

На правах рукописи



Филимонова Александра Александровна

**МЕТОДЫ МНОГОУРОВНЕВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ
И УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Челябинск – 2016

Диссертационная работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» на кафедре «Автоматика и управление».

Научный руководитель – **Казаринов Лев Сергеевич**, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Никифоров Геннадий Васильевич**, доктор технических наук, профессор,
Председатель совета директоров Закрытого акционерного общества «Магнитогорскгазстрой», г. Магнитогорск;

Зацепин Евгений Петрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электрооборудования Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Защита состоится 10 февраля 2017 г., в 10:00 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.298.05 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» по адресу: 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76, ауд. 1007.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» и на сайте ЮУрГУ по адресу: <https://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229805/filimonova-aleksandra-aleksandrovna>.

Автореферат разослан «__» декабря 2016 г.

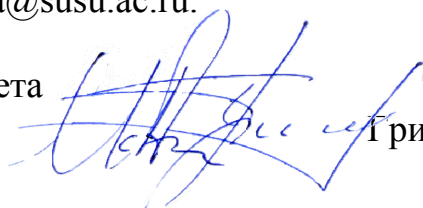
Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим выслать по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», Ученый совет, тел./факс: +7 (351) 267-91-23.

E-mail: grigorevma@susu.ac.ru.

Ученый секретарь

диссертационного совета

д-р техн. наук, доцент



Григорьев Максим Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Основным направлением хозяйственной политики на промышленных предприятиях РФ в настоящее время является энергосбережение и повышение эффективности использования энергии. Существенный вклад в развитии работ по данному направлению внесли как отечественные, так и зарубежные исследователи: Анчарова, Т.В., Бэнн Д.В., Вагин Г.Я., Гордеев В.И., Гофман И.В., Заславец Б.И., Копцев Л.А., Кудрин Б.И., Лисиенко В.Г., Литвак В.В., Лоскутов А.Б., Макоклюев Б.И., Манусов В.З., Надтока И.И., Никифоров Г.В., Олейников В.К., Поляхов Н.Д., Праховник А.В., Розен В.П., Фармер Е.Д., Хохлов Ю.И., Andersen F.M., Ashok S., Espasa, A., Hyndman R.J., Larsen H.V., Lin C.W., Moodie C.L., Taylor J.W., Weron R. и др.

Несмотря на большое количество работ, посвященных снижению энергетических затрат на промышленных предприятиях, системный эффект энергосбережения на многих предприятиях РФ еще не получен. Одной из причин является отсутствие должного учета влияния многоуровневой организационной структуры предприятия на принятие решений по планированию и управлению энергопотреблением технологических процессов.

Общие вопросы принятия решений в сложных многоуровневых системах рассмотрены в работах Мако Д., Месаровича М., Мишина С.П., Новикова Д.А., Такахара И., Цвиркуна А.Д. и др.

Применение методологии принятия решений в сложных многоуровневых системах является перспективным направлением исследований, так как системный эффект энергосбережения может быть получен лишь на основе введения целостной системы планирования и управления энергопотреблением, охватывающей все уровни предприятия. Особую актуальность вопрос многоуровневого подхода получил в настоящее время в связи с необходимостью введения предприятиями почасового планирования электропотребления. Решение данной задачи для крупных предприятий является затруднительным вследствие необходимости учета технологических взаимосвязей между отдельными цехами и производствами, четкого выполнения контактного графика работ. В настоящее время данная задача для крупных предприятий в многоуровневой постановке пока еще не решена.

Предлагаемая диссертационная работа посвящена исследованию указанной задачи применительно к электропотреблению металлургических предприятий, что определяет ее актуальность.

Актуальность рассматриваемых вопросов указана в Федеральном законе от 23.11.2009 г. №261 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты

Российской Федерации» и других нормативно-правовых актах в сфере энергосбережения.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности многоуровневого планирования и управления электропотреблением технологических процессов металлургического предприятия с учетом почасового планирования работ, сокращение затрат на электрическую энергию как на уровне отдельных подразделений, так и предприятия в целом.

В работе решаются следующие задачи:

1. Провести анализ задач и проблем планирования и управления электропотреблением технологических процессов металлургического производства, определяющих качество принимаемых решений в многоуровневой структуре предприятия с учетом введения почасового планирования.

2. Разработать метод разрешения межуровневых противоречий при принятии решений на основе введения агрегированных показателей динамики потребления электрической энергии, позволяющих согласовать детализованные представления динамики потребления электрической энергии на локальных уровнях отдельных технологических процессов с учетом почасового планирования и обобщенные представления на верхнем уровне.

3. Разработать метод многоуровневого прогнозирования электропотребления, основанный на оптимальном построении энергетических характеристик технологических процессов с заданной точностью по критерию минимума технико-экономических потерь при управлении.

4. Разработать методику почасового нормирования и прогнозирования динамики электропотребления для сложных технологических процессов на уровне подразделений.

5. Разработать алгоритмическое и программное обеспечение, обеспечивающее прогноз потребления электроэнергии при заданных плановых значениях выпуска продукции и установленных значениях базовых технологических факторов.

6. Внедрить разработанные методы прогнозирования потребления электроэнергии в практику управления технологическими процессами металлургического производства ОАО «ММК».

Объектом исследования являются процессы электропотребления энергоемких технологий в металлургии.

Предметом исследования являются методы управления электропотреблением технологических процессов в металлургии.

Методы исследования. Для решения задач, поставленных в диссертационной работе, использовались: основные положения

теоретических основ электротехники, методы математической статистики, теории автоматического управления, оперативного управления в электроэнергетических системах.

Научные положения, выносимые на защиту, и их научная новизна

1. Предложен новый метод многоуровневого прогнозирования электропотребления, учитывающий несогласованность агрегированных представлений динамики потребления электроэнергии на верхнем уровне и высокую степень детализации представления динамики электропотребления на нижних уровнях при почасовом планировании, на основе которого повышается точность прогноза электропотребления для сложных технологических процессов и производств.

2. Разработана методика почасового нормирования и прогнозирования электропотребления для сложных производственных комплексов, основанная на решении задачи минимизации производственных расходов с учетом интегральной оценки эффективности графиков электропотребления на уровне подразделений.

3. Разработан метод разрешения межуровневых противоречий при планировании и управлении электропотреблением технологических процессов в многоуровневой структуре предприятия на основе введения нового агрегированного показателя – индекса снижения стоимости потребления электроэнергии, обеспечивающий объективный контроль и управление качеством локального планирования графиков электропотребления на производственных участках.

Практическая ценность.

1. Разработанное методическое и программное обеспечение позволяет осуществлять прогноз потребления электрической энергии при заданных плановых значениях выпуска продукции и установленных значениях базовых технологических факторов, определять величину перерасхода потребления энергии и причин, ее обуславливающих, оценить резервы снижения потребления электроэнергии.

2. Разработанная процедура почасового нормирования и прогнозирования электропотребления, основанная на интегральной оценке оптимальности графиков электропотребления, позволяет организовать централизованный контроль, планирование и прогнозирование качества локальных графиков электропотребления для производственных участков.

