_{43}(p_4 - \eta p_3)} < \frac{c_e}{c_w} \Rightarrow e^* = \Delta_{43},$$

$$Pr^* = \frac{\Delta_{21}(p_2 - \eta p_3) + \Delta_{43}(p_4 - \eta p_1)}{\eta_{dis}}; \quad (3)$$

$$\text{иначе } \frac{p_3 - \eta p_1}{\Delta_{21}(p_2 - p_3) + \Delta_{43}(p_4 - p_3)} < \frac{c_e}{c_w} \Rightarrow e^* = \Delta_{21} + \Delta_{43},$$

$$Pr^* = \frac{\Delta_{21}(p_2 - \eta p_1) + \Delta_{43}(p_4 - \eta p_1)}{\eta_{dis}}; \quad (4)$$

$$\text{иначе } e^* = \Delta_{10}, Pr^* = \frac{\Delta_{21}(p_2 - p_3) + \Delta_{43}(p_4 - p_3) + \Delta_{10}(p_3 - \eta p_1)}{\eta_{dis}}. \quad (5)$$

*Доказательство.* Утверждение следует из леммы 2 и выражений 1)-5) для зависимости прибыли от  $e$  в соответствующих интервалах.  $\square$

**Утверждение 4.** Для тарифа типа  $b$  оптимальное значение объема накопителя и соответствующая прибыль определяются в зависимости от параметров тарифа и накопителя следующим образом:

$$\frac{p_4 - \eta p_1}{\Delta_{32}(p_3 - p_4)} < \frac{c_e}{c_w} \Rightarrow e^* = \Delta_{32}, Pr^* = \frac{\Delta_{32}(p_3 - \eta p_1)}{\eta_{dis}};$$

$$\text{иначе } e^* = \Delta_{10}, Pr^* = \frac{\Delta_{32}(p_3 - p_1) + (\Delta_{10} - \Delta_{32})(p_4 - p_1) - (\eta - 1)\Delta_{10}p_1}{\eta_{dis}}.$$

*Доказательство.* Аналогично утверждению 3.  $\square$

## 5 Оценки темпов роста ЧПС для различных типов накопителей

Оценим эффективности инвестиций в различные типы накопителей, исходя из суточных тарифов российского рынка (рис. 1) и данных о параметрах накопителей за 2023 год ([3], табл. 1). Для этого рынка временные интервалы с 2013 г. не меняются:  $\Delta_{10} = 8$ ,  $\Delta_{21} = 3$ ,  $\Delta_{32} = 7$ ,  $\Delta_{43} = 4$ . На 01.05.2023 цены принимали значения  $p_1 = 2.18$ ,  $p_2 = 6.5$ ,  $p_3 = 5.34$ ,  $p_4 = 6.5$ ,  $p_5 = 5.34$  (все цены указаны в рублях). Рассмотрим следующие типы накопителей: PHS - гидро-аккумуляторы, CAES - системы накопления энергии в сжатом воздухе, SCES - суперконденсаторы, TES - тепловые системы хранения, Pb-A - свинцово-кислотные аккумуляторы, Zn-Air - воздушно-цинковые накопители. Получим оценки темпов роста ЧПС в случае, когда справедливы указанные выше предположения, в том числе, приведенные цены остаются постоянными. В таблице 1 указаны оптимальные значения объемов накопителей и верхние оценки темпов роста ЧПС, исходя из благоприятных оценок параметров.

**Таблица 1:** Российский рынок: благоприятные оценки параметров накопителей и верхние оценки темпов роста ЧПС

Тип накопителя	Срок службы (лет)	Стоимость мощности (руб/кВт)	Стоимость энергии (руб/кВт·ч)	Эффективность (%)	Оптимальный объем (ч)	Темп роста (%)
PHS	60	35 178	3 517.8	85	$\Delta_{10}$	0.1447
CAES	40	70 356	8 580	90	$\Delta_{10}$	0.0535
SCES	30	8 580	25 740	95	$\Delta_{21}$	0.0300
TES	40	7 722	9 609.6	80	$\Delta_{21}$	0.0716
Pb-A	15	12 526.8	14 500.2	90	$\Delta_{43}$	0.0219
Zn-Air	10	8 580	5 148	65	$\Delta_{21}$	-0.0473

Таким образом, исходя из данных за 2023 год, наиболее прибыльными являются инвестиции в PHS, TES и CAES.

