

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

А.А. Александров

andrey.alexandrov@ibm.bmstu.ru

М.Н. Захаров

zmn@bmstu.ru

М.С. Куц

kuts@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Использование возобновляемых источников энергии и накопителей электроэнергии позволяет уменьшить затраты предприятия на электроснабжение. Существенная экономия может быть достигнута лишь в случае грамотно организованной системы управления энергопотоками предприятия и закупками электроэнергии. Проведен анализ существующих накопителей и возобновляемых источников энергии. На основе анализа предложен подход к организации энергоснабжения предприятия, подразумевающий оптимизацию графика закупки электроэнергии в целях минимизации суммарных затрат. Оптимизация графика закупки в случае использования накопителей представляет собой некорректно поставленную задачу. В рамках решения задачи формализован внешний вид графика закупки в виде кусочно-постоянной функции, что позволило решить ее путем применения многокритериальной оптимизации на основе модифицированного метода направленного случайного поиска. Проведен анализ модельного случая, для которого получен оптимальный график закупки при использовании накопителей и солнечных панелей, а также построены графики достигаемого экономического эффекта от их использования. Определены максимальная величина операционных расходов на содержание накопителей и солнечных панелей, при которых сохраняется целесообразность их использования

Ключевые слова

Организация производства, накопители энергии, возобновляемые источники энергии, оптимизация затрат, график закупки электроэнергии, многокритериальная оптимизация, направленный случайный поиск

Поступила 15.12.2020

Принята 22.01.2021

© Автор(ы), 2021

Введение. Организация систем энергоснабжения современных машиностроительных предприятий должна строиться на принципах, позволяющих сделать их надежными, малозатратными, гибкими и экологичными. Цель

организационного построения энергосистемы предприятия заключается в том, чтобы с минимальными затратами обеспечить бесперебойное энергообеспечение производства при суточных и сезонных пиковых нагрузках, а также при аварийных отключениях от центральной сети. Достижение этой цели возможно при решении трех основных организационно-технических задач.

1. Включение в систему энергоснабжения предприятия объектов внутренней генерации энергии на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), объектов накопления энергии и объектов генерации на базе традиционных источников в случае экстренных ситуаций.

2. Создание системы управления энергопотоками внутри предприятия и отбора энергии из внешней среды с учетом графика изменения суточного тарифа.

3. Разработка методики оценки эффективности системы организации энергоснабжения предприятия, позволяющей определить качественный и количественный составы объектов системы из условия минимума капитальных и эксплуатационных затрат.

Идея организации системы энергоснабжения заключается в стыковке затрат на закупку энергии из внешней сети с затратами на ее накопление [1], а также с затратами на ее внутреннюю генерацию альтернативными источниками.

В зависимости от территориального расположения предприятия в качестве альтернативных генераторов энергии можно рассматривать ветроустановки и солнечные батареи, а также в более редких случаях — геотермальные установки и установки, работающие за счет морских приливов [2]. Несмотря на то что эксплуатационные расходы при использовании альтернативных установок могут быть невысоки, капитальные затраты всегда существенны. При этом выработка энергии в силу природных причин нестабильна, поэтому решить проблему энергоснабжения производства только за счет их невозможно. Однако в некоторых случаях частичное покрытие энергопотребностей предприятия за счет альтернативных источников может быть экономически выгодным [3] и всегда диверсифицирует риски. При этом использование ВИЭ делает машиностроительное предприятие более привлекательным в общественном мнении в свете остро стоящих экологических проблем. В конечном счете, это дает качественный эффект повышения уровня конкурентности продукции предприятия.

Существенный количественный экономический эффект может быть получен от оптимизации графика объемов закупки энергии в течение су-

ток с учетом возможностей ее краткосрочного хранения в накопителях. На основе многолетних замеров потребления энергии в масштабах городов и региональных территорий известен общий вид суточных графиков изменения потребления энергии [4–7] с двумя пиками (рис. 1). Как правило, стоимость закупки электроэнергии из внешней сети также меняется и схематично повторяет графики потребления, т. е. максимальную цену за энергию предприятие платит в период максимального регионального потребления, минимальную — в период минимального потребления. Если машиностроительному предприятию удалось найти способ относительно экономного хранения энергии, то целесообразно закупать энергию в избытке по сниженному тарифу и накапливать ее для использования в периоды максимального потребления, избегая таким образом закупок электроэнергии по завышенному тарифу.

