

На правах рукописи

Александров Андрей Анатольевич

**ОРГАНИЗАЦИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ
ПРОИЗВОДСТВ ПРИ ЦИКЛИЧНЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ
СПРОСА НА ПРОДУКЦИЮ И СТОИМОСТИ
ЭНЕРГОРЕСУРСОВ**

Специальность 05.02.22 – Организация производства (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'A. Alexandrov', written over a horizontal line.

Москва – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана»
(национальный исследовательский университет) (МГТУ им. Н. Э. Баумана)

Научный руководитель: **Захаров Михаил Николаевич**
Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой основ конструирования
машин МГТУ им. Н. Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Шинкевич Алексей Иванович**
Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой логистики и управления
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследо-
вательский технологический университет»

Долгов Виталий Анатольевич
Доктор технических наук, доцент, генеральный
директор ООО «Фабрика Цифровых Систем»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное обра-
зовательное учреждение высшего образования
«Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С.П. Королева»

Защита диссертации состоится 24 июня 2021 г. в 13.00 на заседании диссер-
тационного совета Д 212.141.23 в МГТУ им. Н. Э. Баумана по адресу: 105005,
Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 7, ауд. 414 МТ.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учрежде-
ния, просьба направлять по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 7, уче-
ному секретарю диссертационного совета Д 212.141.23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н. Э. Баумана
и на сайте www.bmstu.ru.

Автореферат разослан _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент



Е. С. Постникова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Цикличность спроса характерна для продукции многих отраслей, в том числе и для машиностроительных предприятий, если их продукция востребована сельскохозяйственной, строительной, нефтегазовой и другими сезонными отраслями. В случае предприятий электроэнергетики на сезонную цикличность накладывается суточная цикличность – спрос на электроэнергию существенно меняется, как в течение года, так и в течение суток. При этом существенно меняется и стоимость приобретения электроэнергии для предприятий-потребителей. Значительные сезонные колебания закупочной стоимости характерны также для цемента, сыпучих строительных материалов, теплоносителей, тяжелой техники и других ресурсов, которые могут быть востребованы машиностроительным предприятием для прямого или косвенного обеспечения производственного процесса.

Специфика организации производств продукции сезонного спроса, а также производств, потребляющих ресурсы с ярко выраженными колебаниями стоимости, заключается в необходимости составления годовых производственных программ и программ закупок материально-технических ресурсов с учетом факторов цикличности спроса и стоимости ресурсов.

Производственная программа должна позволять полностью удовлетворять сезонное повышение спроса при рациональной загрузке персонала и основных фондов предприятия. Этого можно достичь выбором определенного соотношения между максимально возможными объемами складирования готовой продукции и максимальной производственной мощностью устанавливаемого оборудования. Ситуация с формированием программы закупок аналогична – либо в «несезон» предприятие закупает ресурсы по сниженным ценам и использует их в течение всего периода, либо работает в режиме «точно в срок» без складирования ресурсов, либо следует компромиссному решению, минимизируя затраты. Таким образом, актуальной становится разработка методов эффективной организации производств, работающих для сезонных отраслей, а также рационализации их систем снабжения материалами и энергоресурсами.

Область исследований диссертации соответствует пунктам 2 и 4 паспорта специальности 05.02.22: «Разработка методов и средств эффективного привлечения и использования материально-технических ресурсов и инвестиций в организацию производственных процессов»; «Моделирование и оптимизация организационных структур и производственных процессов, вспомогательных и обслуживающих производств. Экспертные системы в организации производственных процессов»

Цель работы – разработка методов организации машиностроительных производств в условиях периодических колебаний спроса на продукцию и цен на энергоресурсы, обеспечивающих минимизацию затрат при удовлетворении пикового спроса.

Задачи исследования

1. Анализ специфики спроса на продукцию машиностроительных предприятий в системе сезонных отраслей, характера их энергопотребления и тарифной политики в электроэнергетике.

2. Разработка научно-методического подхода к организации производств продукции сезонного спроса в машиностроении и алгоритма его реализации.

3. Формирование системы организации энергоснабжения машиностроительного предприятия с использованием накопителей энергии и альтернативных источников.

4. Разработка подхода к оптимизации графика закупки электроэнергии при включении в систему энергоснабжения предприятия накопителей и установок возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Научная новизна:

- разработан метод определения объемов производственных мощностей и складов для предприятий по выпуску продукции ярко выраженного сезонного спроса, который основан на решении оптимизационной задачи определения программы выпуска продукции, позволяющий полностью удовлетворять пиковый спрос на продукцию при минимальных производственных затратах;

- предложена система организации энергоснабжения машиностроительного предприятия, в состав которой включены объекты ВИЭ, объекты накопления энергии, блок управления отбором энергии из внешней сети, а также алгоритмы управления отбором, обеспечивающие минимизацию затрат на энергоснабжение;

- разработаны методы определения объемов мощностей солнечных и аккумуляторных батарей, дающие возможность предприятию закупать электроэнергию по максимально выгодному графику и основанные на оптимизации суточных графиков закупки методами стохастического программирования по критерию минимума затрат.

Положения, выносимые на защиту:

- метод определения оптимального объема производственных мощностей и складов при организации производств продукции сезонного спроса;

- система организации энергоснабжения машиностроительного предприятия с учетом суточных колебаний тарифа на электроэнергию;

- метод оптимизации графика закупки предприятием электроэнергии при использовании накопителей и генераторов на базе ВИЭ.

Достоверность результатов исследований вытекает из обоснованности используемых теоретических положений и экономико-математических методов, а также подтверждается совпадением результатов моделирования с реальными производственными ситуациями и экспертными оценками.

Практическая ценность диссертационной работы состоит в создании методов определения необходимых объемов накопителей энергии и мощностей солнечных электростанций во внутренней системе энергоснабжения предприятия, которые позволяют минимизировать затраты на закупку электроэнергии из внешней сети и затраты на энергоснабжение предприятия в целом.