3. Использование разработанных алгоритмов позволяет сократить ошибку прогнозирования потребления электроэнергии как на локальном уровне отдельных производственных участков, так и уровне предприятия в целом.

Реализация работы

Разработанное методическое и программное обеспечение используется в Технологическом управлении ОАО «ММК» при решении задач

нормирования и управления электропотреблением промышленной площадки ОАО «ММК».

Внедрение результатов диссертационной работы подтверждено соответствующим актом. Технологический эффект внедрения на ОАО «ММК» состоит в снижении общей ошибки прогнозирования потребления электроэнергии предприятием в целом на величину не менее 0,5%. Повышение точности прогноза при почасовом планировании на уровне отдельных подразделений за 2014 год составило 8,2%.

Апробация работы.

Материалы диссертационной работы докладывались на конференциях: Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг», Челябинск, 2016 г., Международной конференции «Устойчивое энергетическое развитие в энергетике и строительстве 2015» (Sustainability in Energy and Buildings, SEB-15), Португалия, г. Лиссабон, 2015 г., 17-й международной конференции по энергетическому менеджменту (17th International Conference on Energy Management), Италия, г. Рим, 2015 г., 66-ой научной конференции «Наука ЮУрГУ»: Секции технических наук, Челябинск, 2014 г., Международной научно-практической конференции «Роль технических наук в развитии общества», Уфа, 2014 г., XXXVIII международной научно-практической конференции «Инновации в науке», Новосибирск, 2014 г., Международной научно-практической конференция «Научные исследования: от теории к практике», Чебоксары, 2014 г., XXXII Всероссийской конференции по проблемам науки и технологий «Наука и технологии», Миасс, 2012 г., 7-ой международной научно-практической конференции «Бъдещето въпроси от света на науката», София, 2011 г.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 20 работ, в том числе 7 статей в журналах, рекомендованных ВАК, 3 статьи – в базе SCOPUS.

Структура и объем работы. Диссертация содержит введение, четыре главы, общие выводы, список литературы, включающий 145 наименований, одно приложение. Диссертация изложена на 154 страницах и содержит 29 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Управление электропотреблением на металлургическом предприятии целесообразно осуществлять на основе системного подхода с использованием современных информационных технологий. В общем случае управление электропотреблением носит многоуровневый характер.

Обобщенная схема многоуровневой структуры управления электропотреблением металлургического предприятия, включающая в себя

верхний технико-экономический уровень и нижний уровень подразделений приведена на рисунке 1.

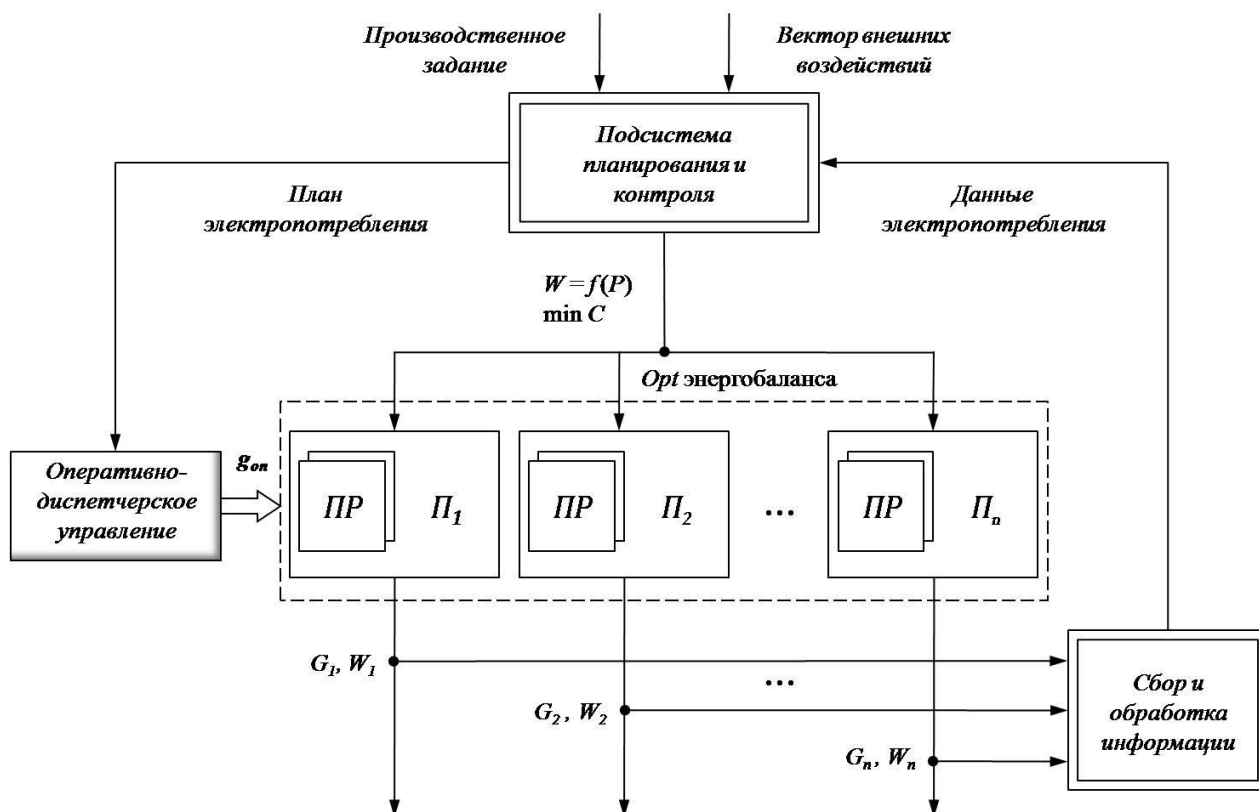


Рис.1. Обобщенная схема управления электропотреблением металлургического предприятия

На рис. 1: PP – потребители-регуляторы электропотребления; P_i – прочие потребители энергоресурсов; P – плановое количество продукции; $g_{оп}$ – оперативное управление работой потребителей-регуляторов электропотребления; G_1, G_2, G_n – фактический график электропотребления соответствующего подразделения; W_1, W_2, W_n – величина электропотребления соответствующего подразделения.

Здесь технико-экономический уровень представлен подсистемой планирования и контроля предприятия в целом. На основе информации о производственных заданиях в подсистеме планирования и контроля осуществляется выбор оптимального распределения ресурсов между подразделениями предприятия. При этом учитываются внешние возмущающие воздействия. Назначение обоснованных плановых заданий по объемам электропотребления и энергоемкости, оценка их выполнения осуществляются исходя из объективного анализа возможностей технологического оборудования и особенностей его функционирования в существующих производственных условиях.

На уровне подразделений решаются локальные задачи управления электропотреблением. Считается, что лицо, принимающее решение на уровне подразделения, получив определенную нормированную величину ресурсов, должно стремиться минимизировать затраты на нужды электропотребления на локальном уровне.

Оперативно-диспетчерское управление осуществляется с использованием специальных потребителей-регуляторов, заданием электропотребления которых можно добиться управления электропотреблением всего предприятия в заданных пределах.

