

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ПРИ ЦЕНОЗАВИСИМОМ УПРАВЛЕНИИ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ

© 2019

А.П. Дзюба, кандидат экономических наук, старший научный сотрудник кафедры «Финансы, денежное обращение и кредит» Высшей школы экономики и управления Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск (Россия)

Ключевые слова: ценозависимое электропотребление; управление спросом на электропотребление; метод линейного программирования; производственное планирование; графики электропотребления; энергоэффективность; энерготарифы; управление затратами на закупку электроэнергии; промышленная энергетика.

Аннотация: Одним из значимых для мировой экономики направлений повышения энергетической эффективности, реализуемых в современных условиях, является развитие технологий управления спросом на электропотребление. На уровне конечных потребителей электроэнергии управление спросом осуществляется посредством механизма ценозависимого управления электропотреблением, который основан на изменении графиков работы производственного оборудования, действующего на площадках промышленных предприятий и крупных потребителей энергоресурсов. Управление графиками электропотребления отдельных энергоемких производственных объектов должно производиться на базе применения методов производственного планирования. Целью статьи является исследование возможности применения методов линейного программирования для выбора оптимального графика производственного процесса при ценозависимом управлении электропотреблением на примере данных реального промышленного предприятия. Анализ действующих методов производственного планирования позволил установить, что в условиях глобальной цифровизации промышленности особую роль занимают экономико-математические методы. Наиболее подходящим из них является метод линейного программирования, позволяющий учитывать гибкое ценозависимое управление электропотреблением.

Приведены результаты апробации разработанной автором модели производственного планирования на основе метода линейного программирования на примере участка закалочных печей в составе промышленного предприятия. В результате расчетов смоделирована стоимость электроэнергии при базовом варианте работы участка закалочных печей, при применении параметров расчетной модели в вариантах работы участка в первую, вторую либо третью смену. Результаты расчета параметров модели позволили выявить, что при сохранении объема выполнения плана участком закалочных печей затраты на закупку электроэнергии снизились относительно работы участка в базовом варианте: в первую смену – на 4,2 %, во вторую смену – на 24,2 % и в третью смену – на 57,6 %. Это показывает важность не только теоретических, но и практических результатов исследования.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений повышения энергетической эффективности, реализуемых на уровне национальных экономик, является применение технологии управления спросом на электропотребление (англ. Demand Side Management (DSM)) [1]. Управление спросом на электропотребление представляет собой инициативную форму экономического взаимодействия между энерго-снабжающими организациями и потребителями электроэнергии, направленную на стимулирование потребителей выравнять собственные графики электропотребления с целью выравнивания общего спроса на уровне региональных и объединенных электроэнергетических систем. По данным аналитического агентства Navigant Research, в 2025 году возможности мировых потребителей по управлению спросом на электропотребление вырастут до 144 ГВт относительно возможностей 2016 года, которые составляют 39 ГВт [2]. Принятие Европейской комиссией в 2016 году пакета по чистой энергетике (англ. Clean Energy Package) подчеркивает начало масштабного внедрения технологий управления спросом на электропотребление в Европе. Объемы перспективного управления спросом, оцениваемые Европейской комиссией, составляют 100 ГВт, с перспективой увеличения в 2030 году до 160 ГВт [3]. По оценкам International Energy Agency, в 2015 году в мире порядка 3 900 ТВт·ч потребляемой электроэнер-

гии потенциально может быть использовано для управления спросом, и, по мнению агентства, к 2040 году данная величина возрастет до 6 900 ТВт·ч [4]. В настоящий момент технологии управления спросом активно используются и продолжают развиваться в странах Северной Америки, Европы и Океании [5]. Технологии управления спросом начали активно внедряться и развиваться на Азиатском континенте, прежде всего в Китае и Японии [6; 7].

В России технологии управления спросом находятся на уровне создания базовой концепции и реализации имитационного моделирования выравнивания графиков нагрузки отдельными потребителями электроэнергии, участвующими в тестовом регулировании. В России механизм управления спросом на электропотребление называется «технология ценозависимого потребления электроэнергии (мощности)» либо «ценозависимое электропотребление». Ценозависимое электропотребление – управление конфигурацией собственного графика электропотребления потребителем электрической энергии в зависимости от изменения ценовых параметров стоимости закупаемой электроэнергии [8]. В 2016 году было утверждено постановление Правительства РФ № 699 «О внесении изменений в Правила оптового рынка электрической энергии и мощности», в котором были описаны изменения в законодательство в части развития технологий ценозависимого электропотребления.

На основании указанного постановления было подготовлено приложение к договору о присоединении к торговой системе оптового рынка «Приложение 19.9. Регламент участия на оптовом рынке покупателей с ценозависимым потреблением», в котором были описаны возможности участников оптового рынка электроэнергии снижения собственного графика спроса с последующим снижением обязательств по закупкам электрической мощности в рамках механизма «конкурентного отбора мощности» (КОМ). Однако данный механизм не нашел применения у участников оптового рынка и был использован лишь одним потребителем электроэнергии, действующим в ценовой зоне Сибири [9].

20 марта 2019 года было утверждено постановление Правительства РФ № 287 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам функционирования агрегаторов управления спросом на электрическую энергию в Единой энергетической системе России, а также совершенствования механизма ценозависимого снижения потребления электрической энергии и оказания услуг по обеспечению системной надежности», которое призвано усовершенствовать действующий механизм управления спросом в России и запустить современный механизм системного выравнивания спроса на электропотребление в рамках электроэнергетической системы России [10].

Одной из существенных сложностей в процессе развития механизмов управления спросом на электропотребление в России является управление графиками спроса на электропотребление конечными потребителями электроэнергии, основными из которых являются

промышленные предприятия. Почасовые графики электропотребления промышленных предприятий и крупных потребителей электроэнергии представляют собой сумму мгновенных параметров электропотребления каждого электропотребляющего объекта, входящего в состав единого комплекса системы электроснабжения промышленного предприятия либо крупного потребителя электроэнергии [11]:

$$W_t^{nпредпр} = \sum_{t=1}^{nпредпр} W_t^{объект},$$

где $W_t^{nпредпр}$ – часовое электропотребление промышленного предприятия (кВт·ч);

$W_t^{объект}$ – часовое электропотребление отдельного электропотребляющего объекта в составе промышленного предприятия (кВт·ч).