Реализация результатов работы. Результаты разработки научно-методического подхода к организации производств продукции сезонного спроса используются в учебном процессе кафедры промышленной логистики МГТУ им. Н.Э. Баумана. Разработанные методы и алгоритмы определения объемов мощностей солнечных и аккумуляторных батарей, дающих возможность предприятию закупать

электроэнергии по максимально выгодному графику, используются в ПАО «Рус-Гидро» и на Тихорецком машиностроительном заводе им. В.В. Воровского.

Апробация работы. В ходе выполнения диссертационной работы результаты исследований докладывались и получили положительную оценку на трех научных конференциях [3,4,5] и на заседаниях кафедры промышленной логистики МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2019-2021 годах.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 5 научных работах, из которых 2 статьи [1,2] в журналах, рекомендованных ВАК РФ, и 3 статьи [3,4,5] в сборниках трудов научных конференций.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, трёх глав, основных результатов и выводов, списка литературы из 123 наименований. Работа изложена на 121 страницах машинного текста, содержит 39 рисунков и 9 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1 посвящена анализу спроса на продукцию машиностроительных предприятий, выпускающих продукцию для сезонных отраслей, проблемам их организации и оптимизации производственных затрат, а также характеру их энергопотребления и тарифной политики в электроэнергетике. Анализ выполнен по работам Ашимова А.А., Гасникова А.В., Данченок Л.А., Дунаева В.Ф., Захарова М.Н., Карпенко А.П., Омельченко И.Н., Родионова В.Г., Эбергардт А.Е. и других.

В Российской Федерации законодательно выделяется около 30 сезонных отраслей и видов деятельности. Это – строительство, сельское хозяйство, теплоэнергетика и другие. Сезонность обуславливается не только сменой времен года и погодой, но и циклами деловой активности, временем суток и даже днями недели. Традиционно сезонность спроса на продукцию характеризуется коэффициентом сезонности – отношением спроса в заданный период к среднегодовому спросу.

Поисковый анализ интернет-данных позволил составить Таблицу 1 перечня видов продукции ярко выраженного сезонного спроса, при котором пиковая потребность превышает среднегодовую потребность более чем на 30%.

Таблица 1.

Продукция ярко выраженного сезонного спроса

№	Вид продукции	Месяцы повышенного спроса	Коэффициент сезонности на пике спроса
1	Трактора	Апрель – июнь	1,3
2	Зерноуборочные комбайны	Май – август	1,5
3	Сеноуборочные и фуражные машины	Июль – сентябрь	1,4
4	Снегоуборочные машины	Ноябрь – январь	4
5	Промышленное морозильное оборудование	Июль – октябрь	2
6	Кондиционеры	Май – июнь	2,5
7	Водонагреватели	Май – июль	2
8	Цемент	Май – октябрь	1,4
9	Природный газ	Октябрь – март	1,3
10	Мазут	Ноябрь – апрель	1,6

Это – прежде всего продукция машиностроительных предприятий, выпускающих сельскохозяйственную технику, коммунальную технику и морозильное оборудование, а также энергоресурсы.

На Рис. 1 приведены типовые усредненные графики суточного потребления электроэнергии предприятиями, которые иллюстрируют колебания с амплитудой в два раза большей среднесуточного значения. Естественная неравномерность потребления электроэнергии вынуждает её производителей прибегать к тарифной политике, стимулирующей предприятия к мероприятиям по выравниванию потребления. Пример зонной тарификации, приведенный на Рис. 2, показывает, что цена закупки электроэнергии в зависимости от времени суток может отличаться в 4 и более раз.

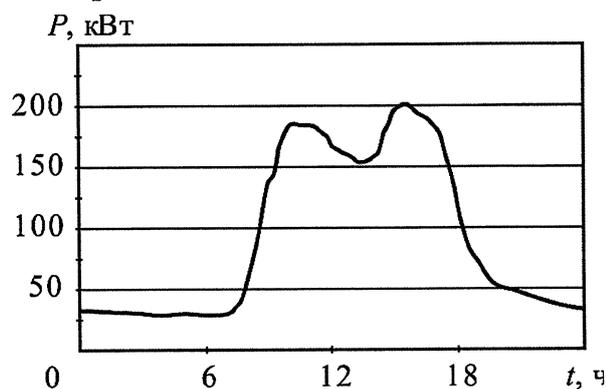


Рис. 1. Усредненный график суточного электропотребления для предприятия

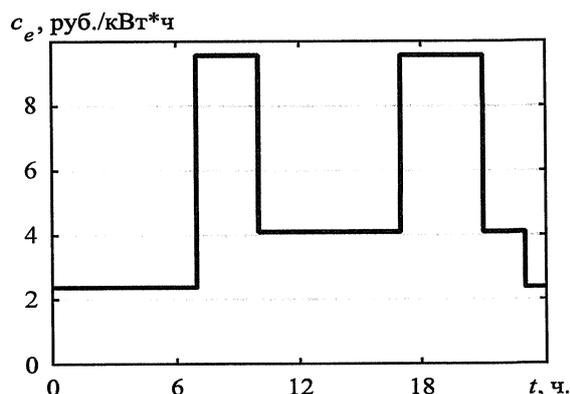


Рис. 2. Изменение тарифа на электроэнергию в течение суток

Анализ сезонности спроса на продукцию машиностроительных предприятий и цен на энергоресурсы показал целесообразность учета фактора сезонности при организации производственных процессов, так как это позволит определить:

- оптимальный объем мощностей основного производства;
- оптимальное соотношение между закупкой и выработкой энергии во вспомогательном производстве;
- оптимальный объем складов в обслуживающем производстве.

Глава 2 посвящена разработке научно-методического подхода к организации производства машиностроительной продукции сезонного спроса, позволяющего минимизировать общие издержки предприятия.