Дадим аналогичные оценки для индийского рынка электроэнергии (рис. 2). Для этого рынка временные интервалы составляют  $\Delta_{10} = 7$ ,  $\Delta_{21} = 4$ ,  $\Delta_{32} = 7$ ,  $\Delta_{43} = 6$ . На 01.05.2023 цены принимали значения  $p_1 = 2.52$ ,  $p_2 = 2.88$ ,  $p_3 = 7.58$ ,  $p_4 = 5.46$  (цены указаны в рублях, перевод индийских рупий в рубли проводился по среднему курсу за 2023 год). В таблице 2 указаны оптимальные значения объемов накопителей и верхние оценки темпов роста ЧПС для данного рынка, исходя из благоприятных оценок параметров.

Для прочих видов накопителей, рассматриваемых в [3] (системы накопления энергии на маховиках (FES), системы накопления энергии за счет гравитации (GES), сверхпроводящие магнитные системы

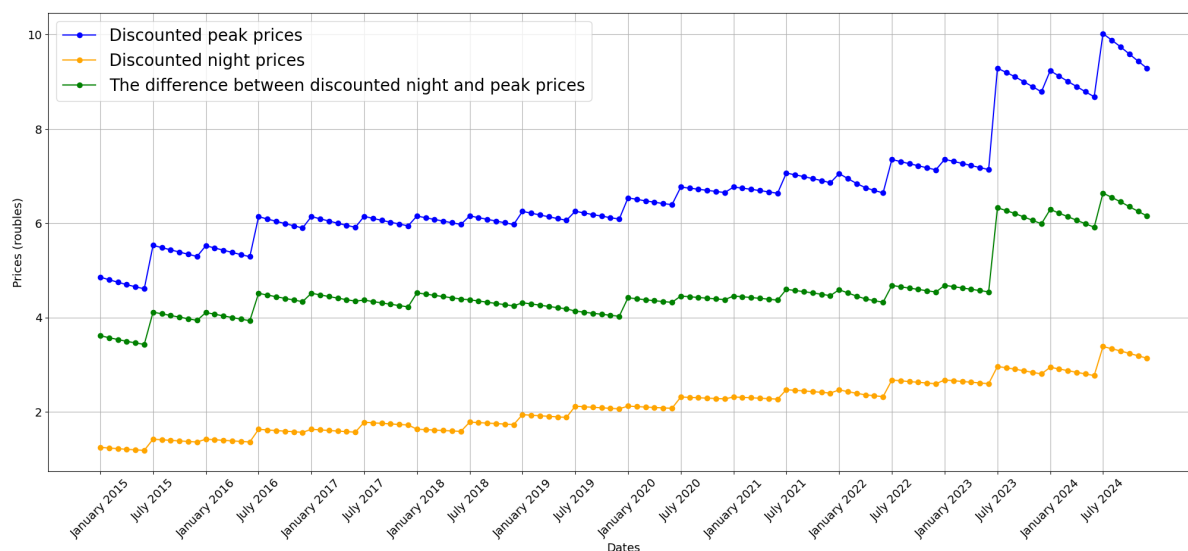
накопления энергии (SMES), химические системы хранения (CES), электрохимические системы накопления энергии (ECSS)), средняя оценка темпа роста оказывается отрицательной.