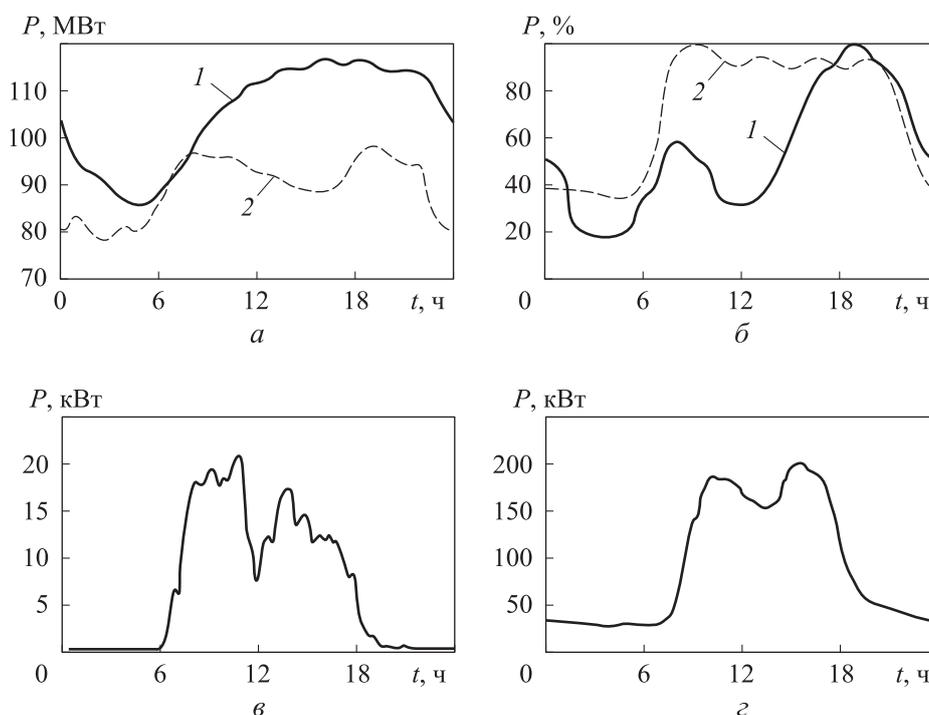


Рис. 1. Сезонные и суточные графики изменения потребления электроэнергии: *а* — сезонные изменения кривых потребления электроэнергии в штате Филадельфия (США) [4] (1 — в летний период при массовом использовании кондиционеров; 2 — в зимний период); *б* — кривые суточного энергопотребления [5] (1 — подстанция с преимущественно осветительной нагрузкой; 2 — предприятия с работой в две смены); *в* — усредненный график суточного энергопотребления предприятия, производящего автозапчасти [6]; *г* — усредненный график суточного энергопотребления предприятия электронного оборудования [7]

Общая схема организации энергоснабжения машиностроительного предприятия приведена на рис. 2. Как было отмечено ранее, центральное место в системе энергоснабжения предприятия занимают накопители энергии [8], которые подразделяются на шесть типов [9]: 1) гидроаккумулирующие электростанции; 2) накопители на сжатом воздухе; 3) электрохимические аккумуляторы; 4) роторные накопители; 5) сверхпроводниковые магнитные накопители; 6) суперконденсаторы. Основные характеристики накопителей энергии — мощность, энергоемкость, время отклика и время разряда (время, в течение которого мощность и энергия поставляются в энергосистему машиностроительного предприятия без подзарядки).

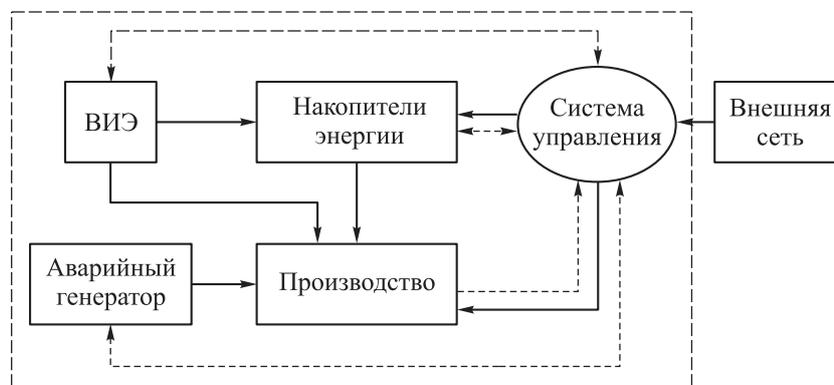


Рис. 2. Общая схема организации энергоснабжения машиностроительного предприятия

Согласно последней характеристике, в энергосистеме предприятия возможно использовать накопители энергии трех первых типов, поскольку только их время разряда может составлять часы, сутки и месяцы. Это необходимо для решения задачи оптимизации энергоснабжения производства.

Кратко рассмотрим специфику и принцип работы этих накопителей. Гидроаккумулирующая электростанция (ГАЭС) включает в себя комплекс генераторов и насосов. Во время спада энергопотребления ГАЭС получает из энергосети электроэнергию по сниженному тарифу и расходует ее на перекачку воды в верхний бьеф, работая в насосном режиме. Во время пиков энергопотребления ГАЭС сбрасывает воду из верхнего бьефа в нижний, вырабатывая и отдавая в сеть электроэнергию по завышенному тарифу — это генераторный режим. Во всем мире число ГАЭС неуклонно растет, так как в крупных энергосистемах большую долю составляют мощности тепловых и атомных электростанций, которые не могут быстро снижать выработку электроэнергии при ночном сниже-

нии энергопотребления или делают это с большими потерями. Этот факт приводит к установлению существенно большей коммерческой стоимости пиковой электроэнергии в энергосистеме. В таких условиях использование ГАЭС экономически эффективно и повышает надежность энергоснабжения. Доля ГАЭС в суммарной мощности накопителей энергосистем мира составляет 97 %; КПД современных ГАЭС 70...75 %. Установленная мощность может быть более 1000 МВт [10]. В связи с этим сооружение ГАЭС целесообразно в крупномасштабных энергетических системах при условии наличия подходящего рельефа местности и водного ресурса.

Воздух в накопителях энергии на сжатом воздухе (НЭСВ) сжимается и удерживается под давлением в специальной емкости большого объема. Обычно используются пещеры в скальном грунте, соляные пещеры и пористые породы. Наиболее крупными НЭСВ в мире являются станции Макинтош (штат Алабама, США) и Хунторф (ФРГ). Это пилотные проекты по отработке технологии такого способа аккумулирования электроэнергии. Их мощности составляют 290 и 110 МВт, а время разряда — 4 и 26 ч соответственно [11]. Развитие крупномасштабных НЭСВ ограничено наличием доступных хранилищ сжатого воздуха.