Одним из основных элементов системы управления электропотреблением технологического процесса является подсистема сбора и обработки информации о текущем потреблении энергетических ресурсов. На основе технических отчетов и данных из подсистемы сбора и обработки информации формируется информационная база данных об эффективности использования электроэнергии за отчетный период. С использованием полученной базы данных в подсистеме планирования и контроля осуществляется текущий контроль эффективности использования энергетических ресурсов подразделениями. При этом также используются данные расчетно-нормативной базы.

В целом система управления электропотреблением должна осуществлять оптимизацию производства по показателям энергоемкости. При этом принятие решений по планированию и управлению электропотреблением технологических процессов в многоуровневой структуре предприятия характеризуется межуровневыми противоречиями, среди которых необходимо выделить:

- несогласованность агрегированных представлений динамики потребления ресурсов на верхнем уровне и высокой степени детализации представления динамики на нижних уровнях;
- несогласованность между общими оценками объемов потребления электроэнергии предприятия и суммарными локальными оценками объемов потребления электроэнергии на уровне отдельных технологических процессов.

Разрешение данных противоречий является необходимым условием достижения системного эффекта повышения энергетической эффективности и прогресса в данном направлении.

Краткосрочное планирование электропотребления на уровне подразделений

Почасовое планирование электропотребления дает технико-экономический эффект на основе следующих факторов:

- 1) более точного контроля потребления электрической энергии, которое позволит выявить места и временные интервалы повышенного

использования электрической энергии и оценить резервы снижения объемов потребления электрической энергии;

2) снижения затрат на приобретение электрической энергии вследствие переноса электропотребления в более льготный ценовой диапазон.

Исходным пунктом почасового расчета и прогнозирования электропотребления является расписание производственных циклов. Примерная форма расписания производственных циклов представлена на рис. 2.

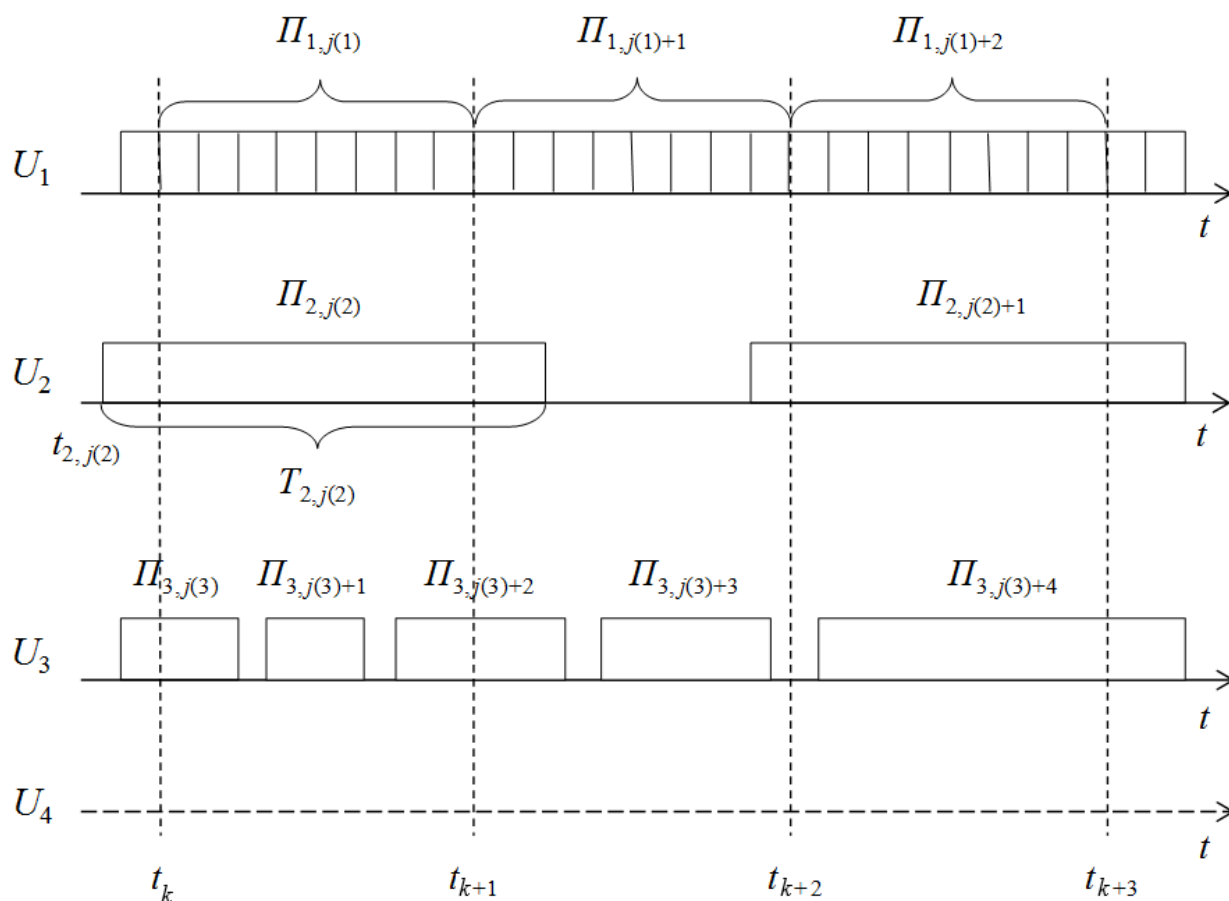


Рис. 2. Примерная форма расписания производственных циклов

На рис. 2 U_1, \dots, U_4 – номера производственных участков - потребителей электрической энергии; Π_{ij} – производственный цикл (i, j) имеет свое плановое задание выпуска продукции (i – группы агрегатов, j – индекс соответствующего цикла).

Работа каждого участка планируется по расписанию, где соответствующие производственные циклы упорядочены по времени.

Каждый производственный цикл (i, j) имеет свое плановое задание выпуска продукции Π_{ij} (i – группы агрегатов, j – индекс соответствующего цикла) и может быть разбит на временные интервалы k , продолжительность которых определяется технологией процесса.

Электроэнергия в кВт·ч, потребленная оборудованием за k -й интервал при производстве продукции n определяется соотношением:

$$W_{kin} = \sum_{k=1}^K P_{kin} \cdot I_{kin} \cdot t, \quad (1)$$

где P_{kin} – электрическая мощность оборудования i за интервал k при производстве продукции; I_{kin} – переменная, такая что: $I_{kin} = 1$ – в случае, когда оборудование начало цикл производства во временном интервале k , $I_{kin} = 0$ – в другом случае; t – временной промежуток, ч.

Соотношение (1) представляет собой укрупненную формулу и рассчитывается по отдельным статьям расходов в соответствии с принятой учетной политикой на предприятии.

Процедура планирования почасовых расписаний потребления электроэнергии

Целью стратегии управления электропотреблением является минимизация общих эксплуатационных расходов, которые включают в себя затраты на потребленную энергию (постоянный или почасовой тариф), затраты на зарегистрированную пиковую нагрузку, и добавочные эксплуатационные расходы в связи со смещением нагрузок, если таковые имеются.