**Таблица 2:** Рынок Индии: благоприятные оценки параметров накопителей и верхние оценки темпов роста ЧПС

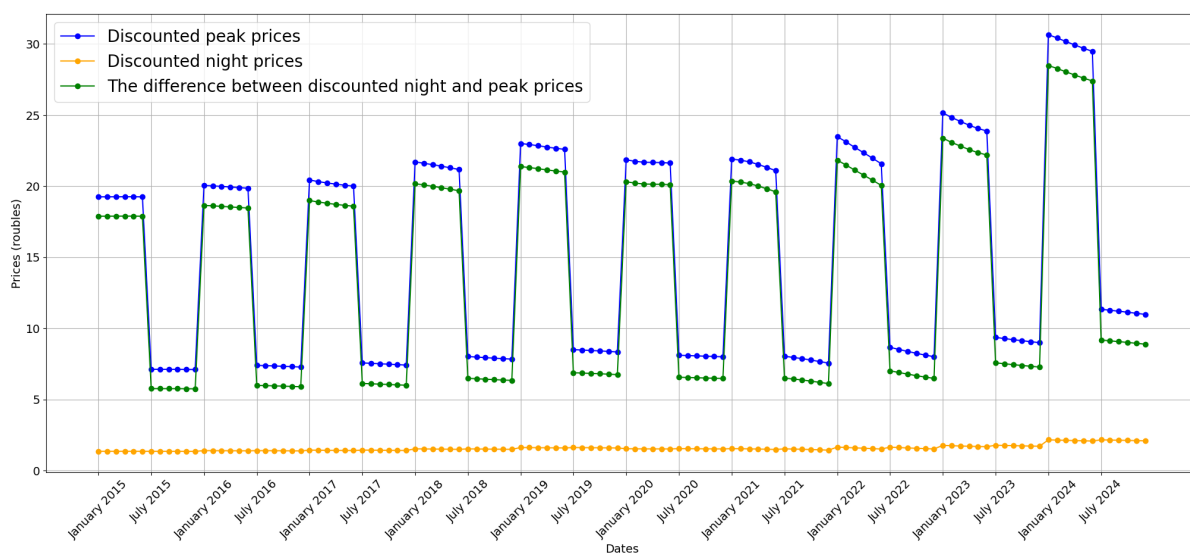
Тип накопителя	Срок службы (лет)	Стоимость мощности (руб/кВт)	Стоимость энергии (руб/кВт·ч)	Эффективность (%)	Оптимальный объем (ч)	Темп роста (%)
PHS	60	35178	3517.8	85	$\Delta_{10}$	0.1651
CAES	40	70356	8580	90	$\Delta_{10}$	0.0639
SCES	30	8580	25740	95	$\Delta_{32}$	0.0317
TES	40	7722	9609.6	80	$\Delta_{32}$	0.1100
Pb-A	15	12526.8	14500.2	90	$\Delta_{32}$	0.0349
Zn-Air	10	8580	5148	65	$\Delta_{32}$	0.0708

## 6 Возможности обобщения и уточнения полученных результатов

Рассмотрим указанные в разделе 2 проблемы точности оценки ЧПС и расчета темпа роста мощности для инвестиций в различные типы накопителей. На рисунках 6-7 описана динамика приведенных цен на электроэнергию для населения в России и США, рассчитанная на основе данных [5-7].



**Рис. 6:** Динамика приведенных цен на электроэнергию в России, исходя из процентных ставок ЦБ (2015-2024 г.)



**Рис. 7:** Динамика приведенных цен на электроэнергию в США, штат Нью-Йорк, исходя из банковских процентных ставок (2015-2024 г.)

Полученные зависимости показывают, что гипотеза о постоянстве разности максимальных и минимальных приведенных цен на энергию достаточно близка к реальности, если ввести поправку на сезонные колебания цен и рассматривать периоды относительной стабильности политэкономической ситуации в мире (см. интервал с 2015 по 2022 год). Кризисы в международных отношениях ведут обычно к быстрому росту данного показателя (см. данные за 2023-24 годы). Что касается цен на накопители, то данных об их динамике недостаточно для определенных выводов. Отдельные числа ([8]) показывают снижение стоимостей накопителей, связанное с техническим прогрессом в их производстве. Эта тенденция будет способствовать росту прибыльности инвестиций. Противоположное влияние может оказать массовое внедрение накопителей и ВИЭ в экономику. Однако, следует ожидать сокращения объемов такого внедрения по мере снижения прибыльности инвестиций. Поэтому для наиболее эффективных технологий инвестиции останутся прибыльными.

Другая проблема связана с возможностью непрерывно реинвестировать получаемую прибыль в производство. В реальности реинвестирование связано с определенными фиксированными затратами. При небольших масштабах производства оно выгодно только с некоторым интервалом (например, в течение полугодия прибыль поступает в банк, а в конце накопление реинвестируется). В этой ситуации темп роста приведенной стоимости снижается относительно оценки (1), но выводы о прибыльности или убыточности для всех типов накопителей сохраняются.

Низкая точность исходных данных не позволяет сделать однозначные выводы относительно оптимальной стратегии инвестирования в производство накопителей определенного типа. Более того, затраты на

их производство и прибыли от использования существенно зависят от страны и конкретного региона. Основная цель данной работы - предложить метод, позволяющий при наличии достаточно точных исходных данных найти оптимальную стратегию инвестирования и управления накопителем. Также нашей задачей было выделить перспективные типы накопителей, исходя из имеющихся данных.

В заключение приведем из статьи [4] данные относительно распространения технологий накопления энергии с 2000 по 2025 год и прогноз до 2030 г. В этой статье обсуждаются траектории развития аккумуляторных (BESS), механических (MESS) и тепловых (TESS) систем хранения энергии. Отмечается, что литий-ионные аккумуляторы доминируют в категории BESS и масштаб их применения растет в геометрической прогрессии: установленная мощность увеличилась с 0,10 ГВт в 2011 году до 10 ГВт в 2025 году, что соответствует совокупному годовому темпу роста в 43%. К 2020 году BESSs доминировали в приложениях для кратковременного хранения энергии, при этом глобальное внедрение превысило 20 ГВт-ч в год.