Электрохимические аккумуляторы в режиме «заряд» преобразуют электрическую энергию в химическую и по мере необходимости обеспечивают обратное преобразование в режиме «разряд». При этом изменяется состав вещества электродов и расходуется электролит. Электрохимические накопители имеют достаточно большие КПД (65...70 %) и удельную энергоемкость (200...300 кВт·ч/м³), ожидаемый срок службы перспективных моделей ~ 20 лет.

В настоящее время в электроэнергетических системах широкое практическое применение находят аккумуляторные батареи большой энергоемкости. Весьма перспективны накопители на литий-ионных аккумуляторах. Пример — накопитель с установленной мощностью 100 МВт и емкостью 129 МВт·ч, введенный в эксплуатацию в 2017 г. в Австралии. Он аккумулирует энергию от ближайшей ветряной электростанции и в настоящее время является крупнейшим в мире накопителем.

Рассмотрим возможности использования ВИЭ [12] в системе энергоснабжения предприятия. Наиболее распространено использование ветряных (ВЭС) и солнечных (СЭС) электростанций, причем солнечная энергетика начинает опережать ветроэнергетику. В 2019 г. выработка электроэнергии электростанциями ЕЭС России, включая производство электроэнергии на электростанциях промышленных предприятий, со-

ставила 1080,6 млрд кВт · ч, выработка с помощью ВЭС — 0,3 млрд кВт · ч (увеличилась на 47 % по сравнению с 2018 г.), а выработка с помощью СЭС — 0,3 млрд кВт · ч (возросла на 70 %) [13].

Солнечные электростанции вырабатывают электроэнергию с использованием солнечных коллекторов и фотоэлектрических преобразователей. Крупнейшая фотоэлектрическая станция в США (штат Калифорния) имеет мощность ~ 550 МВт. Строительство СЭС особенно актуально в странах с высоким уровнем инсоляции. Эффективность использования фотопанелей в России зависит от региона. В южных регионах солнечная энергия применяется более широко по сравнению со средней полосой и северными областями. Выработка электроэнергии солнечной панелью сильно зависит от внешних факторов. Заявленную номинальную мощность панель может обеспечить в идеальных условиях — солнечные лучи падают на поверхность солнечной панели под прямым углом, погода ясная и интенсивность солнечного излучения максимальная. В России пик интенсивности солнечного излучения приходится на июнь–июль. Преимуществами СЭС являются автономность работы, возможность адаптации устройств к нуждам потребителей и относительно доступные цены. Оборудование и конструкция СЭС просты в монтаже и удобны в обслуживании. Недостатки СЭС — максимальное КПД преобразования составляет 30 %; установки занимают огромные площади; затраты на приобретение батарей высоки. Тем не менее мировые инвестиции в развитие этого вида возобновляемой энергии неуклонно возрастают.

Ветряная электростанция большой мощности может быть эффективным долгосрочным вложением средств при правильном расчете затрат и сроков окупаемости проекта. Область применения не ограничивается электроснабжением жилых объектов. Эффективность вложений резко повышается при использовании ВЭС на 100 кВт и более. В настоящее время ветрогенераторы выпускают различной мощности, которая зависит от площади, охватываемой лопастями турбины. Так, генераторы производства Vestas (Дания) достигают в высоту более 110 м.

Целесообразность установки ветрогенератора определяется средней скоростью ветра по региону. Максимальный КПД достигается ветроустановками при скорости ветра 9...12 м/с. Согласно закону Беца, КПД ветряной турбины не может быть больше 59,3 %. В целях улавливания мощных воздушных потоков ветрогенераторы эффективно устанавливать либо на побережье, либо в открытом море — на расстоянии 10 км и более от берега на сваях сооружают ВЭС, которые не потребляют традиционное топливо.

При сильных порывах ветра (более 25 м/с) генератор необходимо отключать, чтобы устройство не вышло из строя. Требование определенного диапазона скоростей — один из недостатков ВЭС. Другими недостатками являются высокая стоимость, превышающая затраты в топливной энергетике, и необходимость выделения под ВЭС большого объема территорий. Звук, который издают работающие турбины, плохо переносится людьми, вынужденными жить по соседству с турбинами.

Кроме рассмотренных элементов схемы организации системы энергоснабжения — накопителей и ВИЭ, важную роль в системе играет блок управления внутренними энергопотоками и закупкой энергии из внешней сети.

Далее приведены оптимизационные задачи, решаемые в рамках управления закупкой электроэнергии и ее внутреннего производства на базе ВИЭ при наличии накопителей.

Задача оптимизации графика закупки электроэнергии при наличии накопителей. *Постановка задачи и алгоритм оптимизации.* Для предприятия известен график энергопотребления, который описывается периодической функцией $D(t)$ с периодом T , равным одним суткам, и график изменения тарифа в течение суток, описываемый функцией $c_e(t)$. У предприятия имеется возможность накопления электроэнергии в аккумуляторах. Требуется определить суточный график закупки электроэнергии, обеспечивающий минимальные суммарные затраты и необходимый объем накопителей. При этом полагается, что затраты на покупку электроэнергии C_P вычисляются как произведение объема закупленной электроэнергии и текущей стоимости согласно тарифу, а затраты на хранение электроэнергии C_S определяются только амортизационными отчислениями на приобретение накопителей при условии, что его стоимость пропорциональна объему.