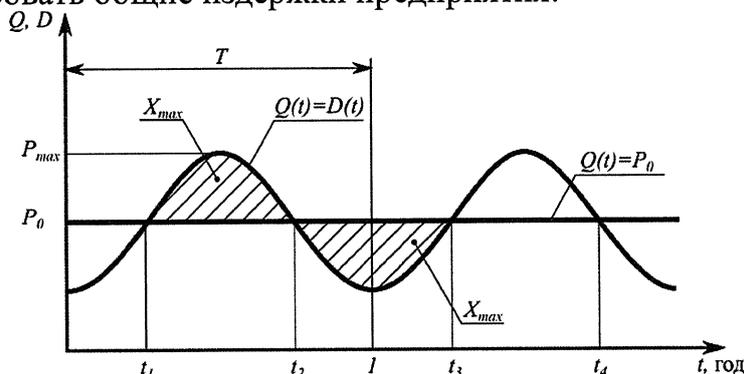


Рис. 3. Графики производственных программ при отсутствии наличных запасов $Q(t) = D(t)$ и равномерной нагрузке $Q(t) = P_0$

Удовлетворить сезонный спрос на продукцию без создания запасов готовой продукции возможно только в случае использования производственных мощностей P_{max} , позволяющих наращивать объем производства до величины

максимального спроса D_{max} . В этом случае производственная программа совпадает с функцией спроса – $Q(t) = D(t)$ (Рис. 3).

Загрузка оборудования и производственных рабочих будет крайне неравномерная. Большую часть времени производственные мощности будут недогружены, что приведет к удорожанию производства. Равномерная загрузка производственных мощностей возможна, если сезонный повышенный спрос будет удовлетворяться за счет сбыта запасов готовой продукции, накопленных в период сниженного спроса. При этом требуемая производственная мощность P_0 , которая в работе называется базовой мощностью, определяется по следующей зависимости:

$$P_0 = \frac{1}{T} \int_0^T D(t) dt, \text{ где } T \text{ – период спроса.}$$

Ориентируясь на равномерное производство, можно использовать минимально необходимые производственные мощности. Однако появляются дополнительные расходы (C_{xp}) на хранение запасов, которые за год составят:

$$C_{xp} = ic \int_{t_2}^{t_3} \left(\int_{t_2}^{t_3} (P_0 - D(t)) dt \right) dt, \text{ где } ic \text{ – удельные затраты хранения.}$$

Экономия перехода к равномерной программе производства может быть определена как расходы на содержание максимально необходимых производственных мощностей за вычетом расходов содержания базовой производственной мощности и расходов на хранение. Экономия может оказаться отрицательной, если затраты на содержание избыточных мощностей незначительны.

Помимо двух рассмотренных крайних случаев – равномерного производства и производства по сезонному спросу, возможны промежуточные варианты производственной программы, когда мощность используемого оборудования больше базовой мощности, но меньше, чем максимальный спрос.

В работе рассматривается алгоритм формирования оптимальной производственной программы предприятия при сезонном спросе и его численная реализация. Исходные данные для реализации алгоритма представлены в Таблице 2.

Таблица 2.

Исходные данные для расчета

Параметр	Обозначение	Значение	Ед. изм.
Период колебаний спроса	T_D	1	год
Среднее сезонное значение спроса	D_m	2500	шт./день
Амплитуда сезонных колебаний спроса	D_a	1600	шт./день
Затраты на хранение единицы товара	ic	3	руб./день
Коэффициент переплаты за дополнительную мощность оборудования	A	0,5	б. р.
Рассматриваемый период	T	1	год
Производственные затраты при базовой мощности	C_0	15×10^7	руб./год

Принимается, что спрос на продукцию промышленного предприятия меняется во времени по синусоидальному закону:

$$D(t) = D_m + D_a \sin\left(\frac{2\pi}{T_D} t + \varphi_0\right),$$

где D_m – среднее значение спроса; D_a – амплитуда колебаний спроса; T_D – период колебаний спроса в днях. Будем считать, что начинаем работать при падении спроса. В таком случае удобно принять начальную фазу $\varphi_0 = \pi$.

Вводится коэффициент асимметрии цикла r :

$$r = \frac{D_{min}}{D_{max}} = \frac{D_m - D_a}{D_m + D_a}$$

Среднему значению спроса будет соответствовать базовая мощность производства $P_0 = D_m$. Для обеспечения переменной производственной программы $Q(t)$ необходимо иметь производственную мощность $P = Q_{max}$, которая может быть выражена через коэффициент асимметрии цикла r :

$$P = Q_{max} = P_0 \left(1 + k \frac{1-r}{1+r}\right), \quad (1)$$

где k – коэффициент вариации производительности. Стоит отметить, что производству с постоянным объемом $Q(t) = P_0$ соответствует коэффициент вариации производительности $k_0 = 0$. Учитывая, что $P \leq D_{max}$, то область определения коэффициента вариации составит $k \in [0; 1]$.

Для оптимизации затрат производство будет осуществляться в трех различных режимах: пониженном – $Q = Q_{min}$, нормальном – $Q = P_0$ и интенсивном – $Q = Q_{max}$. Значение Q_{min} определяется по аналогии с (1):

$$Q_{min} = P_0 \left(1 - k \frac{1-r}{1+r}\right)$$

Аналитически производственную программу – изменение объема производства во времени, можно описать следующим образом:

$$Q(t) = \begin{cases} P, & t: D(t) > P \\ P_0, & t: P \geq D(t) > Q_{min} \\ Q_{min}, & t: Q_{min} \geq D(t) \end{cases}$$

На Рис. 4 изображены графики изменений спроса и объема производства при различных значениях коэффициента вариации k в течение периода T .

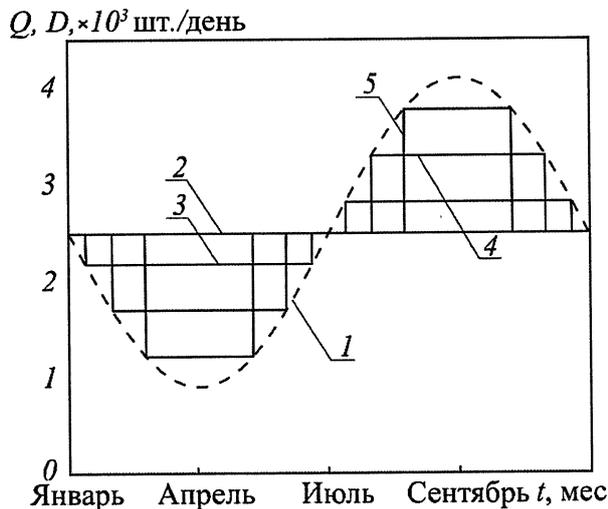


Рис 4. График функции спроса $D(t)$ (1) и объема производства $Q(t)$ при различных значениях коэффициента вариации: $k = 0,0$ (2); $k = 0,2$ (3); $k = 0,5$ (4); $k = 0,8$ (5)