Целевая функция минимизации месячных производственных расходов:

$$\left(\min \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N ((W_{kin} \cdot C_k) + (C_{add} \cdot I_{add}) \cdot t) \right) \cdot d + C_M \cdot M, \quad (2)$$

с учетом особенностей производства, ограничений по оборудованию, где I – агрегаты (группа агрегатов);

N – общее число видов производимой продукции

W_{kin} – электроэнергия в кВт·ч, потребленная оборудованием i за k -й временной интервал при производстве продукции n ;

C_k – стоимость электроэнергии за 1 кВт·ч в интервале времени k ;

C_{add} – добавочная стоимость, связанная с деятельностью по управлению электропотреблением на интервале k . К добавочной стоимости можно отнести дополнительные затраты на оплату труда рабочих, возникшие в связи с изменением графика загрузки оборудования, капитальную стоимость дополнительных установок, если таковые имеются, или другую добавочную стоимость для включения в программу управления электропотреблением отражаются в величине C_{add} .

I_{add} – переменная, такая что: $I_{add} = 1$ – при осуществлении действий по управлению электропотреблением, $I_{add} = 0$ – в другом случае.

d – число рабочих дней в месяце;

C_M – стоимость пикового потребления за месяц;

M – заявленное пиковое потребление электроэнергии предприятием.

Эффективно спланированный график электропотребления при почасовом тарифе снижает стоимость покупки электроэнергии по сравнению с базовым графиком. Оценка качества планирования графиков электропотребления осуществляется на основе индекса снижения стоимости.

Результатом решения задачи минимизации производственных расходов (2) является оптимальная характеристика при данном объеме выпуска продукции в условиях почасового тарифа на оплату электроэнергии.

С целью планирования экономической эффективности почасовых расписаний потребления электрической энергии для производственных циклов дополнительно вводится новый интегральный показатель – индекс снижения стоимости потребления электроэнергии $I_{сн}$.

Логика введения данного показателя следующая.

Значение индекса равновесных цен на продажу электроэнергии на оптовом рынке делится на постоянную часть и переменную часть, которая изменяется по часам в течение суток:

$$\Pi_{\text{э}}(t_k) = \Pi_{\text{э}0} + \Delta\Pi_{\text{э}}(t_k), \quad (3)$$

где $\Pi_{\text{э}0}$ – постоянная часть; $\Delta\Pi_{\text{э}}(t)$ – переменная часть; k – индекс часовых интервалов.

В этом случае стоимость покупки электроэнергии по суткам можно разделить на две части:

$$C_{\text{э}}(t_k) = C_{\text{э}0} + \Delta C_{\text{э}}(t_k), \quad (4)$$

где $C_{\text{э}0}$ – постоянная часть стоимости

$$C_{\text{э}0} = W_{\text{э}}\Pi_{\text{э}0}, \quad (5)$$

$\Delta C_{\text{э}}(t_k)$ – переменная часть стоимости

$$\Delta C_{\text{э}}(t_k) = P(t_k)\Delta\Pi_{\text{э}}(t_k). \quad (6)$$

Здесь $W_{\text{э}}$ – потребление электроэнергии за определенный период времени; $P(t_k)$ – объем потребления электрической энергии за 1 час (МВт·ч для k -го интервала потребления).

Переменная часть стоимости покупки электроэнергии существенно зависит от графика электропотребления. Оптимальный график электропотребления должен минимизировать переменную часть покупки электроэнергии. Для оценки степени оптимальности графика электропотребления в работе используется индекс снижения стоимости потребления электроэнергии $I_{сн}$, определяемый по соотношению:

$$I_{сн} = \frac{\sum_k p(t_k) u_{\vartheta}(t_k)}{\sum_k p_{\bar{o}}(t_k) u_{\vartheta}(t_k)}, \quad (7)$$

где $p(t_k)$, $p_{\bar{o}}(t_k)$, $u_{\vartheta}(t_k)$ определяются по формулам (8)-(10):

$$p(t_k) = \frac{P(t_k)}{\sum_k P(t_k)}, \quad (8)$$

$$p_{\bar{o}}(t_k) = \frac{P_{\bar{o}}(t_k)}{\sum_k P_{\bar{o}}(t_k)}, \quad (9)$$

$$u_{\vartheta}(t_k) = \frac{\Delta\Pi_{\vartheta}(t_k)}{\sum_k \Delta\Pi_{\vartheta}(t_k)}, \quad (10)$$

где $\{P(t_k)\}$ – текущий график электропотребления; $\{P_{\bar{o}}(t_k)\}$ – базовый график электропотребления.

Базовый график электропотребления вводится в качестве пункта отсчета эффективности текущего графика электропотребления. Если текущий график совпадает с базовым графиком, то значение индекса $I_{сн} = 1$. Если текущий график электропотребления снижает стоимость покупки электроэнергии по сравнению с базовым графиком, то $I_{сн} < 1$. Чем меньше величина индекса $I_{сн}$, тем более эффективным является текущий график электропотребления. Безусловный оптимум достигается при равенстве индекса $I_{сн}$ нулю. В этом случае переменная стоимость покупки электроэнергии равняется нулю. И наоборот, если значение индекса $I_{сн}$ больше 1, то текущий график электропотребления хуже базового графика. Чем выше величина индекса $I_{сн}$, тем выше будет переменная стоимость покупки электроэнергии.

Таким образом, введение нового показателя – индекса снижения стоимости потребления электроэнергии $I_{сн}$, позволяет интегрально оценивать оптимальность графиков электропотребления. Тем самым можно организовать централизованный контроль, планирование и прогнозирование качества локальных графиков электропотребления для производственных участков. Данный показатель является объективным и зависит только от качества составленных графиков электропотребления и в определенной мере не зависит от объемов потребления электроэнергии и уровня цен на электроэнергию. Поэтому на основе данного показателя можно оценивать локальное качество работы отдельных производственных участков. Тем самым обеспечивается объективный контроль и управление качеством локального планирования графиков электропотребления на производственных участках.

Многоуровневое планирование электропотребления металлургического предприятия

Многоуровневая расчетная схема планирования электропотребления металлургического предприятия представлена на рисунке 3.