Суммарные затраты C_Σ — это сумма затрат на закупку электроэнергии из энергосети и на хранение электроэнергии в накопителях,

$$C_\Sigma = C_P + C_S. \quad (1)$$

Исходя из постановки задачи, затраты на хранение электроэнергии могут быть рассчитаны по зависимости

$$C_S = a_{bd} \max_{t \in [0, T]} (X(t)); \quad (2)$$

здесь a_{bd} — суточная амортизация накопителей в расчете на 1 кВт · ч;

$$X(t) = \int_0^t (P(\tau) - D(\tau)) d\tau + X_0 \quad (3)$$

— объем накопленной электроэнергии, где $P(\tau)$ и $D(\tau)$ — количество приобретаемой и потребляемой электроэнергии за единицу времени; X_0 — необходимый остаток на начало расчетного периода, определяемый из условия $X(t) > 0$.

Затраты на закупку электроэнергии за период $(0, t)$ могут быть вычислены как

$$C_P = \int_0^t P(\tau) c_e(\tau) d\tau. \quad (4)$$

Таким образом, необходимо решить оптимизационную задачу

$$P(t) \text{ — ? : } C_\Sigma(P(t)) \rightarrow \min.$$

При этом объем накопителей можно рассчитать по формуле (3).

Для функции потребления можно записать два условия:

$$\int_0^T P(t) dt = \int_0^T D(t) dt \quad (5)$$

— равенство суммарной закупленной и потребленной электроэнергии за сутки (условие отсутствия внутреннего производства электроэнергии);

$$P(t) \geq 0 \quad (6)$$

— функция не может принимать отрицательные значения, поскольку это означало бы, что электроэнергия «продается» обратно в сеть.

Соотношения (5) и (6) несложно выполнить, если определить функцию закупки $P(t)$ через масштабирование функции $f(t)$, область значений функции как $R(f) \in [0, \gamma]$, где γ — некоторая положительная константа, значение которой для удобства вычислений может быть принято равным единице. Функцию закупки можно записать так:

$$P(t) = \frac{\int_0^T D(\tau) d\tau}{\int_0^T f(\tau) d\tau} f(t). \quad (7)$$

В такой формулировке задача сводится к нахождению функции $f(t)$, определяющей характер графика закупки электроэнергии. Эта задача относится к классу некорректно поставленных, и ее решение будет зависеть от формы, в которой его будут искать [14, 15]. В рассматриваемом случае решение, т. е. график закупки электроэнергии, будем искать

в виде кусочно-постоянной функции с тем же интервальным разбиением, что и тарифный график.

Поиск величин закупки электроэнергии на каждом интервале представляет собой задачу многокритериальной оптимизации. Для таких задач применяют стохастические методы оптимизации эволюционного типа, в частности методы, построенные на основе генетических алгоритмов [16, 17].

Основные элементы таких методов — наследование, мутации, скрещивание и отбор. Основная идея заключается в «выращивании» популяции «особей», представляющих собой набор параметров (в рассматриваемом случае — значений функции в узлах интерполяции), которые обеспечивают наилучшее выполнение заданных условий. За выполнение условий отвечает фитнес-функция, значение которой минимизируется в процессе оптимизации. На каждой итерации алгоритма необходимо вычислить значения фитнес-функции для каждого представителя популяции, затем выбрать тех представителей, для которых фитнес-функция принимает наименьшее значение (этап отбора). Далее путем наследования, мутации и скрещивания формируется новое поколение. Алгоритм повторяется, пока не будет достигнута сходимость.

Результаты численного моделирования. Использован модельный график энергопотребления, описываемый кривой Безье (рис. 3), характерный для предприятия, работающего в одну смену.

Исследованы три варианта хранения электроэнергии с использованием аккумуляторов: литий-ионного (LiO), литий-титанатного (LTO), литий-железофосфатного (LiFePO₄). Для анализа в качестве суточной амортизации a_{bd} взяты значения, типичные для аккумуляторов указанных вариантов. Данные стоимости взяты из [18]. Характеристики рассматриваемых аккумуляторов приведены в табл. 1. Суточная амортизация рассчитывалась по линейной схеме, исходя из ориентировочного соотношения 1 г ~ 1000 циклов перезарядки.

Полученные графики закупки электроэнергии из внешней сети, обеспечивающие минимальные суммарные затраты при использовании указанных вариантов аккумуляторов, показаны на рис. 4 (кривая 1).

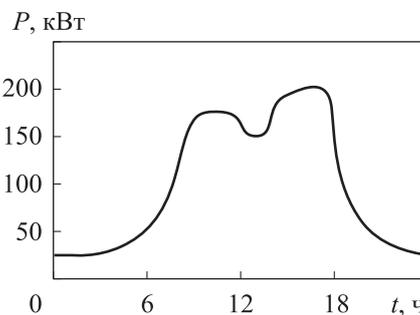


Рис. 3. Модельный график потребления электроэнергии

Следует отметить, что объем используемых аккумуляторов, определяемый по формуле (3), в каждом случае различен. Результаты оптимизации приведены в табл. 2.