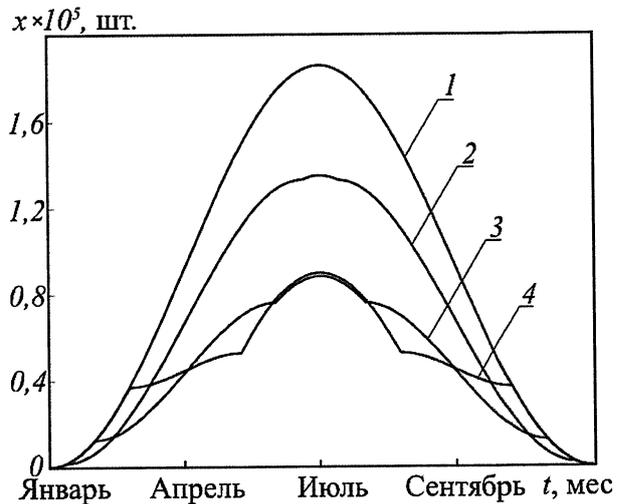


Рис 5. График изменения загруженности склада в течение рассматриваемого периода: $k = 0,0$ (1); $k = 0,2$ (2); $k = 0,5$ (3); $k = 0,8$ (4)

На Рис. 5 представлены графики изменения загруженности склада. Затраты на хранение определяются общепринятым образом. Производственные затраты

при варьировании мощности производства в общем случае могут быть описаны следующей зависимостью:

$$C_{\text{пр}} = C_0 \left(1 + A \frac{\Delta P}{P_0} \right), \quad (2)$$

где C_0 – производственные затраты для обеспечения производства с базовой мощностью P_0 ; A – коэффициент, характеризующий переплату за дополнительную мощность оборудования; $\Delta P = P - P_0$ – величина увеличения базовой мощности для обеспечения текущего переменного режима выпуска.

С учетом (1) зависимость (2) может быть записана в следующем виде:

$$C_{\text{пр}} = C_0 \left(1 + Ak \frac{1-r}{1+r} \right).$$

На Рис. 6 изображены графики зависимости производственных, затрат на хранение и суммарных затрат от коэффициента вариации производительности. Из графиков видно, что суммарные затраты имеют минимум, который может быть найден численно путем итерационного уточнения. Полный алгоритм решения задачи и процедуры вычисления суммарных затрат представлены на Рис. 7.

$C \times 10^8$, руб.

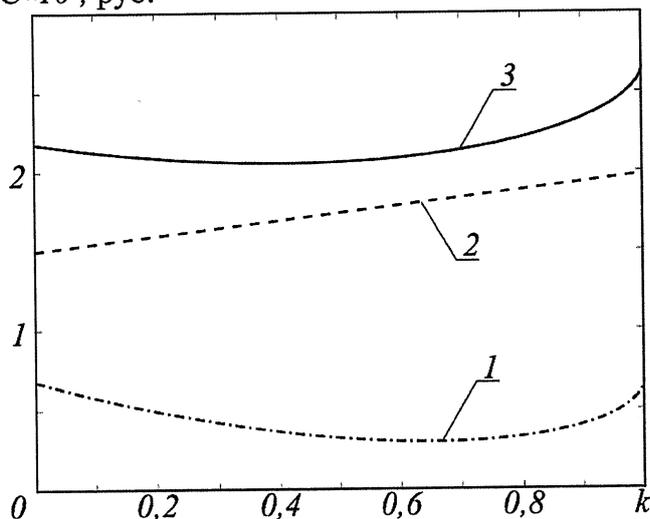


Рис. 6. Графики затрат в зависимости от коэффициента вариации производительности: затраты на хранение (1); производственные затраты (2); суммарные затраты (3)

$Q \times 10^3$, шт./день

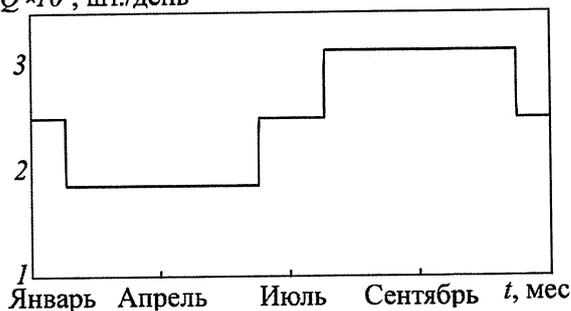


Рис. 8. Изменение объема производства при оптимальной производственной программе

Таблица 3.

Значения оптимальной мощности

$\frac{C_{\text{хр}}}{C_{\text{пр}}}$	A							
	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	2,0	2,5
0,1	$1,00 \cdot P_0$							
0,2	$1,37 \cdot P_0$	$1,00 \cdot P_0$						
0,3	$1,47 \cdot P_0$	$1,25 \cdot P_0$	$1,00 \cdot P_0$					
0,5	$1,55 \cdot P_0$	$1,43 \cdot P_0$	$1,30 \cdot P_0$	$1,14 \cdot P_0$	$1,00 \cdot P_0$	$1,00 \cdot P_0$	$1,00 \cdot P_0$	$1,00 \cdot P_0$
1,0	$1,61 \cdot P_0$	$1,55 \cdot P_0$	$1,50 \cdot P_0$	$1,43 \cdot P_0$	$1,37 \cdot P_0$	$1,30 \cdot P_0$	$1,14 \cdot P_0$	$1,00 \cdot P_0$