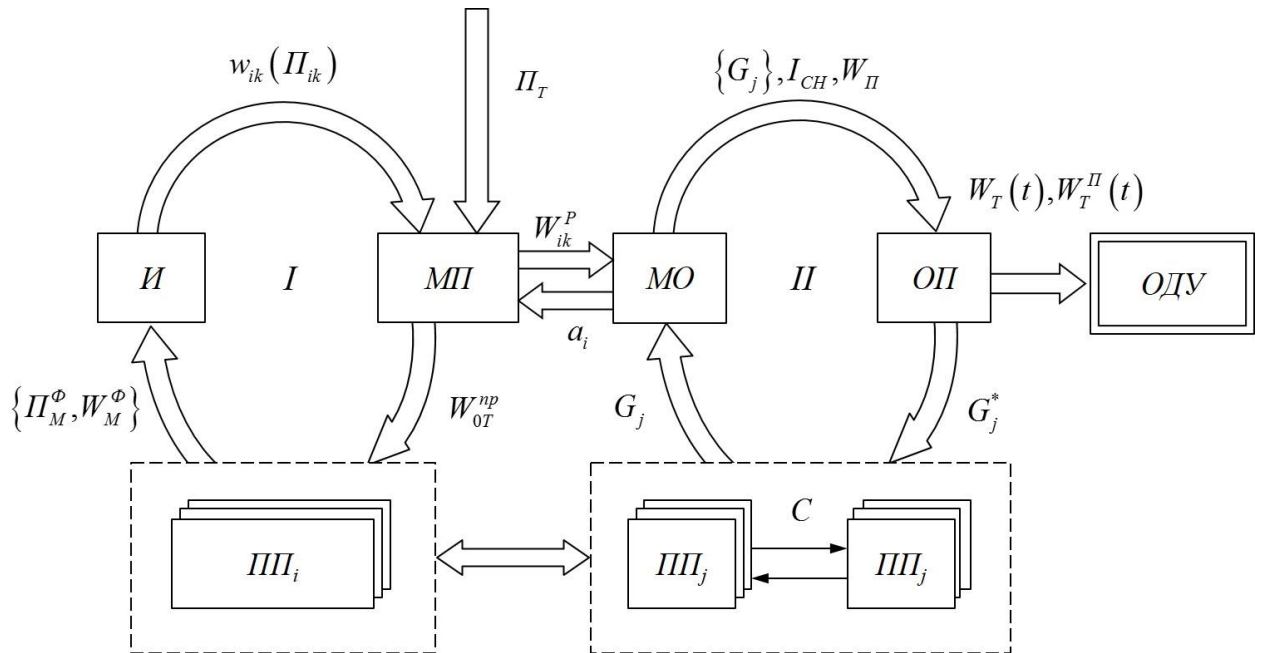


Рис. 3. Многоуровневая расчетная схема планирования электропотребления

На рис. 3: *I* – месячное планирование электропотребления; *II* – почасовое планирование электропотребления; *ПП_i* – производственные подразделения; $Π_T$ – плановый объем производства; блок *И* – блок идентификации характеристик, определяющих величину электропотребления подразделения на основе фактических данных месячных объемов производства $Π_M^ϕ$ и месячного потребления электрической энергии подразделением $W_M^ϕ$; $w_k(Π_k)$ – функциональная зависимость удельного электропотребления от объемов производства за *k*-й интервал времени; *МП* – месячное прогнозирование электропотребления; W_{OT}^{np} – требуемая величина месячного электропотребления; W_{ik}^P – расчетное месячное электропотребление; a_i – корректирующие коэффициенты; *МО* – модуль оценки; G_j – график работы подразделения; I_{CH} – индекс снижения стоимости электропотребления; W_{II} – общая пиковая нагрузка; G_j^* – скорректированный график работы подразделения с учетом смещения нагрузок; *ОП* – оперативное планирование; *С* – согласование графиков работы подразделений; *ОДУ* – оперативно-диспетчерское управление;

$W_T(t)$ – требуемая величина электропотребления; $W_T^{\Pi}(t)$ – ограничение на пиковое электропотребление.

В многоуровневой постановке задачи планирования электропотребления металлургического предприятия можно выделить две ступени планирования: месячное планирование (I) и почасовое планирование (II).

На основе информации, поступающей от производственных подразделений, о фактических данных месячных объемов производства Π_M^{Φ} и месячного потребления электрической энергии W_M^{Φ} в блоке идентификации (I) определяются характеристики удельного электропотребления как функции от объемов производства:

$$w_{ik} = \frac{W_{ik}}{\Pi_{ik}} = f(\Pi_{ik}), \quad (11)$$

где w_{ik} – удельный расход электроэнергии i -го производственного подразделения предприятия за k -й интервал времени, кВт·ч/единица продукции;

W_{ik} – расход электроэнергии i -го производственного подразделения предприятия за k -й интервал времени, кВт·ч;

Π_{ik} – количество продукции, произведенной i -м производственным подразделением за k -й интервал времени.

Анализ фактических отчетных данных об объемах производства и соответствующих им удельных расходах электроэнергии, проведенный Центром энергосберегающих технологий ОАО «ММК», показал, что в условиях металлургического производства реальный характер взаимосвязи объемов производства и удельных расходов электроэнергии может быть представлен с приемлемой точностью экспоненциальной зависимостью:

$$w_{ik} = A_i \exp\left(\sum_l d_l^i \Pi_{ik}^l\right), \quad (12)$$

где A_i, d_i – коэффициенты зависимости (11).

Расчетные частные расходы электроэнергии i -х производственных подразделений W_{ik}^P определяются для каждого k -го момента времени в виде:

$$W_{ik}^P = w_{ik} \Pi_{ik}.$$

На основе информации о плановых объемах производства и полученных характеристик осуществляется прогноз месячного электропотребления подразделением. Полученная расчетная величина W_{ik}^P направляется в модуль оценки (MO).

Расчетный суммарный расход электроэнергии i -х производственных подразделений для k -го момента времени W_{0k}^P определяется по соотношению:

$$W_{0k}^p = \sum_{i=1}^{Np} W_{ik}^p. \quad (13)$$

Решение задачи минимизации общей ошибки прогноза потребления электроэнергии предприятием в целом основано на невязке значений фактического общего потребления электроэнергии предприятием W_{0k}^ϕ , определяемого по показаниям прибора учета, и расчетного суммарного расхода электроэнергии. Невязка значений потребления электроэнергии определяется наличием потерь энергии, возможной недостоверностью предоставляемых данных, неполнотой информации.

Минимизация указанной выше невязки значений осуществляется на основе коррекции суммарного расхода электроэнергии W_{0k}^p .

В этом случае прогнозное значение потребления электроэнергии предприятием в целом для каждого k -го момента времени определяется по соотношению:

$$W_{0k}^{np} = \sum_{i=0}^{Np} a_i W_{ik}^p, \quad (14)$$

где $W_{ik}^p \equiv 1$ при $i = 0$;

a_i – корректирующие коэффициенты.

Корректирующие коэффициенты a_i определяются методом наименьших квадратов.

Постановка задачи прогнозирования может быть некорректной. Применение регуляризации позволяет решать задачу при неполной статистике.

Общий квадратичный критерий имеет вид:

$$Q_E = (1 - \alpha) E_0^2 + \alpha \sum_{i=0}^{Np} (a_i - a_i^h)^2 \rightarrow \min, \quad (15)$$

где E_0^2 – общая ошибка, определяемая по соотношению

$$E_0^2 = M_t \left\{ \left(W_{0k}^\phi - \sum_{i=0}^{Np} a_i W_{ik}^p \right)^2 \right\}, \quad (16)$$

$M_t \{ \cdot \}$ – оператор усреднения по времени;

a_i^h – номинальные значения корректирующих коэффициентов:

$$a_0^h = 0; \quad a_i^h = 1, \quad i \in [1; N_p],$$

$\alpha \in [0; 1]$ – регуляризующий множитель.