Таблица 1

Характеристики рассматриваемых аккумуляторов

Вариант	Емкость, Вт · ч	Ресурс, цикл	Стоимость за 1 ед., руб.	Суточная амортизация на 1 руб./ (кВт · ч/сут)
LTO	92,0	26 000	1500	1,718
LiFePO ₄	826,0	3500	5400	5,117
LiO	19,2	1000	109	15,518

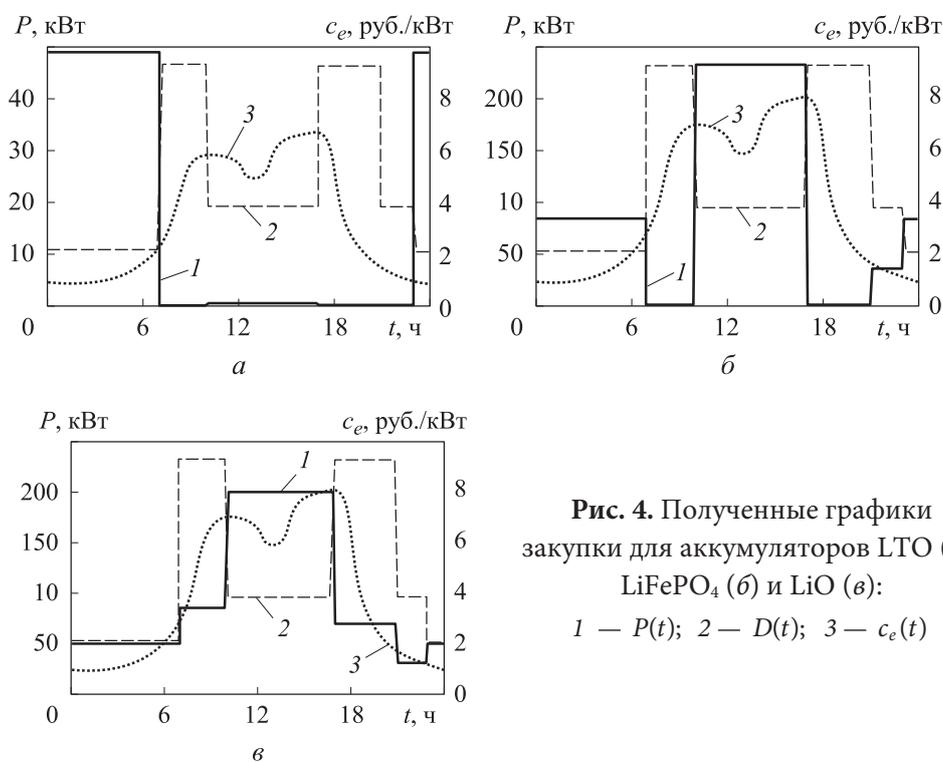


Рис. 4. Полученные графики закупки для аккумуляторов LTO (а), LiFePO₄ (б) и LiO (в):
 1 — P(t); 2 — D(t); 3 — c_e(t)

Таблица 2

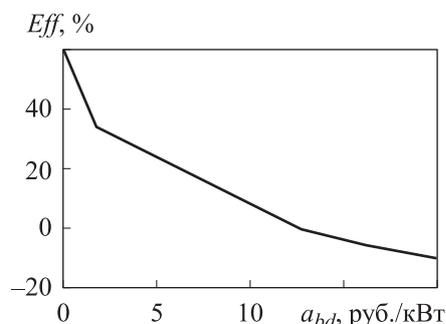
Результаты оптимизации*

Вариант	Затраты на закупку, руб./сут	Объем накопителей, кВт · ч	Затраты на хранение, руб./сут	Суммарные затраты, руб./сут
LTO	5122	2120	3643	8765
LiFePO ₄	8060	415	2123	10 183
LiO	10 802	199	3087	13 889

* Затраты без использования накопителей составляют 13 257 руб./сут.

При использовании аккумуляторов низкой стоимости (LTO) основная доля закупки энергии приходится на ночной период, так как затраты на хранение энергии невысоки и экономия от закупки по низкому ночному тарифу существенно превышает затраты на содержание накопителей большого объема. В то же время при использовании аккумуляторов высокой стоимости (LiO) основная доля закупки энергии максимально приближается к графику потребления электроэнергии, что логично, поскольку при высокой стоимости хранения в идеале график закупки должен совпасть с графиком потребления. Зависимость эффекта экономии средств на энергоснабжение от стоимости используемых накопителей энергии приведена на рис. 5. Под эффектом экономии понимается процентное уменьшение затрат по сравнению с работой без накопителей.

Рис. 5. Зависимость эффекта экономии средств на энергоснабжение от стоимости используемых накопителей энергии



Использование аккумуляторов LTO при текущей их стоимости позволяет достичь эффекта экономии ~ 35 %, LiFePO₄ — 25 %, а при LiO — отрицательной экономии, т. е. их использование нецелесообразно.

Задача оптимизации графика закупки электроэнергии при использовании солнечных батарей. *Постановка задачи и алгоритм оптимизации.* Критерий оптимизации — минимум суммарных затрат, которые состоят из затрат на закупку электроэнергии в сети C_p и затрат на эксплуатацию и амортизацию солнечных батарей C_{se} :

$$C_{\Sigma} = C_p + C_{se}. \quad (8)$$

Затраты C_p на закупку электроэнергии в сети определяются по формуле (4). Затраты на эксплуатацию и амортизацию солнечных батарей прямо пропорциональны их числу N_{sp} :

$$C_{se} = a_{sd}N_{sp},$$

где a_{sd} — удельные суточные эксплуатационные расходы.