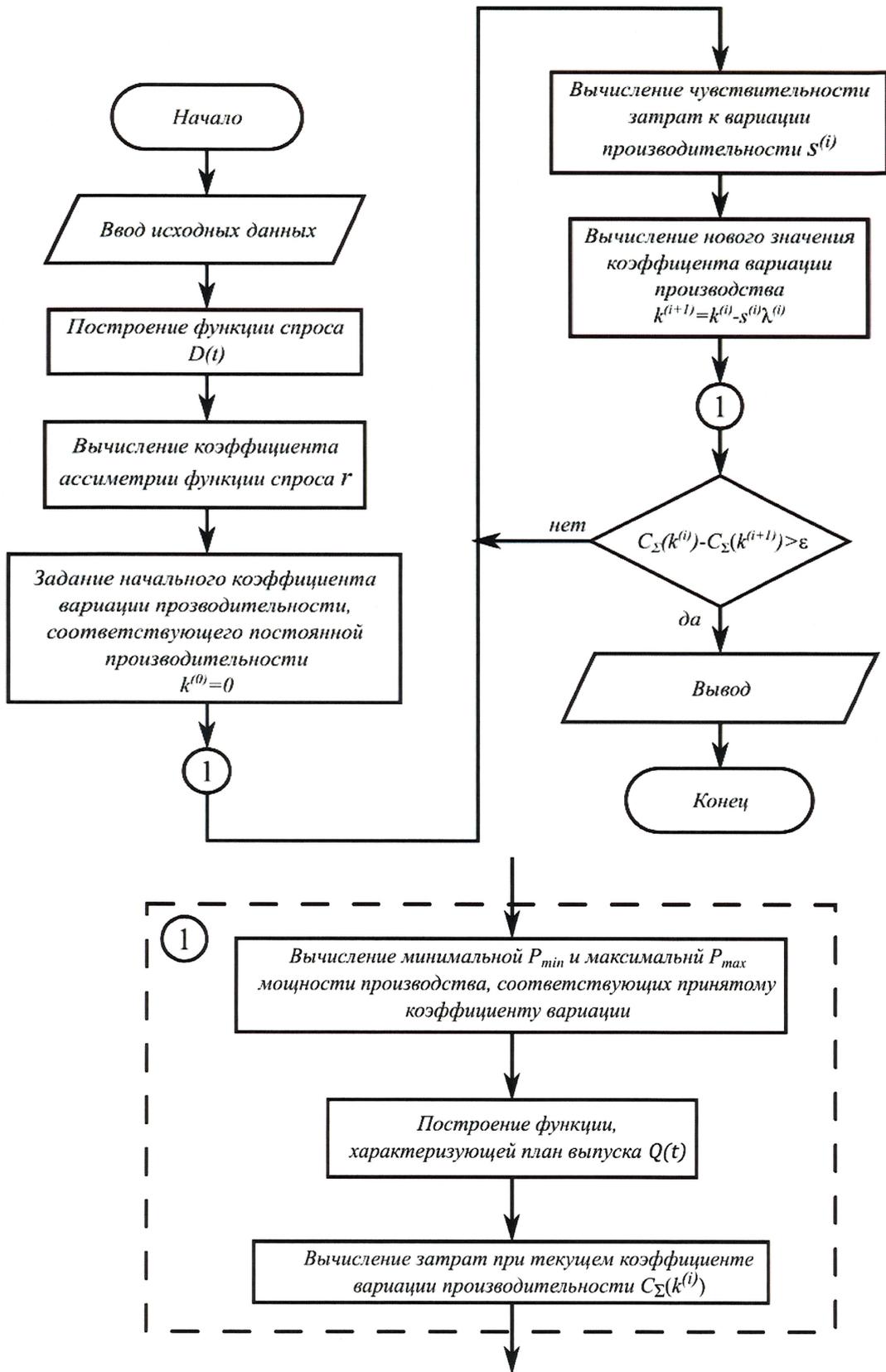


Рис. 8. Блок схема алгоритма определения оптимального коэффициента вариации производительности и процедура вычисления суммарных затрат

Для расчетного примера суммарные затраты достигают минимума при коэффициенте вариации производительности равным 0,4. Это означает, что значение оптимальной производственной мощности должно превышать базовую мощность на 26%. При этом экономия затрат относительно варианта использования базовой мощности составит 5,6%.

Конкретный вид функции объема производства $Q(t)$ – производственной программы, позволяющей добиваться минимума затрат при заданной функции спроса на продукцию предприятия, представлен на Рис. 8.

С помощью вычислительной программы, составленной на основе разработанного алгоритма, была проведена серия модельных расчетов и установлена зависимость оптимальной производственной мощности от соотношений затрат производства и хранения, а также от коэффициента переплаты за дополнительные мощности (Таблица 3). Данные Таблицы 3 показывают, что, как правило, базовая мощность является оптимальной мощностью или близка к ней. Однако при больших затратах на хранение и малом коэффициенте переплаты за дополнительные мощности для реализации оптимальной производственной программы требуются мощности, превосходящие базовую мощность.

Глава 3 посвящена системе организации энергоснабжения машиностроительного предприятия с включением объектов ВИЭ и накопления энергии, а также разработке подходов определения необходимых объемов мощностей солнечных и аккумуляторных батарей, дающих возможность реализовать оптимальный график закупки электроэнергии из внешней сети.

Задача оптимизации закупок ресурсов, цены на которые подвержены сезонным колебаниям, схожа с задачей оптимизации производственной программы. Наибольшую специфику эта задача приобретает при организации системы энергоснабжения предприятий. Организация систем энергоснабжения современных машиностроительных предприятий должна строиться на ряде принципов, позволяющих сделать их надёжными, малозатратными, гибкими и экологичными. Цель организационного построения энергосистемы предприятия заключается в том, чтобы с минимальными затратами обеспечивать бесперебойное энергоснабжение производства при суточных и сезонных пиковых нагрузках, а также при аварийных отключениях от центральной сети.

Идея организация системы энергоснабжения заключается в состыковке затрат на закупку энергии из внешней сети с затратами на её накопление, а также затратами на её 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. В силу природных причин выработка энергии не стабильна, поэтому решить проблему энергоснабжения производства только за счет альтернативных источников невозможно. Однако в ряде случаев частичное покрытие энергопотребностей предприятия за счет альтернативных источников может быть экономически выгодным и всегда диверсифицирует риски. При этом использование ВИЭ делает машиностроительное предприятие более

Гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС) используют в своей работе комплекс генераторов и насосов. Во время спада энергопотребления ГАЭС получает из энергосети дешёвую электроэнергию и расходует её на перекачку воды в верхний бьеф, работая в насосном режиме. Во время пиков энергопотребления ГАЭС сбрасывает воду, вырабатывая электроэнергию. Это – генераторный режим. Сооружение ГАЭС целесообразно в крупномасштабных энергетических системах при условии наличия подходящего рельефа местности и водного ресурса.