Пример формирования графика электропотребления отдельного предприятия на основе графиков работы отдельных производственных объектов представлен на рис. 1.

Примеры почасовых графиков электропотребления различных типов промышленных предприятий и крупных потребителей энергоресурсов представлены на рис. 2. Анализ графиков электропотребления позволяет подчеркнуть неравномерность внутрисуточного почасового спроса на электропотребление, которая для разных типов потребителей характеризуется различными особенностями конфигурации. Неравномерность спроса на электропотребление связана с непостоянством

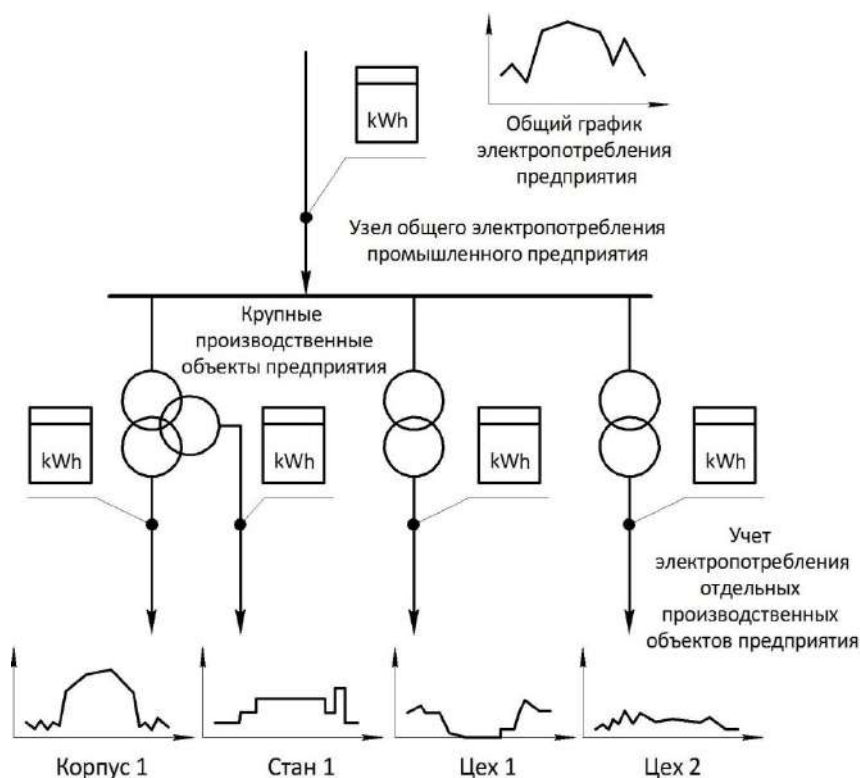


Рис. 1. Формирование графика электропотребления отдельного предприятия на основе графиков работы отдельных производственных объектов

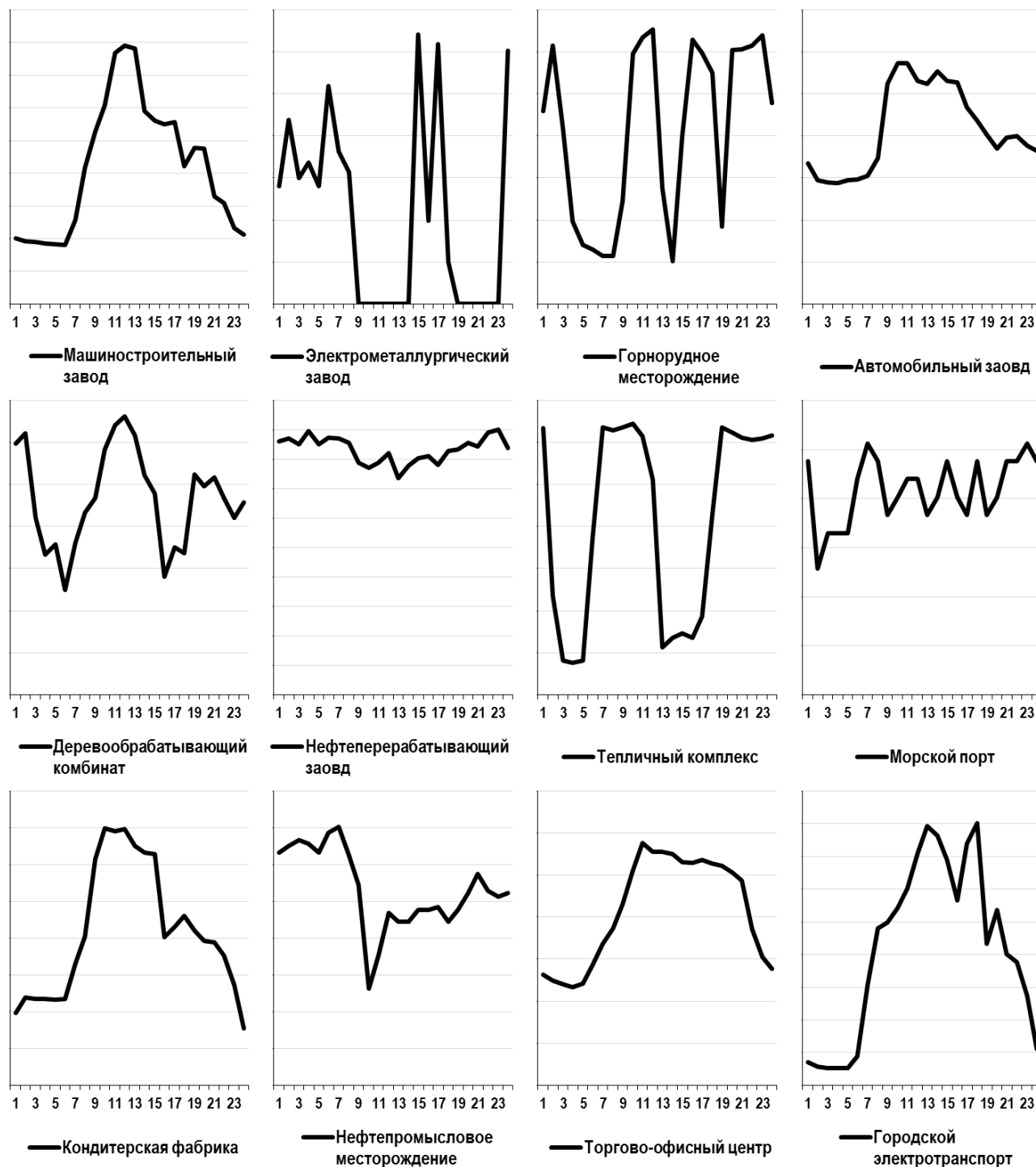


Рис. 2. Графики почасового электропотребления различных типов промышленных предприятий и крупных потребителей энергоресурсов за типовые сутки

графиков работы электропотребляющего оборудования, действующего на предприятии.