Характерная особенность ВИЭ — переменная величина генерируемой мощности в течение дня, поскольку принцип их работы основан

на природных явлениях. В качестве альтернативного источника энергии будем использовать солнечные панели. Типовой график вырабатываемой солнечными панелями мощности приведен на рис. 6, а. Используется модельный график вырабатываемой мощности $p_{unit}(t)$, построенный на основе кривых Безье (рис. 6, б). При этом максимальный уровень генерации (масштаб графика) определяется суммарной максимальной мощностью солнечных панелей P_{sp}^{max} :

$$P_{solar}(t) = P_{sp}^{max} p_{unit}(t).$$

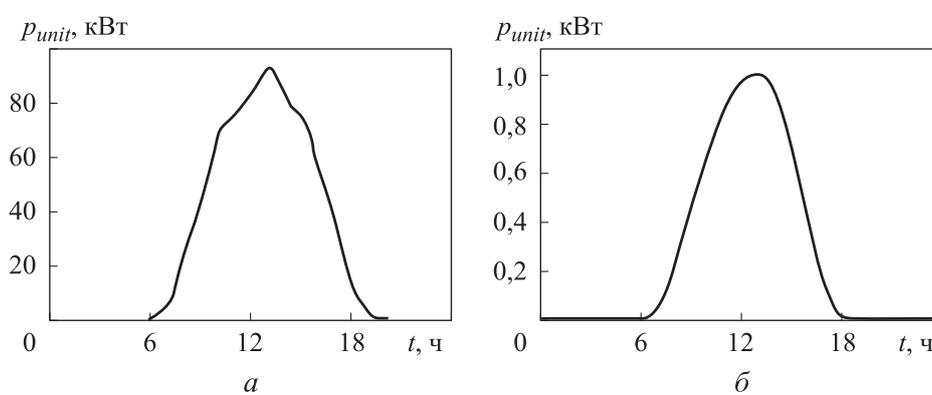


Рис. 6. Типовой [19] (а) и модельный (б) графики вырабатываемой мощности

В таком случае график закупки формируется как разность энергий, потребляемой и вырабатываемой солнечными панелями. Однако график закупки не может опускаться ниже нуля (условие отсутствия «продажи» электроэнергии):

$$P_c(t) = \begin{cases} P_d(t), & P_d(t) > 0; \\ 0, & P_d(t) \leq 0, \end{cases}$$

где $P_d(t) = D(t) - P_{solar}(t)$ — разность графиков потребляемой электроэнергии и мощности, вырабатываемой солнечными панелями.

Результаты численного моделирования. Различные варианты графика закупки в зависимости от суммарной максимальной мощности солнечных панелей (рис. 7, а) показаны на рис. 7, б.

Суммарные затраты, определяемые по (8), при фиксированных эксплуатационных расходах, будут изменяться согласно графику на рис. 8.

В этом случае задача является однокритериальной и найти оптимальную суммарную мощность солнечных панелей, характеризующую их число, не составляет труда. По аналогии с предыдущей задачей можно

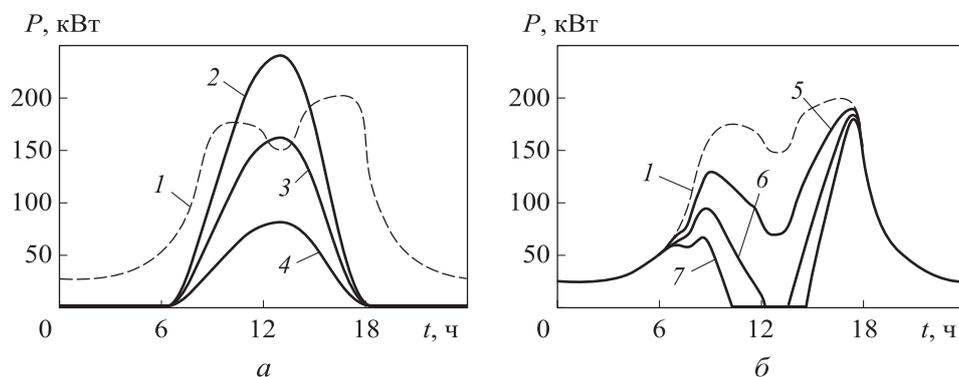


Рис. 7. Суммарные максимальные мощности (а) солнечных панелей; графики закупки электроэнергии (б):

1 — график потребления $D(t)$; кривые 2–4 — графики вырабатываемой мощности солнечных панелей при $P_{\max} = 80, 160$ и 240 кВт; кривые 5–7 — графики закупки при $P_{\max} = 80, 160$ и 240 кВт

определить экономический эффект экономии средств на электроснабжение от использования солнечных панелей. Зависимость экономического эффекта от эксплуатационных расходов, включая амортизационные отчисления на содержание солнечных панелей, приведена на рис. 9.