Электрохимические накопители имеют достаточно большой КПД (65-70 %) и удельную энергоёмкость (200-300 кВт·ч/м³), ожидаемый срок службы у перспективных моделей около 20 лет. В настоящее время в электроэнергетических системах широкое практическое применение находят аккумуляторные батареи большой энергоёмкости. Весьма перспективными являются накопители на базе литий-ионных аккумуляторов.

Анализ возможностей использования ВИЭ в системе энергоснабжения предприятий показал, что наиболее быстрыми темпами в мире развивается использование ветряных электростанций (ВЭС) и солнечных электростанций (СЭС), причем солнечная энергетика начинает опережать ветроэнергетику.

Достоинствами солнечных электростанций являются автономность работы, возможность адаптации устройств к нуждам потребителей и относительно доступные цены. Оборудование и конструкции станций просты в монтаже и удобны в обслуживании. Однако, КПД преобразования СЭС составляет максимум 30%. Установки занимают огромные площади, батареи стоят больших денег, но мировые инвестиции в развитие этого вида возобновляемой энергии неуклонно растут.

Ветряная электростанция большой мощности может быть эффективным вложением средств при правильном расчете затрат и сроков окупаемости проекта. Целесообразность установки ветрогенератора определяется средней скоростью ветра по региону. Требование определенного диапазона скоростей – один из недостатков ВЭС. Другими недостатками являются высокая стоимость, необходимость выделения под ветровые установки больших земельных площадей, а также раздражающий звук, издаваемый работающими турбинами и плохо переносимый жителями близлежащих населенных пунктов.

Помимо рассмотренных элементов схемы организации системы энергоснабжения – накопителей и ВИЭ, существенную роль в системе играет блок управления энергопотоками и закупкой энергии из внешней сети. В рамках управления закупкой электроэнергии решаются две основные оптимизационные задачи.

Постановка и решение задачи оптимизации графика закупки электроэнергии при использовании накопителей энергии

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

считается, что затраты на покупку электроэнергии C_P вычисляются как произведение объема закупленной электроэнергии на текущую стоимость 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 складываются из затрат на покупку электроэнергии из энергосети и затраты на хранение электроэнергии в накопителях:

$$C_\Sigma = C_P + C_S.$$

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

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

где a_{bd} – суточная амортизация накопителей в расчете на 1 кВт·ч, $X(t)$ – объем накопленной электроэнергии, вычисляемый как

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

где $P(\tau)$ – количество приобретенной электроэнергии за единицу времени; $D(\tau)$ – количество потребленной электроэнергии за единицу времени; X_0 – необходимый остаток на начало расчетного периода, определяемый из условия $X(t) > 0$.

Затраты на покупку электроэнергии за период $(0, t)$ определяются как

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

Таким образом, необходимо найти функцию $P(t)$ из условия:

$$C_\Sigma(P(t)) \rightarrow \min.$$

При этом необходимый объем накопителей можно будет рассчитать автоматически по формуле (3). Для функции потребления можно записать два условия:

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

$$P(t) \geq 0.$$

Эти условия несложно выполнить, если определить функцию закупки $P(t)$ через масштабирование функции $f(t)$, область значений которой $R(f) \in [0, \gamma]$, где γ – некоторая положительная константа. Тогда функция закупки записывается как:

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

В такой формулировке задача сводится к отысканию функции $f(t)$, определяющей характер графика закупки электроэнергии. Данная задача относится к классу некорректно поставленных и ее решение будет существенно зависеть от формы, в котором его будут искать. В данном 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 для каждого из интервалов представляет собой задачу многопараметрической оптимизации. Для такого рода задач

применяются стохастические методы оптимизации эволюционного типа, в частности, широкое распространение нашли методы, построенные на основе генетических алгоритмов.

Исследованы три варианта хранения электроэнергии: с использованием литий-ионных (LiO), литий-титанатных (LTO) и литий-железо-фосфатных (LiFePO₄) аккумуляторов. В качестве значений суточной амортизации a_{ba} были взяты значения типичные для аккумуляторов указанного класса. Характеристики рассматриваемых батарей представлены в Таблице 4. Суточная амортизация рассчитывалась по линейной схеме, исходя из ориентировочного соотношения 1 год ~ 1000 циклов перезарядки.

На Рис. 10 сплошной линией изображены графики закупки электроэнергии из внешней сети, обеспечивающие минимальные суммарные затраты при использовании трёх типов аккумуляторов. Следует отметить, что объем используемых аккумуляторов в каждом случае будет различен.

Таблица 4.

Характеристики аккумуляторов

Тип батарей	Емкость, Вт·час	Ресурс, циклы	Цена, руб.	Суточная амортизация, руб./ (кВт·час)
LTO	92,0	26000	1500	1,718
LiFePO ₄	826,0	3500	5400	5,117
LiO	19,2	1000	109	15,518