Решение задачи (15) сводится к решению следующей системы линейных алгебраических уравнений:

$$(1 - \alpha) \sum_{j=0}^{N_p} c_{ij} a_j + \alpha a_i = (1 - \alpha) d_i + \alpha a_i^h, \quad i \in [0; N_p], \quad (17)$$

где

$$c_{ij} = M_i \{W_{ik}^p W_{jk}^p\},$$

$$d_i = M_i \{W_{0k}^p W_{ik}^p\}.$$

Далее на основе вычисленных коэффициентов a_i определяется прогнозное значение общего расхода электроэнергии в терминальной точке прогноза:

$$W_{0T}^{np} = \sum_{i=0}^{N_p} a_i W_{iT}^p, \quad (18)$$

где W_{iT}^p – расчетное значение расхода электроэнергии для выпуска i -й продукции.

Полученные в *МО* корректирующие коэффициенты направляются обратно в подсистему месячного планирования. Прогнозные объемы месячного электропотребления задаются подразделениям как требуемые величины.

Согласованные подразделениями графики работы передаются в *МО*. Здесь осуществляется интегральная оценка качества графиков работы подразделений на основе введенного показателя – индекса снижения стоимости потребления электроэнергии $I_{сн}$.

Информация о пиковой величине электропотребления, графиках работы подразделений, их качестве поступают в блок оперативного планирования (*ОП*). Задача оперативного планирования в целом решается неформально на основе опыта лиц, принимающих решения (*ЛПР*). Скорректированный график направляется в подразделения для согласования работ. Требуемые величины электропотребления и пикового электропотребления задаются подсистеме оперативно-диспетчерского управления (*ОДУ*).

Исследование применения методики планирования электропотребления на реальных данных

Апробация предложенной методики проводилась на основе данных почасового потребления электрической энергии агрегатами электросталеплавильного цеха металлургического предприятия 1-й ценовой зоны в период за сентябрь 2014 г., а также с учетом индекса равновесных цен на продажу электроэнергии в соответствии с данными компании ОАО «АТЭС».

Текущий график загрузки оборудования электросталеплавильного цеха представлен на рис. 4.

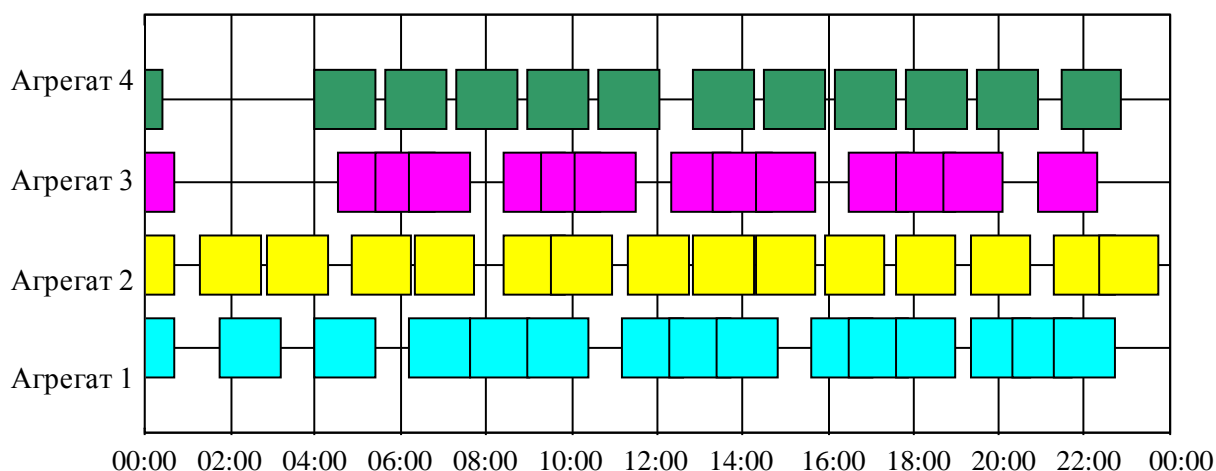


Рис. 4. Почасовой график загрузки оборудования электросталеплавильного цеха металлургического предприятия 1-й ценовой зоны

При построении оптимального графика почасовой загрузки оборудования была соблюдена технология процесса, в том числе требование по величине перерывов в работе оборудования.

Почасовой график загрузки оборудования электросталеплавильного цеха, построенный путем решения задачи минимизации месячных производственных расходов (2) представлен на рис. 5. Полученный почасовой график позволяет снизить затраты на потребление электрической энергии при осуществлении выпуска продукции и других необходимых операции.

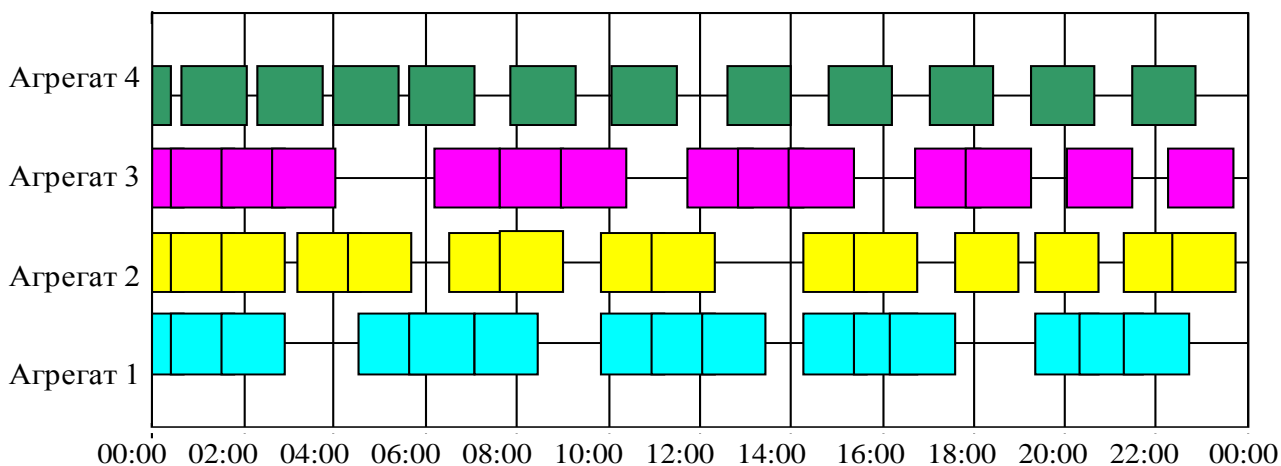


Рис. 5. Оптимальный почасовой график загрузки оборудования электросталеплавильного цеха металлургического предприятия 1-й ценовой зоны

Оценка степени эффективности графиков электропотребления осуществляется на основе индекса снижения стоимости потребления электроэнергии $I_{сн}$.

На рис. 6 представлено сравнение динамики изменения индекса снижения стоимости потребления электроэнергии во времени для рассматриваемых вариантов первоначального графика и оптимального почасового графика загрузки оборудования.