В технологии MESS водородные накопители демонстрируют небольшой линейный рост (среднегодовой показатель: 2,1%, 2000-2025 гг.), в то время как маховики демонстрируют умеренный рост (среднегодовой показатель: 8,2%, 2005-2025 гг.) из-за их роли в регулировании частоты сети. До 2010 года на долю MESS, включая гидроаккумулирующие установки и маховики, приходилась основная установленная мощность: 95% мирового объема хранилищ энергии. Однако рост замедлился из-за географических ограничений и конкуренции со стороны BESSs. К 2020 году доля MESS в мировом производстве составила около 1,2 ТВтч, в основном за счет гидроаккумулирующих установок. В категории TESS хранение энергии в форме тепла, включающее нагревание или охлаждение материалов, таких как вода или расплавленные соли, растет в геометрической прогрессии (среднегодовой показатель: 19%, 2008-2025 гг.). Скрытое накопление тепла, которое использует материалы с фазовым переходом (PCM) для поглощения или высвобождения энергии во время переходов, отстает из-за нехватки материалов (среднегодовой показатель - 12%). К 2020 году на долю TESS приходилось более 5,8 ГВт-ч электроэнергии во всем мире. По прогнозам, к 2030 году на долю BESS будут приходиться примерно 65% новых сетевых систем хранения. Для MESS ожидается умеренный рост (в среднем на 4%), обусловленный модернизацией существующих мощностей и нишевым применением маховиков. Новые технологии, такие как накопители энергии на сжатом воздухе, могут получить распространение в регионах с благоприятной геологией. По прогнозам, к 2030 году на долю MESS будет приходиться примерно 25% от общей емкости. Для TESS ожидается ускоренный рост (среднегодовой показатель - 17,5%), обусловленный промышленной

декарбонизацией и развитием систем централизованного теплоснабжения/охлаждения. К 2030 году TES может занять около 10% рынка, особенно в регионах с высоким промышленным спросом на тепло.

Сопоставляя эти выводы с результатами нашего исследования, отметим, что они в целом согласуются друг с другом. Перспективные согласно нашим расчетам типы накопителей (PHS, CAES, SCES, TES, Pb-A) реально используются и имеют перспективы для дальнейшего внедрения. Несогласованность выводов относительно литий-ионных и Zn-Air накопителей может быть связана как с неточностью исходных данных, так и с тем, что мы рассматриваем использование накопителей с единственной целью: перепродажи энергии для получения прибыли на конкретных рынках, в то время как на практике накопители имеют разнообразные применения (в электрических транспортных средствах, для стабилизации параметров электрических сетей и др., см. [4]).

## Список литературы

- [1] *Vasin A., Grigoryeva O. Optimal Strategies of Consumers with Energy Storages in Electricity Market // Mathematical Optimization Theory and Operations Research: Recent Trends. — 2022. — Pp. 300–312.*
- [2] *Васин А. А., Григорьева О. М., Серегина И. Ю. Оптимизация параметров накопителей для потребителей на рынке электроэнергии // Вестник Московского университета. Сер. 15. Вычисл. матем. и киберн. — 2023. — Vol. 15, no. 1. — Pp. 21–27.*
- [3] Comparative review of energy storage systems, their roles, and impacts on future power systems / F. Nadeem, S. M. Suhail Hussain, P. Kumar Tiwari et al. // *IEEE Access.* — 2018.
- [4] Future energy storage: technologies, management systems, and pathways for sustainable integration / P. Afreh, L. Gao, B. J. Passi, C. C. Onwuagbu // *Academia Green Energy.* — 2025.
- [5] Инфляция и ключевая ставка Банка России | Банк России. — URL [https://cbr.ru/hd\\_base/inf/](https://cbr.ru/hd_base/inf/).
- [6] Federal Funds Effective Rate | St. Louis Fed. — URL <https://fred.stlouisfed.org/series/FEDFUNDS>.
- [7] Inflation, consumer prices for the United States | St. Louis Fed. — URL <https://fred.stlouisfed.org/series/FPCPITOTLZGUSA>.
- [8] *Агаджанян Е. Г. Модели рынка электроэнергии с накопителями и возобновляемыми источниками энергии. — 2024.*