Неравномерность графиков работы электропотребляющего оборудования связана с рядом факторов, которые по признакам направления возникновения можно разделить на четыре ключевые группы [12]. Производственные факторы: производственные программы предприятий; планы выпуска продукции; графики работы смежных технологических процессов. Климатические факторы: температура наружного воздуха и осадки; сезонность изменения климата; продолжительность

светового дня. Социально-экономические факторы: сменность работы предприятий; чередование рабочих и выходных дней; время обеденного перерыва. Технологические факторы: удельные параметры потребления электроэнергии производственным оборудованием; режимы работы производственного оборудования; время выхода оборудования на рабочие режимы.

С учетом выявленного состава факторов задача управления графиками электрических нагрузок в масштабах отдельных промышленных предприятий является достаточно сложной [13]. При этом в составе каждого

промышленного предприятия либо крупного электропотребляющего объекта находятся отдельные потребители, которые вносят неравномерный вклад в общее потребление электроэнергии. К примеру, если персональные компьютеры, системы локального освещения и ручной электроинструмент вносят незначительный вклад в общую величину электропотребления предприятий, то вклад электрических печей, систем электроотопления либо электроприводов отдельных станков и механизмов более значителен. Таким образом, управление графиками работы отдельных энергоемких производственных объектов позволит управлять графиком электропотребления в масштабах всего предприятия в целом.

Задача управления графиками работы отдельных энергоемких производственных объектов должна решаться на уровне системы производственного планирования предприятия, которая должна учитывать возможности изменения графика работы отдельных производственных объектов с учетом выполнения функции данного производственного объекта, оптимальной стоимости затрат на закупку электроэнергии для него [14].

Цель работы – исследование возможности применения методов линейного программирования для выбора оптимального графика производственного процесса при ценозависимом управлении электропотреблением на примере данных реального промышленного предприятия.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Существует достаточно большое количество методов производственного планирования: нормативный, балансовый, расчетно-аналитический, графоаналитический, программно-целевой, экономико-математический и пр. [15]. Особое место среди методов производственного планирования занимают экономико-математические. Благодаря развитию цифровых технологий в рамках производственной деятельности предприятий, прежде всего, появилась возможность регистрировать различные параметры состояния отдельных машин и оборудования, собирать, передавать и обрабатывать эти параметры в единых центрах, а также оказывать дальнейшие управляющие воздействия на производственные объекты [16].

Важнейшей основой для производственного планирования при помощи экономико-математических методов является разработка наиболее точной модели производственного планирования, позволяющей описать управляемые производственные процессы с точки зрения получения требуемого эффекта. По нашему мнению, наиболее подходящим экономико-математическим методом производственного планирования, учитывающим гибкое ценозависимое управление электропотреблением отдельных производственных объектов, является модель, основанная на базе методов линейного программирования.

Линейное программирование – математическая дисциплина, посвященная теории и методам решения экстремальных задач на множествах n -мерного векторного пространства, задаваемых системами линейных уравнений и неравенств [18]. Общей (стандартной) задачей линейного программирования называется задача нахо-

ждения минимума линейной целевой функции (линейной формы) вида:

$$f(x) = \sum_{j=1}^n c_j x_j = c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_n x_n,$$

где c – объем потребляемого ресурса;
 x – количество выпускаемой продукции;
 $1, 2, \dots, n$ – номера видов ресурсов.

Задача, в которой фигурируют ограничения в форме неравенств, называется основной задачей линейного программирования:

$$\sum_{i=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i, \quad (i = 1, 2, \dots, m),$$

$$x_j \geq 0. \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

где a – количество ресурсов, всего;
 b – потребность в производимых изделиях, всего.

Задача оптимального использования ресурсов, или задача производственного планирования, состоит в том, чтобы определить, какую продукцию и в каком объеме следует изготовить предприятию из имеющихся ресурсов с тем, чтобы доход от реализации продукции был наибольшим. Всякий набор значений переменных (x_1, x_2, \dots, x_n) называется планом задачи. Те планы, которые удовлетворяют системе ограничений, называются допустимыми планами. Оптимальным планом называется тот из допустимых планов, который дает наибольшее значение целевой функции среди всех ее значений на допустимых планах [19]. Само это наибольшее значение целевой функции, то есть значение целевой функции на оптимальном плане, называется оптимумом задачи. Решить задачу производственного планирования – значит найти оптимальный план и оптимум для ее математической модели.

На примере ценозависимого управления электропотреблением участка закалочных печей на промышленном предприятии, действующем в г. Санкт-Петербурге, разработана модель производственного планирования загрузки оборудования по критерию стоимости закупки электроэнергии.

Управление производится двумя электрическими нагревательными печами установленной мощностью 2 200 кВт каждая. Исходные параметры для разработки модели управления:

- нагревательные печи работают в течение одной смены каждые сутки;
- последовательность выполнения почасовых операций отсутствует;
- график работы участка – пятидневная рабочая неделя;
- продолжительность одной смены составляет 8 часов в сутки в любую очередность рабочих смен;
- перенос графиков рабочих смен не влияет на изменение величины фонда оплаты труда (ФОТ) участка;
- накладные расходы, административные издержки и плата за ЖКХ при переносе графиков рабочих смен не изменяются;

- загрузка печей в период одной смены может изменяться в зависимости от производственного задания;
- поступающие заготовки аккумулируются на складском терминале участка печей в течение суток, и к моменту начала смены участок приступает к обработке;
- плановая величина обработки заготовок на каждую смену является одинаковой и составляет 46 000 кг заготовок за смену;
- минимальный объем почасовой загрузки участка может составлять 0 тонн деталей за час;
- максимальный объем почасовой загрузки участка ограничен производственными возможностями печей и может составлять 8 тонн деталей за час;
- разогрев печи до рабочей температуры может производиться мгновенно, без затрат дополнительного времени;
- потребление электроэнергии печами при максимальной загрузке, равной 100 % номинальной мощности, составляет 4 400 кВт;
- удельное потребление электроэнергии на обработку составляет 0,77 кВт·ч на 1 кг заготовок;
- при снижении коэффициента загрузки печи потребляемая мощность снижается пропорционально;
- график почасовой стоимости электроэнергии на каждый период суток принимается одинаковым;
- дисконтирование стоимости электроэнергии на планируемые периоды принимается пропорциональным для каждого часа суток.