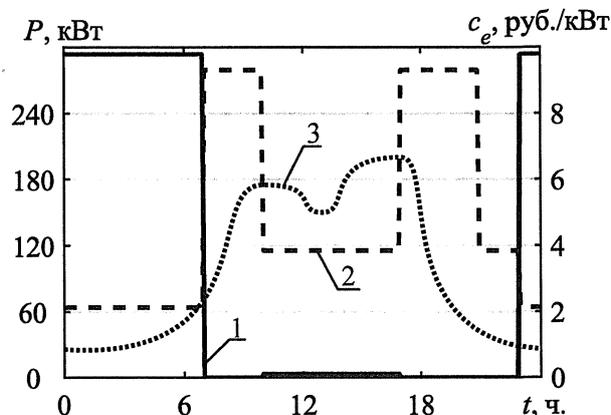


Рис. 10а

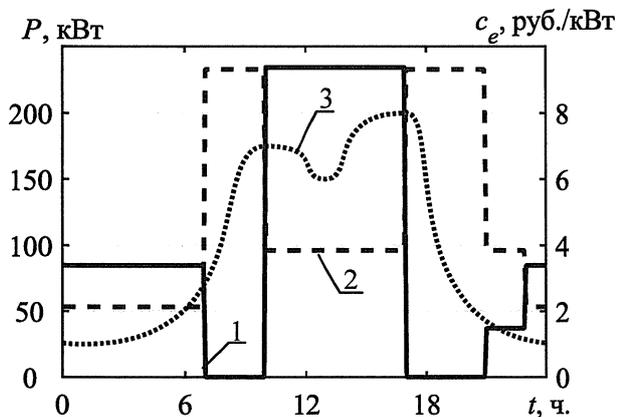


Рис. 10б

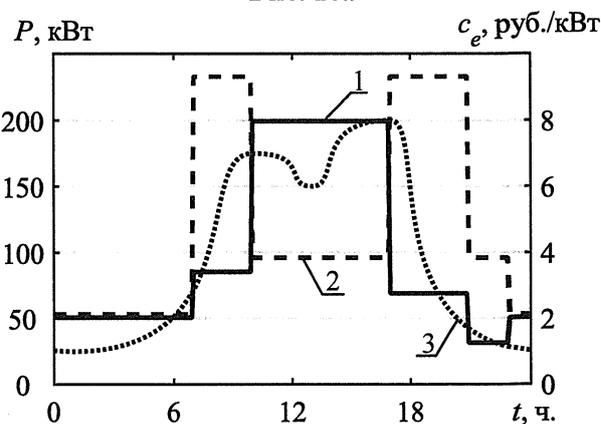


Рис. 10в

Рис. 10. Оптимальные графики закупки электроэнергии $P(t)$ при использовании аккумуляторов LTO (а), LiFePO₄ (б) и LiO (в) аккумуляторов: $P(t)$ (1); $D(t)$ (2); $c_e(t)$ (3)

Из анализа графиков видно, что при использовании батарей низкой стоимости, таких как LTO, основная доля закупки энергии приходится на ночной период, так как затраты на хранение энергии не высоки. При использовании дорогих батарей (типа LiO) график закупки максимально приближается к графику потребления электроэнергии, что логично, так как при высокой стоимости хранения в идеале график закупки должен совпасть с графиком потребления. Использование LTO

аккумуляторов при текущей их стоимости позволяет достичь эффекта экономии порядка 35%, LiFePO4 – порядка 25%, а использование аккумуляторов LiO нецелесообразно. В данном случае, под эффектом экономии подразумевается процентное уменьшение затрат по сравнению с работой без накопителей.

Постановка и решение задачи оптимизации графика закупки электроэнергии при использовании солнечных батарей

Критерием оптимизации по-прежнему является минимум суммарных затрат, которые складываются из затрат на закупку электроэнергии в сети C_p и затрат на эксплуатацию и амортизацию солнечных батарей C_{se} :

$$C_{\Sigma} = C_p + C_{se} \rightarrow \min.$$

Затраты на закупку электроэнергии в сети C_p определяются согласно зависимости (4). Затраты на эксплуатацию и амортизацию солнечных батарей прямо пропорциональны их количеству:

$$C_{se} = a_{sd} \cdot P_{sp}^{\max},$$

где a_{sd} – удельные суточные эксплуатационные расходы; P_{sp}^{\max} – суммарная максимальная мощность находящихся в эксплуатации солнечных панелей.

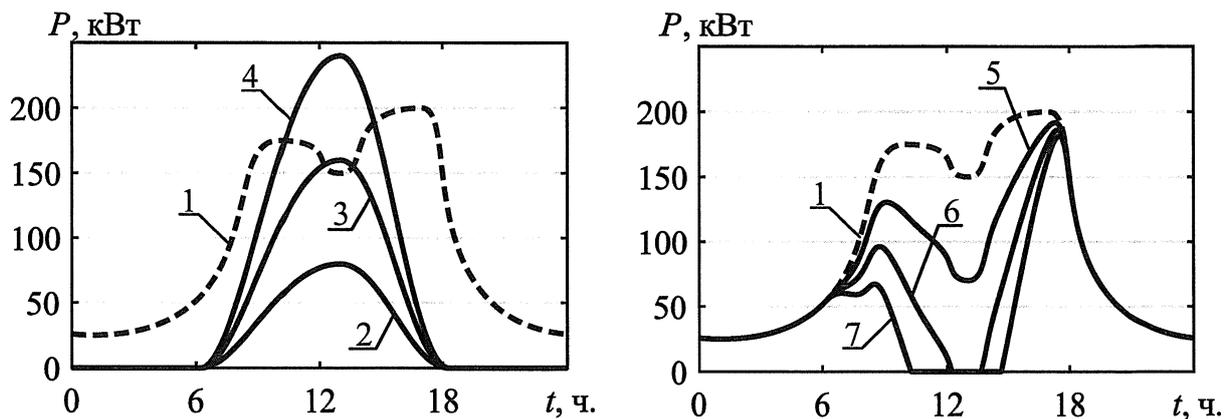


Рис. 11. Графики выработки электроэнергии СП и соответствующие им графики закупки электроэнергии из внешней сети: график потребления $D(t)$ (1); график вырабатываемой мощности СП при $P_{max} = 80$ кВт (2), при $P_{max} = 160$ кВт (3), при $P_{max} = 240$ кВт (4); график закупки при $P_{max} = 80$ кВт (5), при $P_{max} = 160$ кВт (6), при $P_{max} = 240$ кВт (7)

Мощность, вырабатываемая солнечными батареями в течение суток $P_{solar}(t)$, определяется как произведение максимальной суммарной мощности P_{sp}^{\max} на нормирующую функцию $p_{unit}(t)$, отражающую изменение солнечной активности в течение суток:

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

График закупки формируется как разница между графиком потребляемой энергии $D(t)$ и графиком вырабатываемой солнечной энергии $P_{solar}(t)$. При этом закупка не может быть отрицательной, то есть возможности продажи электроэнергии во внешнюю сеть нет. На Рис. 11 показаны графики закупки в зависимости от суммарной максимальной мощности солнечных панелей (СП).