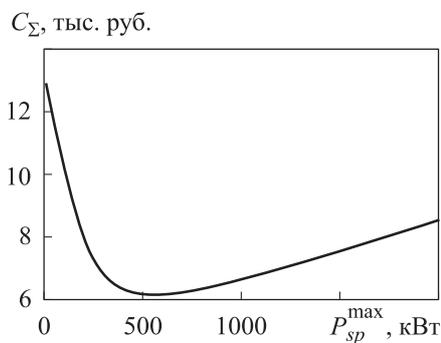


Рис. 8. Зависимость суммарных затрат от максимальной мощности солнечных панелей

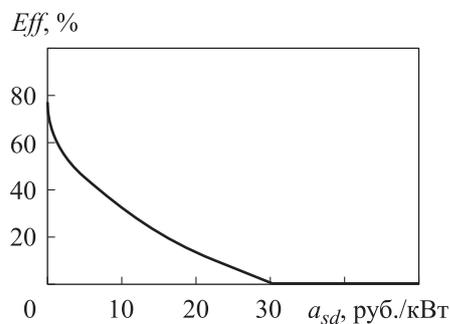


Рис. 9. Зависимость экономического эффекта от эксплуатационных расходов

Следовательно, необходимо решить оптимизационную задачу

$$P_{sp}^{\max} - ? : C_{\Sigma} (P_{sp}^{\max}) \rightarrow \min.$$

Заключение. Предложена общая схема организации системы энергоснабжения производства, основными элементами которой, кроме производства, являются система управления энергопотоками, накопители

энергии и альтернативные источники энергии. Показано, что использование последних позволяет добиться существенного (до 40 %) эффекта экономии. Предложены подходы к определению оптимальных графиков закупки электроэнергии.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Захаров М.Н. Контроль и минимизация затрат предприятия в системе логистики. М., Экзамен, 2006.
- [2] Захаров М.Н., Омельченко И.Н., Саркисов А.С. Ситуации инженерно-экономического анализа. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
- [3] Беккер Н.А., Захаров М.Н., Саркисов А.С. Комплексная оценка экономической эффективности проектов развития возобновляемых источников энергии. *Нефть, газ и бизнес*, 2007, № 10, с. 17–24.
- [4] PJM Learning Center. *learn.pjm.com: веб-сайт*. How energy use varies with the seasons.
URL: <https://learn.pjm.com/three-priorities/keeping-the-lights-on/how-energy-use-varies.aspx> (дата обращения: 13.12.2020).
- [5] Васильев А.А., ред. Электрическая часть станций и подстанций. М., Энергоатомиздат, 1990.
- [6] Jardini J.A., Tahan C.M.V., Gouvea M.R., et al. Daily load profiles for residential, commercial and industrial low voltage consumers. *IEEE Trans. Power Deliv.*, 2000, vol. 15, no. 1, pp. 375–380. DOI: <https://doi.org/10.1109/61.847276>
- [7] Jiao R., Zhang T., Jiang Y., et al. Short-term non-residential load forecasting based on multiple sequences LSTM recurrent neural network. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 59438–59448. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2873712>
- [8] Родионов В.Г. Энергетика: проблемы настоящего и возможности будущего. М., ЭНАС, 2010.
- [9] Куликов Ю.А. Накопители электроэнергии — эффективный инструмент управления режимами электроэнергетических систем. *Сб. тр. конф. «Электроэнергетика глазами молодежи–2018»*. Казань, КГЭУ, 2018, с. 38–43.
- [10] Pelz P.F. Upper limit for hydropower in an open-channel flow. *J. Hydraul. Eng.*, 2011, vol. 137, no. 11, pp. 1536–1542.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000393](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000393)
- [11] Semadeni M. Energy storage as an essential part of sustainable energy systems: a review on applied energy storage technologies. *CEPE Working Paper*, 2003, no. 24.
- [12] Удалов С.Н., Васюткина И.А. Возобновляемая энергетика. Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2016.
- [13] Официальный сайт Министерства энергетики Российской Федерации.
URL: <https://minenergo.gov.ru> (дата обращения: 13.12.2020).
- [14] Тихонов А.Н. О решении некорректно поставленных задач и методе регуляризации. *Докл. АН СССР*, 1963, т. 151, № 3, с. 501–504.

- [15] Ягола А.Г. Некорректные задачи и методы их решения. *Сб. тез. докл. Междунар. школы-конф. «Математика, физика, информатика и их приложения в науке и образовании»*. М., Изд-во МИРЭА, 2016, с. 64–65.
- [16] Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
- [17] Рейзлин В.И. Численные методы оптимизации. Томск, Изд-во ТПУ, 2011.
- [18] Alibaba, крупнейшая в мире онлайн B2B торговая платформа.
URL: <https://russian.alibaba.com> (дата обращения: 13.12.2020).
- [19] Fan Y., Pei G., Yingying L., et al. Impacts on operation and benefit after new energy generation access to power grid. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sc.*, 2018, vol. 168, art. 012034. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/168/1/012034>

Александров Андрей Анатольевич — аспирант кафедры «Промышленная логистика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Захаров Михаил Николаевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Основы конструирования машин», профессор кафедры «Промышленная логистика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Куц Михаил Сергеевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Основы конструирования машин» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Александров А.А., Захаров М.Н., Куц М.С. Оптимизация энергоснабжения производственного комплекса с использованием возобновляемых источников энергии. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2021, № 1 (136), с. 85–102. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2021-1-85-102>

**OPTIMIZATION OF INDUSTRIAL COMPLEX POWER SUPPLY
BY MEANS OF RENEWABLE ENERGY SOURCES**

A.A. Aleksandrov
M.N. Zakharov
M.S. Kuts

andrey.alexandrov@ibm.bmstu.ru
zmn@bmstu.ru
kuts@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The usage of renewable energy sources and energy storage devices allows an enterprise to reduce its electricity supply costs. Significant savings can be