Продолжительность каждой смены участка составляет 8 часов:

- 1-я смена – с 08:00 до 16:00;
- 2-я смена – с 16:00 до 24:00;
- 3-я смена – с 24:00 до 08:00.

Величина диапазона регулирования загрузки составляет от 0 до 8 000 кг. Диапазон изменения загрузки не может превышать максимальную пропускную способность оборудования.

Почасовой график цен на закупку электроэнергии представлен на рис. 3. Как видно из диаграммы, параметры почасовых цен изменяются в течение суток от 1,77 руб/кВт·ч в ночное время до 5,91 руб/кВт·ч в дневное время [20]. Таким образом, ценовые параметры в течение суток могут изменяться в 3,3 раза.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СТОИМОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ ЗАГРУЗКИ ОБОРУДОВАНИЯ

На рис. 4 представлены диаграммы параметров расчетной модели при базовом варианте загрузки оборудования участком, обозначенные А, Б и В:

- А – почасовая обработка деталей (тонн в час);
- Б – потребление электроэнергии в каждый час (кВт);
- В – затраты на закупку электроэнергии на каждый час (руб.).

В базовом варианте загрузки оборудования участок работает в 1-ю смену. Принимается, что печи работают на 100 % загрузки, при этом фактическая загрузка печей является равномерной исходя из заданного суточного плана. Как видно из диаграмм, несмотря на то, что почасовая обработка деталей и почасовое потребление электроэнергии являются постоянными, почасовые затраты на закупку электроэнергии варьируются для каждого часа, что связано с неравномерностью стоимости электроэнергии в каждый час суток. Параметры расчетной модели при базовом варианте загрузки оборудования участком представлены в таблице 1. Как видно из таблицы, при работе по графику в 1-ю смену и равномерной загрузке печей затраты на закупку электроэнергии составляют 183 140 руб., средневзвешенный тариф закупки – 5,2 руб/кВт·ч.

С помощью модели выбора оптимального графика загрузки оборудования, разработанной на основе метода линейного программирования, был определен оптимальный график загрузки печей. Рассчитана оптимальная величина загрузки оборудования в вариантах смен 1, 2, 3. Полученные параметры расчетной модели при варианте загрузки в 1-ю смену представлены на рис. 4, во 2-ю и 3-ю смену – на рис. 5.

Как следует из диаграмм параметров расчетной модели при варианте загрузки оборудования в 1-ю, 2-ю и 3-ю смену, расчетная модель, выполненная на основе метода линейного программирования, производит распределение почасовых графиков работы участка печей в соответствии с заданным критерием минимизации затрат на закупку электроэнергии.

Так, для варианта выбора оптимального графика работы в 1-ю смену производится распределение нагрузки