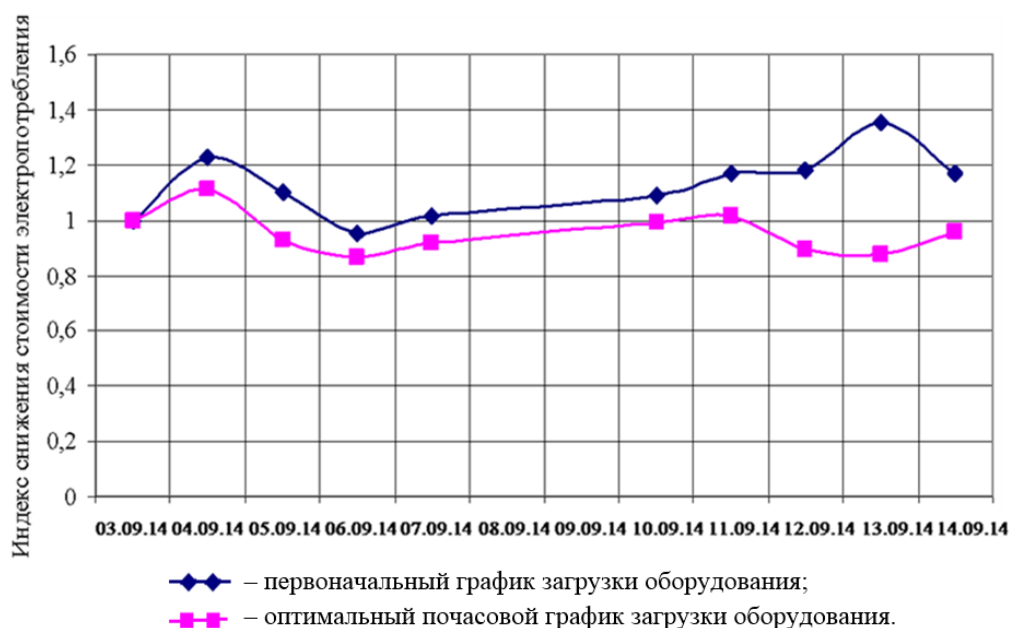


Рис. 6. Сравнение динамики изменения индекса снижения стоимости во времени для первоначального графика и оптимального почасового графика загрузки оборудования

Как видно из рис. 6, значение индекса снижения стоимости электропотребления $I_{сн}$ для оптимального почасового графика загрузки оборудования уменьшилось по сравнению с первоначальным вариантом. Таким образом, изменение расписания работ оборудования электросталеплавильного цеха позволило повысить эффективность графиков электропотребления.

Программное обеспечение нормирования и оптимального прогноза объёмов потребления электрической энергии

В рамках работы разработано алгоритмическое и программное обеспечение нормирования и оптимального прогноза объёмов потребления электрической энергии подразделениями ОАО «ММК» и комбинатом в целом.

Разработанное программное обеспечение обеспечивает выполнение следующих функций:

- прогноз потребления электроэнергии при заданных плановых значениях выпуска продукции и установленных значениях базовых технологических факторов;
- определение величин перерасхода потребления энергии и причин, их обуславливающих;

- определение текущих показателей энергоемкости подразделений и резервов снижения потребления электроэнергии.

Окно работы программы представлено на рисунке 7.

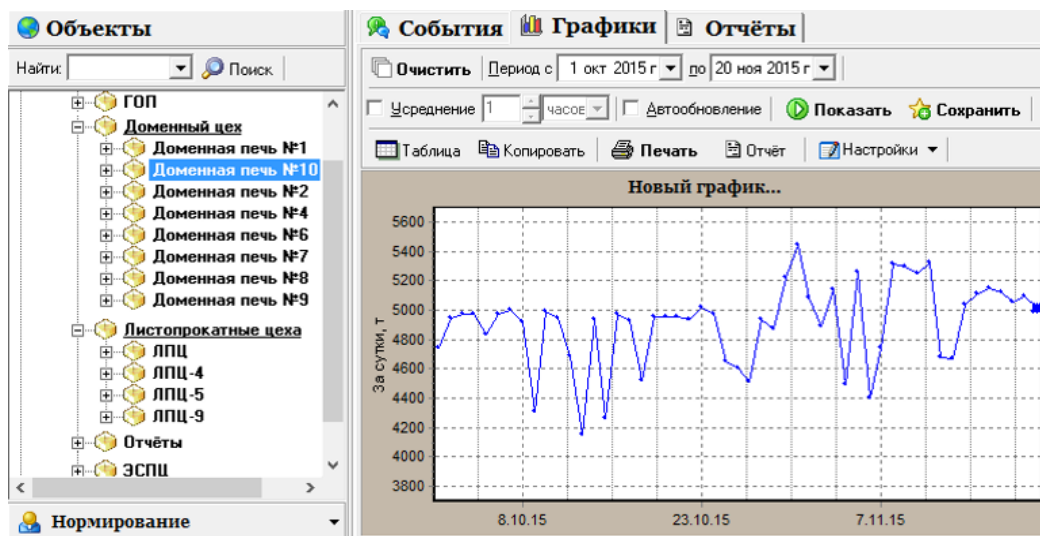


Рис. 7. Окно работы программы

В программе представлены следующие опции:

- анализ потребления электрической энергии;
- ведение информационной базы отчетов и их просмотр (см. рис. 8).

Отчет о потреблении электроэнергии									
Год	Цех	Объем произ-водства план	Объем произ-водства факт	Расход эл. энергии план.	Расход эл. энергии факт.	Удельный расход план	Удельный расход факт	Перерасход электроэнергии	Уд. перерасход, %
2014	ГОП		10282745,0		522727400,0		5083,539		
	ДЦ	9519900,0	9520386,0	79809616,0	79658459,0	838,3	836,715	-155231,357	-0,002
	ИДП		838274,0		117436218,0		14009,288		
	КМП		133697950,0		1550060782,0		1159,375		
	ККЦ		860028,0		35202228,0		4083,149		
	КХП		5354100,0	24162389,6	282569167,0		5277,622		
	ПВЭС		809662720,0		111932514,0		13,825		
	ТЭЦ	2515080100,0	2515081000,0	266802540,1	280321755,0	11,4	11,543	3719112,342	0,013
	ЦВС		153489,0	33862874,5	34701450,0		22608,428		
	Цех г.п.		5453816,0		436020425,0		7994,777		
	Цех х.п.		2299613,0		197100414,0		8571,025		
	Цех х.п.		361298,0		34400655,0		9521,408		
	ЦЭС		1741494110,0	12700798,0	164918749,0		9,470		
ЭСПЦ		3184425,0		1001507471,0		31450,182			

Рис. 8. Пример отчета о потреблении электроэнергии

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Принятие решений по планированию и управлению электропотреблением технологических процессов металлургического производства в структуре предприятия характеризуется межуровневыми противоречиями, среди которых необходимо выделить:

– несогласованность агрегированных представлений динамики потребления электрической энергии на верхнем уровне и высокой степенью детализации представления динамики электропотребления на нижних уровнях;

– несогласованность между общими оценками объемов потребления электроэнергии предприятия и суммарными локальными оценками объемов потребления электроэнергии на уровне отдельных технологических процессов.