График зависимости суммарных затрат от суммарной мощности солнечных панелей при фиксированных эксплуатационных расходах изображен на Рис 12. В

данном случае задача является однопараметрической и найти оптимальную величину суммарной мощности солнечных панелей, характеризующих их количество, не составляет труда. Далее, по аналогии с предыдущей задачей, можно определить эффект экономии средств на электроснабжение при использовании солнечных панелей.

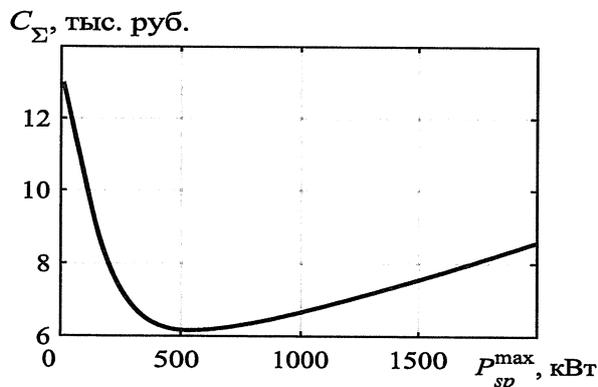


Рис. 12. Зависимость суммарных затрат от общей мощности используемых солнечных панелей

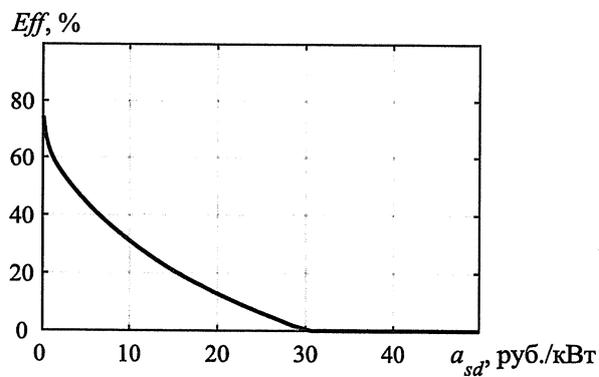


Рис. 13. Эффект экономии при использовании солнечных панелей в зависимости от расходов на их эксплуатацию

График зависимости эффекта экономии от величины расходов на эксплуатацию солнечных панелей, включающих амортизационные отчисления, представлен на Рис. 13. Очевидно, что при невысокой стоимости панелей эффект экономии может составлять более 20%, но при цене выше 30 рублей за кВт·час в сутки эффект отрицательный.

Основные результаты и выводы:

1. Анализ специфики сезонного спроса и энергопотребления показал, что коэффициент сезонности для ряда машиностроительных производств превышает 1, 3 и оптимизация программ выпуска продукции наряду с оптимизацией систем энергоснабжения может существенно повысить эффективность и конкурентоспособность предприятий.

2. Введенные понятия базовой мощности сезонного предприятия и коэффициента её вариации позволили сформулировать задачу формирования производственной программы предприятия, минимизирующую суммарные издержки производства и хранения, как однопараметрическую оптимизационную задачу.

3. Разработанный метод формирования оптимальной производственной программы предприятия при сезонном спросе, основанный на методе градиентного спуска к минимуму функции суммарных затрат, дает возможность определить производственную программу в виде линейной трехступенчатой функции и требуемые для её реализации производственные мощности.

4. Модельные расчеты на основе разработанного метода показали, что базовая мощность часто является оптимальной мощностью, но при больших затратах на хранение и малых затратах на содержание мощностей для реализации оптимальной программы производства требуются мощности, превосходящие базовую мощность более чем на 30%.

5. Предложенный вариант организации системы энергоснабжения производства, в которую входят объекты генерации энергии на базе ВИЭ, объекты накопления энергии, объекты традиционной генерации при форс-мажоре и блок управления закупкой энергии из внешней сети, обеспечивает надежное энергоснабжение и возможность минимизации затрат.

6. Разработанный подход к оптимизации графика закупки электроэнергии при наличии на производстве накопителей энергии, построенный на принципах решения некорректно поставленных задач, позволил получить оптимальный график закупки электроэнергии в легкорезализуемом на практике виде и определить необходимый объем накопителей.

7. Модельные расчеты на основе разработанного подхода показали, что использование предприятием в качестве накопителей энергии литий-титанатных аккумуляторов (при их сегодняшней стоимости) позволяет достичь эффекта экономии порядка 35% по сравнению с ситуацией, когда накопителей нет.

8. Решение задачи оптимизации закупки электроэнергии при использовании солнечных батарей, в которой искомым параметром является суммарная мощность солнечных панелей, показало, что при невысокой стоимости эксплуатации панелей эффект экономии составляет более 20%, а при цене выше 30 рублей за кВт·час в сутки эффект отрицательный.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах:

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ по специальности 05.02.22:

1. Александров А.А. Организация производства продукции сезонного спроса на промышленных предприятиях //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2020. №3. С.47-61. (0,8 п.л.)

2. 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. С.85-102. (1 п.л./0,6 п.л.)

Статьи в сборниках трудов международных и всероссийских конференций:

3. Александров А.А. Формулировка общего подхода к управлению производственной программой сезонных производств //Материалы 4-ой Международной научно-технической конференции «Управление научно-техническими проектами». М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. С. 7-11. (0,3 п.л.)

4. Александров А.А., Захаров М.Н., Куц М.С. Оптимизация графика закупки электроэнергии производственной структурой при наличии накопителей //Чарновские чтения: Сборник трудов X Всероссийской научной конференции по организации производства. М.: НОЦ «Контроллинг и управленческие инновации» МГТУ им. Н.Э. Баумана, НП «Объединение контроллеров», 2021. С. 6–11. (0,4 п.л./0,2 п.л.)

5. Александров А.А. Минимизация затрат на закупку электроэнергии за счет возобновляемых источников энергии // Технические науки: проблемы и решения: Сб. ст. по материалам XLV Международной научно-практической конференции «Технические науки: проблемы и решения». – М.: «Интернаука», 2021. № 2(42). DOI:10.32743/2587862X.2021.2.42.249914 (0,3 п.л.)