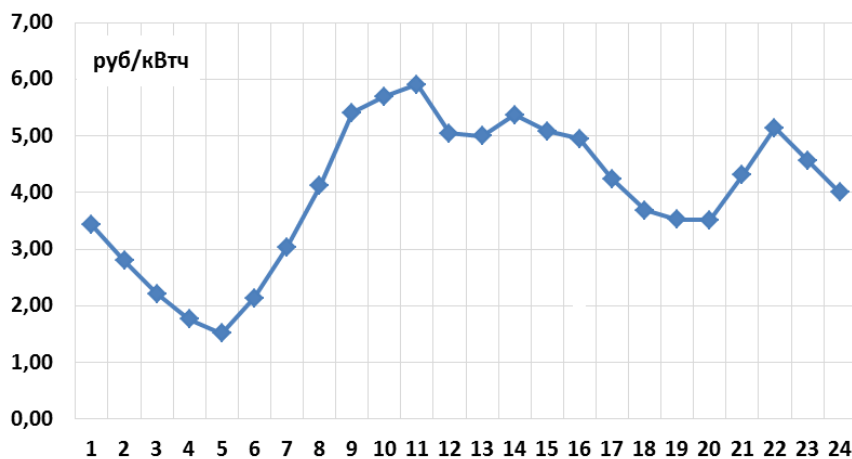


Рис. 3. Почасовой график цен на закупку электроэнергии

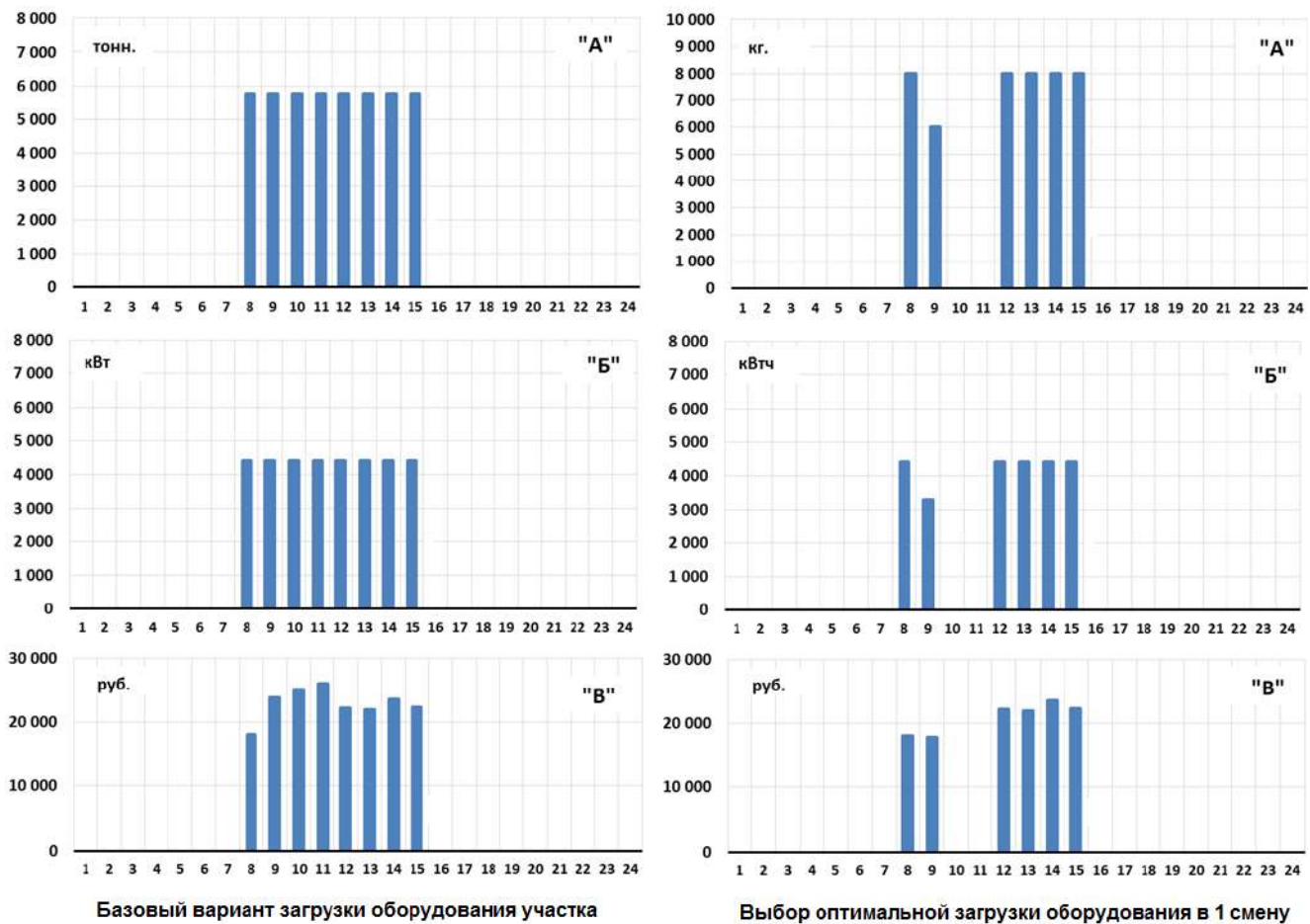
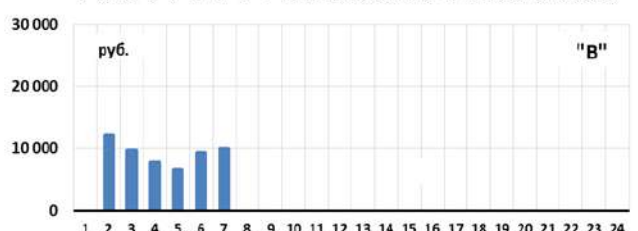
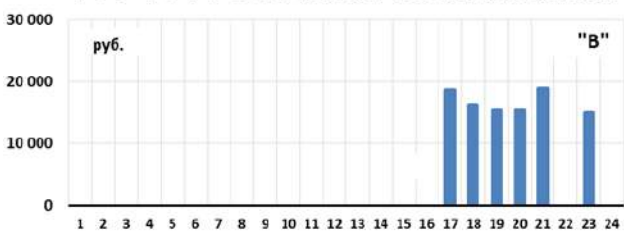
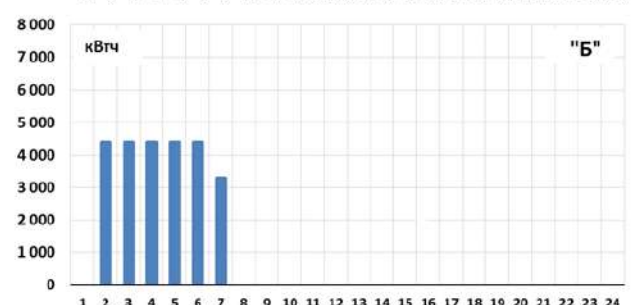
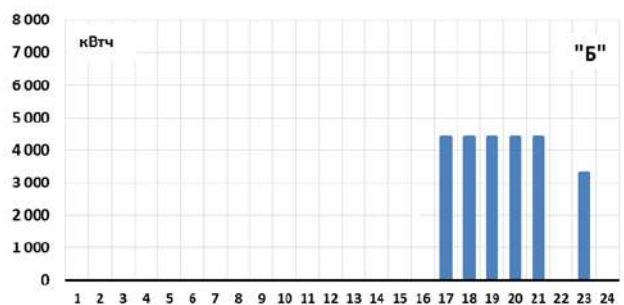
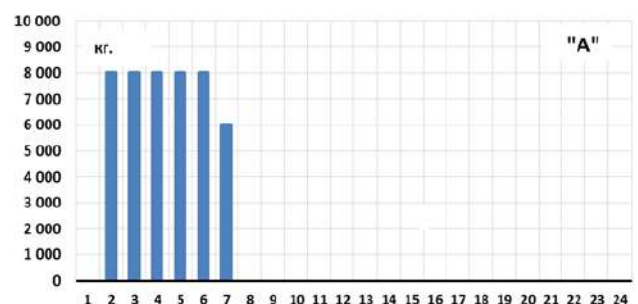
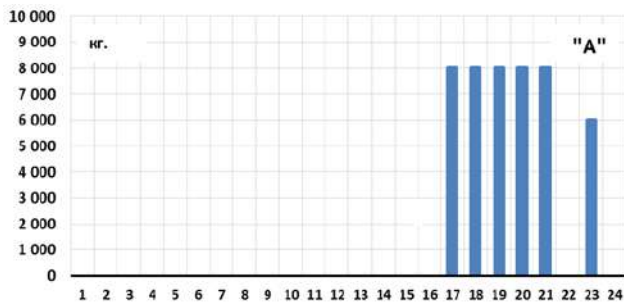


Рис. 4. Диаграммы параметров расчетной модели при базовом варианте загрузки оборудования и при варианте загрузки в 1-ю смену

Таблица 1. Параметры расчетной модели при базовом варианте загрузки оборудования участка

Час суток	Рабочие смены	Минимальный объем загрузки участка	Максимальный объем загрузки участка	Фактический объем загрузки участка	Удельное потребление электроэнергии	Коэффициент использования печи	Потребление электроэнергии	Цена электроэнергии	Заграты на закупку электроэнергии
		кг	кг	тонн в час	кВт·ч/кг	%	кВт·ч	руб/кВт·ч	руб.
1	3	0	8 000	0	0,770	0	0	3,42	0
2	3	0	8 000	0	0,770	0	0	2,79	0
3	3	0	8 000	0	0,770	0	0	2,21	0
4	3	0	8 000	0	0,770	0	0	1,77	0
5	3	0	8 000	0	0,770	0	0	1,51	0
6	3	0	8 000	0	0,770	0	0	2,14	0
7	3	0	8 000	0	0,770	0	0	3,02	0
8	1	0	8 000	5 750	0,770	100	4 400	4,12	18 130
9	1	0	8 000	5 750	0,770	100	4 400	5,40	23 780
10	1	0	8 000	5 750	0,770	100	4 400	5,70	25 065