2. В работе в целях разрешения межуровневых противоречий при принятии решений введен агрегированный показатель динамики электропотребления – индекс снижения стоимости, позволяющий согласовать детализованные представления динамики процессов потребления электроэнергии на локальных уровнях отдельных технологических процессов и обобщенные представления на верхнем уровне. Предложенный показатель позволяет интегрально оценивать оптимальность графиков электропотребления, а, значит, локальное качество работы отдельных производственных участков.

3. Разработана процедура прогнозирования потребления электроэнергии в целом на предприятии исходя из потребления электроэнергии на локальных производственных участках при наличии потерь энергии, недостоверности и неполноте предоставляемых данных.

4. В целях минимизации производственных расходов в условиях почасового тарифа на оплату электроэнергии в работе предложена методика краткосрочного нормирования и прогнозирования потребления электрической энергии, основанная на интегральной оценке оптимальности графиков электропотребления.

5. Разработано алгоритмическое и программное обеспечение, обеспечивающее прогноз потребления энергетических ресурсов при заданных плановых значениях выпуска продукции и установленных значениях базовых технологических факторов.

6. Разработанное методическое и программное обеспечение используется при решении задач планирования и контроля электропотребления промышленной площадки ОАО «ММК».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

1. Казаринов, Л.С. Метод прогнозирования электропотребления промышленного предприятия / Л.С. Казаринов, Т.А. Барбасова, О.В. Колесникова, А.А. Захарова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2014. – том 14, №1. – С. 5–13.

2. Казаринов, Л.С. Метод прогнозирующего управления энергетической эффективностью промышленного предприятия / Л.С. Казаринов, Т.А. Барбасова, **А.А. Захарова** // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2013. – №2. – С. 12–24.

3. Казаринов, Л.С. Оптимальное прогнозирование потребления энергетических ресурсов по стоимостному критерию / Л.С. Казаринов, Т.А. Барбасова, **А.А. Захарова** // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2013. – том 13, №1. – С. 90–94.

4. Барбасова, Т.А. Автоматизированная система энергетического менеджмента промышленного предприятия / Т.А. Барбасова, **А.А. Захарова** // Электротехнические комплексы и системы управления». – 2013. – № 2. – С. 23–27.

5. Барбасова, Т.А. Пути повышения энергетической эффективности Челябинской области / Т.А. Барбасова, **А.А. Захарова** // Инновационный Вестник Регион. – 2012. – № 2. – С. 69–75.

6. Барбасова, Т.А. Внедрение системы энергетического менеджмента на металлургических предприятиях Челябинской области в целях повышения энергетической эффективности региона / Т.А. Барбасова, **А.А. Захарова** // Экономика в промышленности. – 2012. – №3. – С. 42–46.

7. Казаринов, Л.С. Автоматизированная информационная система поддержки принятия решений по контролю и планированию потребления энергетических ресурсов / Л.С. Казаринов, Т.А. Барбасова, **А.А. Захарова** // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2012. – №23. – С. 118–122.

Статьи в журналах, входящих в систему цитирования Scopus:

8. **Filimonova, A.A.** Dispatching control of industrial facility power consumption / A.A. Filimonova, L.S. Kazarinov, T.A. Barbasova // Energy Procedia. – 2015. – №83. – P. 111-120.

9. Barbasova, T.A. Automated system for equipment energy efficiency monitoring in heat energy facility / T.A. Barbasova, O.V. Kolesnikova, **A.A. Filimonova** // Energy Procedia. – 2015. – №83. – P. 69–78.

10. Kazarinov, L.S. Method of multilevel rationing and optimal forecasting of volumes of electric-energy consumption by an industrial enterprise / L.S. Kazarinov, T.A. Barbasova, O.V. Kolesnikova, **A.A. Zakharova** // Automatic Control and Computer Sciences. – 2014. – Vol. 48, No. 6. – P. 324–333.

Статьи в других журналах и сборниках трудов, материалах конференций

11. **Filimonova, A.A.** A Method of Effective Planning and Control of Industrial Facility Energy Consumption / A.A. Filimonova, L.S. Kazarinov, T.A.

Barbasova // International Journal of Social, Behavioral, Educational, Economic, Business and Industrial Engineering. – 2015. – Vol: 9, №12. – P. 2070-2074.

12. Barbasova T.A. Energy Consumption Forecast Procedure for an Industrial Facility / T.A. Barbasova, L.S. Kazarinov, **A.A. Filimonova** // International Journal of Social, Behavioral, Educational, Economic, Business and Industrial Engineering. – 2015. – Vol: 9, №12. – P. 3864–3867.

13. **Филимонова, А.А.** Многоуровневое планирование и управление электропотреблением металлургического предприятия / А.А. Филимонова // Автоматизация и управление промышленными предприятиями: доклады научно-технической конференции всероссийского форума «Информационное общество – 2015: вызовы и задачи». – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – С. 91-100.

14. **Филимонова, А.А.** Метод построения оптимальных графиков электропотребления / А.А. Филимонова // Наука ЮУрГУ: материалы 66-й научной конференции. Секции технических наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2014. С. 651–656.

15. Солодовникова В.В. Автоматизированная система управления и регистрации параметров нанесения защитных покрытий на соединительные детали трубопроводов / В.В. Солодовникова, **A.A. Филимонова** // Научные исследования: от теории к практике. Материалы международной научно-практической конференции. – Чебоксары, 2014. – С. 267–268.

16. **Филимонова, А.А.** Современные автоматизированные системы управления технологическим процессом / А.А. Филимонова, Г.О. Боос // Инновации в науке. – 2014. – № 38. – С. 39–42.

17. Казаринов, Л.С. Метод многоуровневого нормирования и оптимального прогноза объемов потребления электрической энергии промышленным предприятием / Л.С. Казаринов, Т.А. Барбасова, О.В. Колесникова, **A.A. Захарова** // Автоматика и вычислительная техника. – 2014. – №6. – С. 20–32.

18. **Захарова, А.А.** Минимизация электропотребления дуговой сталеплавильной печи / А.А. Захарова // Роль технических наук в развитии общества. – Сборник статей Международной научно-практической конференции. – Уфа: Аэтерна, 2014. С. 22–25.

19. Барбасова, Т.А. Автоматизированная информационная система поддержки принятия решений по повышению эффективности использования энергии на предприятии // Т.А. Барбасова, **A.A. Захарова** // Сборник трудов: Наука и технологии. Материалы XXXII Всероссийской конференции по проблемам науки и технологий. – Миасс: МСНТ, 2012. – С. 283–285.

20. Барбасова, Т.А. Повышение энергетической эффективности промышленных предприятий / Т.А. Барбасова, **A.A. Захарова** // Материалы за 7-а международна научна практична конференция, «Бъдещето въпроси от света на науката». – 2011. – Том 30. – С. 61–63.

Филимонова Александра Александровна

**МЕТОДЫ МНОГОУРОВНЕВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И
УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать ____ .12.2016. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ _____.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76