Keywords

Organization of production, energy storage, renewable energy sources, cost optimization,

achieved only in the case of a well-organized system of managing energy flows of the enterprise and electricity consumption. The purpose of the study was to analyze the existing storage devices and renewable energy sources, and on the basis of the analysis, introduce an approach to organizing energy supply of the enterprise based on the usage of storage devices and renewable energy sources. The approach introduced implies the electricity purchase schedule curve optimization to minimize the total costs. The purchase schedule curve optimization for the case of energy storage usage is an ill-posed problem. Within the framework of solving the problem, the form of the curve was formalized to a piecewise constant function, which made it possible to solve it by applying multi-criteria optimization based on a modified method of directed random search. We analyzed a model case, for which an optimal purchase schedule curve was obtained using storage devices and solar panels, and the achievable economic effect from their use was graphed. The maximum value of operational costs, which makes the usage of energy storage and renewable energy source efficient, was found

electricity purchase schedule curve, multi-criteria optimization, directed random search

Received 15.12.2020

Accepted 22.01.2021

© Author(s), 2021

REFERENCES

- [1] Zakharov M.N. Kontrol' i minimizatsiya zatrat predpriyatiya v sisteme logistiki [Control and minimization of enterprise expenses in logistics system]. Moscow, Ekzamen Publ., 2006.
- [2] Zakharov M.N., Omelchenko I.N., Sarkisov A.S. Situatsii inzhenerno-ekonomicheskogo analiza [Situations of cost-effectiveness analysis]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014.
- [3] Bekker N.A., Zakharov M.N., Sarkisov A.S. Economic efficiency complex estimation of renewable energy sources development projects. *Neft', gaz i biznes*, 2007, no. 10, pp. 17–24 (in Russ.).
- [4] PJM Learning Center. *learn.pjm.com: website*. How energy use varies with the seasons. Available at: <https://learn.pjm.com/three-priorities/keeping-the-lights-on/how-energy-use-varies.aspx> (accessed: 13.12.2020).
- [5] Vasil'yev A.A., ed. Elektricheskaya chast' stantsiy i podstantsiy [Electrical part of stations and substation]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990.
- [6] Jardini J.A., Tahan C.M.V., Gouvea M.R., et al. Daily load profiles for residential, commercial and industrial low voltage consumers. *IEEE Trans. Power Deliv.*, 2000, vol. 15, no. 1, pp. 375–380. DOI: <https://doi.org/10.1109/61.847276>

- [7] Jiao R., Zhang T., Jiang Y., et al. Short-term non-residential load forecasting based on multiple sequences LSTM recurrent neural network. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 59438–59448. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2873712>
- [8] Rodionov V.G. Energetika: problemy nastoyashchego i vozmozhnosti budushchego [Electric-power industry: current problems and future possibilities]. Moscow, ENAS Publ., 2010.
- [9] Kulikov Yu.A. [Energy storages — efficient control tool of energy system]. *Sb. tr. konf. "Elektroenergetika glazami molodezhi-2018"* [Proc. Conf. Electric-Ppower Industry by Young People's Eyes]. Kazan, KGEU Publ., 2018, pp. 38–43 (in Russ.).
- [10] Pelz P.F. Upper limit for hydropower in an open-channel flow. *J. Hydraul. Eng.*, 2011, vol. 137, no. 11, pp. 1536–1542. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000393](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000393)
- [11] Semadeni M. Energy storage as an essential part of sustainable energy systems: a review on applied energy storage technologies. *CEPE Working Paper*, 2003, no. 24.
- [12] Udalov S.N., Vasyutkina I.A. Vozobnovlyаемая energetika [Renewable power industry]. Novosibirsk, Izd-vo NGTU Publ., 2016.
- [13] Ofitsial'nyy sayt Ministerstva energetiki Rossiyskoy Federatsii [Official website of Ministry of Energy of Russian Federation] (in Russ.). Available at: <https://minenergo.gov.ru> (accessed: 13.12.2020).
- [14] Tikhonov A.N. On the solution of ill-posed problems and the method of regularization. *Dokl. AN SSSR*, 1963, vol. 151, no. 3, pp. 501–504 (in Russ.).
- [15] Yagola A.G. Ill-posed problems and methods of its solution. *Sb. tez. dokl. Mezhdunar. shkoly-konf. "Matematika, fizika, informatika i ikh prilozheniya v nauke i obrazovanii"* [Proc. Abs. Int. School-Conf. Mathematics, Physics, Programming and its Application in Science and Education]. Moscow, Izd-vo MIREA Publ., 2016, pp. 64–65 (in Russ.).
- [16] Karpenko A.P. Sovremennyye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdo-khnovlennyye prirodoy [Modern search optimization methods. Algorithms inspired by natures]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014.
- [17] Reyzlin V.I. Chislennyye metody optimizatsii [Numerical optimization methods]. Tomsk, Izd-vo TPU Publ., 2011.
- [18] Alibaba, krupneyshaya v mire onlayn B2B trgovaya platforma [Alibaba, the biggest online B2B trade platform in the world] (in Russ.). Available at: <https://russian.alibaba.com> (accessed: 13.12.2020).
- [19] Fan Y., Pei G., Yingying L., et al. Impacts on operation and benefit after new energy generation access to power grid. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sc.*, 2018, vol. 168, art. 012034. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/168/1/012034>

Aleksandrov A.A. — Post-Graduate Student, Department of Industrial Logistics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Zakharov M.N. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Fundamentals of Machine Design, Professor of Department of Industrial Logistics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Kuts M.S. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Fundamentals of Machine Design, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Aleksandrov A.A., Zakharov M.N., Kuts M.S. Optimization of industrial complex power supply by means of renewable energy sources. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2021, no. 1 (136), pp. 85–102 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2021-1-85-102>