Час суток	Рабочие смены	Минимальный объем загрузки участка	Максимальный объем загрузки участка	Фактический объем загрузки участка	Удельное потребление электроэнергии	Коэффициент использования печи	Потребление электроэнергии	Цена электроэнергии	Затраты на закупку электроэнергии
11	1	0	8 000	5 750	0,770	100	4 400	5,91	25 998
12	1	0	8 000	5 750	0,770	100	4 400	5,04	22 191
13	1	0	8 000	5 750	0,770	100	4 400	5,00	21 983
14	1	0	8 000	5 750	0,770	100	4 400	5,37	23 612
15	1	0	8 000	5 750	0,770	100	4 400	5,09	22 381
16	2	0	8 000	0	0,770	0	0	4,95	0
17	2	0	8 000	0	0,770	0	0	4,24	0
18	2	0	8 000	0	0,770	0	0	3,69	0
19	2	0	8 000	0	0,770	0	0	3,52	0
20	2	0	8 000	0	0,770	0	0	3,51	0
21	2	0	8 000	0	0,770	0	0	4,31	0
22	2	0	8 000	0	0,770	0	0	5,14	0
23	2	0	8 000	0	0,770	0	0	4,57	0
24	3	0	8 000	0	0,770	0	0	4,00	0
ИТОГО за сутки				46 000			35 200		183 140



Выбор оптимальной загрузки оборудования во 2 смену

Выбор оптимальной загрузки оборудования в 1 смену

Рис. 5. Диаграммы параметров расчетной модели при варианте загрузки оборудования во 2-ю и 3-ю смену

в рамках периодов 8–9 и 12–15 часов. В периоды максимальной почасовой суточной стоимости электроэнергии, а именно в 10–11 часов, загрузка оборудования не производится. Для варианта выбора оптимального графика работы во 2-ю смену производится распределение нагрузки в рамках периодов 17–21 и 23 часов, что также позволяет минимизировать потребление в час с наибольшей стоимостью электроэнергии в рамках интервала 2-й смены. Для варианта выбора оптимального графика работы в 3-ю смену производится распределение нагрузки в рамках периода 2–7 часов, которые выбраны моделью по критериям минимизации стоимости электроэнергии. Параметры расчетной модели при ва-

рианте загрузки оборудования участка в 3-ю смену представлены в таблице 2.

В таблице 3 представлены сводные данные параметров расчетной модели при выборе оптимальной величины загрузки оборудования при различной сменности работы, с учетом всех четырех вариантов загрузки оборудования исследуемого участка.

Как следует из результатов расчета, при переводе на вариант оптимальной величины загрузки оборудования в 1-ю смену снижение среднего тарифа составляет 4,2 % от базовой величины. В варианте работы участка во 2-ю смену снижение среднего тарифа составляет 24,2 % от базовой величины. При варианте работы

Таблица 2. Параметры расчетной модели при выборе оптимальной величины загрузки оборудования в 3-ю смену

Час суток	Рабочие смены	Минимальный объем загрузки участка	Максимальный объем загрузки участка	Фактический объем загрузки участка	Удельное потребление электроэнергии	Коэффициент использования печи	Потребление электроэнергии	Цена электроэнергии	Затраты на закупку электроэнергии
		кг	кг	тонн в час	кВт·ч/кг	%	кВт·ч	руб/кВт·ч	руб.
1	3	0	8 000	0	0,770	0,00	0	3,42	0
2	3	0	8 000	8 000	0,770	1,00	4 400	2,79	12 284
3	3	0	8 000	8 000	0,770	1,00	4 400	2,21	9 710
4	3	0	8 000	8 000	0,770	1,00	4 400	1,77	7 768
5	3	0	8 000	8 000	0,770	1,00	4 400	1,51	6 658
6	3	0	8 000	8 000	0,770	1,00	4 400	2,14	9 408
7	3	0	8 000	6 000	0,770	0,75	3 300	3,02	9 970
8	1	0	8 000	0	0,770	0,00	0	4,12	0
9	1	0	8 000	0	0,770	0,00	0	5,40	0
10	1	0	8 000	0	0,770	0,00	0	5,70	0
11	1	0	8 000	0	0,770	0,00	0	5,91	0
12	1	0	8 000	0	0,770	0,00	0	5,04	0
13	1	0	8 000	0	0,770	0,00	0	5,00	0
14	1	0	8 000	0	0,770	0,00	0	5,37	0
15	1	0	8 000	0	0,770	0,00	0	5,09	0
16	2	0	8 000	0	0,770	0,00	0	4,95	0
17	2	0	8 000	0	0,770	0,00	0	4,24	0
18	2	0	8 000	0	0,770	0,00	0	3,69	0
19	2	0	8 000	0	0,770	0,00	0	3,52	0
20	2	0	8 000	0	0,770	0,00	0	3,51	0
21	2	0	8 000	0	0,770	0,00	0	4,31	0
22	2	0	8 000	0	0,770	0,00	0	5,14	0
23	2	0	8 000	0	0,770	0,00	0	4,57	0
24	3	0	8 000	0	0,770	0,00	0	4,00	0
ИТОГО за сутки				46 000			25 300		55 798

Таблица 3. Сводные данные параметров расчетной модели при выборе оптимальной величины загрузки оборудования при различной сменности работы

№ пп	Параметр	Характеристика	Базовый вариант	Параметры расчетной модели при выборе оптимальной величины загрузки оборудования		
				1-я смена	2-я смена	3-я смена
1	Фактический объем загрузки участка	тонн	46 000	46 000	46 000	46 000
2	Плановый объем загрузки участка	тонн	46 000	46 000	46 000	46 000
3	Отклонения от плана	тонн	0	0	0	0
4	Потребление электроэнергии на производство	кВт·ч*сутки	35 200	25 300	25 300	25 300
5	Стоимость закупки электроэнергии	руб.*сутки	183 140	126 132	99 826	55 798
6	Тариф закупки электроэнергии	руб/кВт·ч	5,20	4,99	3,95	2,21
7	Изменение тарифа относительно базового варианта	%	0,0	95,8	75,8	42,4
8	Эффект тарифа относительно базового варианта	%	0	4,2	24,2	57,6

в 3-ю смену участка снижение среднего тарифа составляет 57,6 % от базовой величины. Таким образом, при оптимальном варианте графиков загрузки оборудования наиболее экономически эффективным решением будет перевод участка термообработки на режим работы в 3-ю смену.

Перевод работы участка термообработки на 3-ю смену с использованием разработанной модели оптимальной величины загрузки оборудования по показателям ценозависимого электропотребления позволит снизить затраты на закупку электроэнергии, повысить эффективность деятельности как отдельного участка, так и промышленного предприятия в целом. Следует отметить, что применение разработанной модели оптимальной величины загрузки оборудования по показателям ценозависимого электропотребления в рамках реализации инвестиционных проектов по внедрению энергоемкого производственного оборудования за счет снижения стоимости покупаемой электроэнергии с условием сохранения объемов производства позволит существенно повысить показатели инвестиционного проекта, такие как чистый дисконтированный доход, среднюю норму рентабельности, внутреннюю норму доходности, индекс доходности и сроки окупаемости инвестиций.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. На основании анализа факторов, влияющих на неравномерность графиков спроса на электропотребление в масштабах промышленных предприятий, было выявлено, что наиболее значимым параметром, оказывающим влияние на волатильность графиков электрических нагрузок, является график производственных процессов. Изменение графиков процессов производства отдельных энергоемких производственных объектов, действующих в составе предприятий, позволяет осуществлять ценозависимое управление электропотреблением,

что приводит к существенному снижению затрат на оплату стоимости покупаемой электроэнергии.

2. В результате исследования условий процессов производства промышленных предприятий было выявлено, что ценозависимое управление электропотреблением должно выполняться на уровне системы производственного планирования предприятий. В результате анализа действующих методов производственного планирования установлено, что в условиях развития цифровых технологий особое место занимают экономико-математические методы, среди которых выделен метод линейного программирования, позволяющий описывать управляемые производственные процессы с точки зрения получения требуемого эффекта;

3. В результате анализа трех вариантов применения метода линейного программирования в качестве инструмента производственного планирования по критериям стоимости электроэнергии, на базе параметров участка закалочных печей промышленного предприятия получены следующие результаты. При сохранении объема выполнения плана участком закалочных печей удалось снизить затраты на закупку электроэнергии: в 1-ю смену на 4,2 %, во 2-ю смену – на 24,2 % и в 3-ю смену – на 57,6 %, что позволяет подчеркнуть важность не только теоретических, но и практических результатов исследования.

ВЫВОДЫ

Применение экономико-математического метода линейного программирования в качестве инструмента производственного планирования по показателям стоимости электроэнергии позволяет гибко управлять стоимостью покупаемой электроэнергии отдельных энергоемких производственных объектов, существенно снижая затраты на закупку электроэнергии при сохранении плановых объемов выпускаемой продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Son J., Hara R., Kita H., Tanaka E. Energy management considering demand response resource in commercial building with chiller system and energy storage systems // *The 2nd IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE)*. 2014. P. 96–101.
2. Energy cloud 4.0. Capturing business value through disruptive energy platforms. Report of Navigation research. Chicago: Navigant Consulting Inc., 2018. 46 p. URL: navigantresearch.com/reports/energy-cloud-40.
3. Explicit Demand Response in Europe. Mapping the Markets 2017. Brussels: SEDC, 2017. 223 p. URL: smarten.eu/wp-content/uploads/2017/04/SEDC-Explicit-Demand-Response-in-Europe-Mapping-the-Markets-2017.pdf.
4. Digitalization & Energy. UK: International Energy Agency, 2017. 188 p. URL: iea.org/publications/freepublications/publication/DigitalizationandEnergy3.pdf.
5. Dranka G.G., Ferreira P. Review and assessment of the different categories of demand response potentials // *Energy*. 2019. Vol. 179. P. 280–294.
6. Takahashi M., Asano H. An Assessment Study of Energy Efficiency Policy Measures for Japanese Commercial Sector // *The Energy Journal*. 2011. Vol. 32. Special Issue 1. P. 243–260.
7. Wang J., Bloyd C.N., Huc Z., Tand Z. Demand response in China // *Energy*. 2010. Vol. 35. № 4. P. 1592–1597.
8. Посыпанко Н. Особенности национального demand response // *Энергорынок*. 2017. № 6. С. 10–13.
9. Ишкова Е., Кулешов М., Рычков С. Поведенческое управление спросом // *Энергорынок*. 2018. № 4. С. 14–23.
10. Посыпанко Н. Demand response в России: важнее, чем может показаться // *Энергорынок*. 2019. № 1. С. 16–19.
11. Гительман Л.Д., Ратников Б.Е., Кожевников М.В., Шевелев Ю.П. Управление спросом на энергию. Уникальная инновация для российской электроэнергетики. Екатеринбург: Экономика, 2013. 120 с.
12. Дзюба А.П., Соловьева И.А. Особенности управления спросом на энергоресурсы в России // *Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом*. 2018. № 11. С. 58–66.
13. Дзюба А.П., Соловьева И.А. Модель комплексного ценозависимого управления спросом промышленных предприятий на электроэнергию и газ // *Известия Уральского государственного экономического университета*. 2018. № 1. С. 79–93.
14. Баев И.А., Соловьева И.А., Дзюба А.П. Внедрение модели ценозависимого управления спросом на электропотребление в промышленности // *Управленец*. 2018. Т. 9. № 6. С. 111–121.
15. Трофимова В.Ш. Экономико-математическое моделирование и прогнозирование электропотребления промышленного предприятия (на примере ОАО «ММК») // *Экономика, статистика и информатика. Вестник УМО*. 2010. № 4. С. 109–114.
16. Забайкин Ю.В. Применение экономико-математических методов в производственном планировании // *KANT*. 2017. № 2. С. 140–147.
17. Канторович Л.В. Математические методы организации планирования производства. Л.: Ленинградский государственный университет, 1939. 67 с.
18. Чернов В.П. Модели операционного и производственного менеджмента. СПб.: СПбГЭУ, 2017. 249 с.
19. Кудашкин В.Н. Планирование и управление логистическим циклом тылового обеспечения // *Статистика и экономика*. 2017. № 1. С. 86–95.
20. Воскобойников Д.М. Эффективность применения дифференцированных тарифов для регулирования режимов электропотребления // *Промышленная энергетика*. 1987. № 1. С. 2–4.

REFERENCES

1. Son J., Hara R., Kita H., Tanaka E. Energy management considering demand response resource in commercial building with chiller system and energy storage systems. *The 2nd IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE)*, 2014, pp. 96–101.
2. *Energy cloud 4.0. Capturing business value through disruptive energy platforms. Report of Navigation research*. Chicago, Navigant Consulting Inc. Publ., 2018. 46 p. URL: navigantresearch.com/reports/energy-cloud-40.
3. *Explicit Demand Response in Europe. Mapping the Markets 2017*. Brussels, SEDC Publ., 2017. 223 p. URL: smarten.eu/wp-content/uploads/2017/04/SEDC-Explicit-Demand-Response-in-Europe-Mapping-the-Markets-2017.pdf.
4. *Digitalization & Energy*. UK, International Energy Agency Publ., 2017. 188 p. URL: iea.org/publications/freepublications/publication/DigitalizationandEnergy3.pdf.
5. Dranka G.G., Ferreira P. Review and assessment of the different categories of demand response potentials. *Energy*, 2019, vol. 179, pp. 280–294.
6. Takahashi M., Asano H. An Assessment Study of Energy Efficiency Policy Measures for Japanese Commercial Sector. *The Energy Journal*, 2011, vol. 32, special issue 1, pp. 243–260.
7. Wang J., Bloyd C.N., Huc Z., Tand Z. Demand response in China. *Energy*, 2010, vol. 35, no. 4, pp. 1592–1597.
8. Posypanko N. Peculiarities of national demand response. *Energorynok*, 2017, no. 6, pp. 10–13.
9. Ishkova E., Kuleshov M., Rychkov S. Behavioral demand response. *Energorynok*, 2018, no. 4, pp. 14–23.
10. Posypanko N. Demand response in Russia: more important than meets the eye. *Energorynok*, 2019, no. 1, pp. 16–19.
11. Gitelman L.D., Ratnikov B.E., Kozhevnikov M.V., Shevelev Yu.P. *Upravlenie sprosom na energiyu. Unikalnaya innovatsiya dlya rossiyskoy elektroenergetiki* [Management of energy demand. A unique innovation for the Russian electric power industry]. Ekaterinburg, Ekonomika Publ., 2013. 120 p.
12. Dzyuba A.P., Soloveva I.A. Some specific features of demand management for energy resources in Russia. *Problemy ekonomiki i upravleniya neftegazovym kompleksom*, 2018, no. 11, pp. 58–66.
13. Dzyuba A.P., Soloveva I.A. A model for comprehensive price-dependent management of industrial enterprises' demand for electricity and gas. *Izvestiya Uralskogo*

- gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta, 2018, no. 1, pp. 79–93.
14. Baev I.A., Soloveva I.A., Dzyuba A.P. Introducing a model for price-dependent management of industrial demand for energy resources. *Upravlenets*, 2018, vol. 9, no. 6, pp. 111–121.
 15. Trofimova V.Sh. Economic-mathematical modeling and forecasting of a power consumption of an industrial enterprise (on the Magnitogorsk iron and steel works open joint stock company (MMK) example). *Ekonomika, statistika i informatika. Vestnik UMO*, 2010, no. 4, pp. 109–114.
 16. Zabaykin Yu.V. The use of economic-mathematical methods in production planning. *KANT*, 2017, no. 2, pp. 140–147.
 17. Kantorovich L.V. *Matematicheskie metody organizatsii planirovaniya proizvodstva* [Mathematical methods of organizing manufacturing planning]. Leningrad, Leningradskiy gosudarstvennyy universitet Publ., 1939. 67 p.
 18. Chernov V.P. *Modeli operatsionnogo i proizvodstvennogo menedzhmenta* [The models of operative and manufacturing management]. Sankt Petersburg, SPbGEU Publ., 2017. 249 p.
 19. Kudashkin V.N. Planning and management of logistic cycle. *Statistika i ekonomika*, 2017, no. 1, pp. 86–95.
 20. Voskoboynikov D.M. The efficiency of application of differential tariffs for the energy consumption modes regulation. *Promyshlennaya energetika*, 1987, no. 1, pp. 2–4.

PRACTICAL APPLICATION OF THE LINEAR PROGRAMMING METHOD DURING PRICE-DEPENDENT CUSTOM LOAD MANAGEMENT

© 2019

A.P. Dzyuba, PhD (Economics),

senior researcher of Chair “Finance, Money Circulation and Credit” of the Higher School of Economics and Management
South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk (Russia)

Keywords: price-dependent custom load; demand side response; linear programming method; manufacturing planning; load curves; energy efficiency; energy tariffs; cost management of electric power procurement; commercial energy production.

Abstract: One of the important for global economy directions of energy efficiency improvement implemented in modern conditions is the development of the demand side response technologies. At the end-user level, the demand side response is carried out through the mechanism of price-dependent custom load management based on the change of operating schedule of manufacturing equipment functioning at the sites of industrial enterprises and large energy consumers. Management of load curves of individual energy-intensive production facilities should be carried out based on the application of manufacturing planning methods. The goal of the paper is to study the possibility of application of the linear programming methods to select optimal operating process schedule during price-dependent custom load management using the example of an existent industrial enterprise. The analysis of current manufacturing planning methods allowed identifying that, in the conditions of global industry digitalization, the economic and mathematical methods are essential. The most relevant of them is the linear programming method allowing considering flexible price-dependent custom load management.

The paper presents the results of the practical evaluation of manufacturing planning model developed by the author based on the linear programming method using the example of the quenching furnaces plant within an industrial enterprise. As the result of calculations, the author modeled the electrical energy cost at the basic scenario of work of the quenching furnaces plant when applying simulation model parameters to the variants of plant’s operation in the first, second or third shift. The results of calculation of the model’s parameters allowed identifying that while the quenching furnaces plant maintains the plan performance volumes, the cost of electric power procurement decreases as relating to the functioning of the plant according to the basic scenario: in the first shift – by 4.2 %, in the second shift – by 24.2 %, and in the third shift – by 57.6 %. This shows the importance of both theoretical and practical results of the study.