

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи



Филимонова Александра Александровна

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

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук,
профессор **Казаринов Л.С.**

Челябинск – 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ	10
1.1 Анализ проблем многоуровневого планирования и управления электропотреблением предприятий	10
1.2 Обзор литературы	16
1.3 Постановка цели и задач исследования.....	24
2 МЕТОДЫ МНОГОУРОВНЕВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ	26
2.1 Метод краткосрочного планирования электропотребления на уровне подразделений	26
2.2 Метод среднесрочного планирования и управления электропотреблением металлургического предприятия в целом	33
2.3 Многоуровневое планирование и управление электропотребления металлургического предприятия	40
Выводы к разделу 2.....	46
3 ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ, АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ И ПРОГРАММНЫЕ ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ.....	48
3.1 Организация планирования и управления электропотреблением металлургического предприятия	48
3.2 Алгоритмы решения задачи минимизации общей ошибки прогноза потребления электроэнергии предприятием.....	51
3.3 Программное обеспечение оптимального прогноза объемов потребления электроэнергии подразделениями ОАО «ММК» и комбинатом в целом	58
Выводы к разделу 3.....	65

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОВ	
ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ	
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ	66
4.1 Результаты проведения экспериментальных исследований метода	
среднесрочного планирования электропотребления на реальных данных	
ОАО «ММК»	66
4.1.1 Экспериментальные исследования для основных видов продукции	69
4.1.2 Экспериментальные исследования для цехов металлургического	
производства.....	76
4.1.3 Экспериментальные исследования для электростанций	98
4.1.4 Технический эффект внедрения методики среднесрочного	
планирования и управления электропотреблением на ОАО «ММК».....	104
4.2 Результаты проведения экспериментальных исследований методики	
краткосрочного планирования электропотребления на реальных данных	
металлургических предприятий	109
4.2.1 Результаты проведения экспериментальных исследований методики	
почасового планирования электропотребления для ЛПЦ-4, ЛПЦ-5, ЛПЦ-9	
ОАО «ММК»	109
4.2.2 Результаты проведения экспериментальных исследований методики	
почасового планирования электропотребления для металлургического	
предприятия 1-й ценовой зоны.....	118
4.3 Экономический эффект от применения результатов работы.....	130
Выводы к разделу 4.....	132
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ	134
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	136
ПРИЛОЖЕНИЕ Акт внедрения результатов диссертационной работы.....	153

ВВЕДЕНИЕ

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. [22-24], Бэнн Д.В. [34, 35], Вагин Г.Я. [33, 36-39], Гордеев В.И. [30, 31], Гофман И.В. [53, 54], Заславец Б.И. [65, 66, 101-103], Копцев Л.А. [57, 76, 78-80], Кудрин Б.И. [81-83], Лисиенко В.Г. [84], Литвак В.В. [85, 86], Лоскутов А.Б. [33, 36, 39], Макоклюев Б.И. [87-92], Манусов В.З. [93, 94], Надтока И.И. [30, 99], Никифоров Г.В. [57, 65, 101-103, 108], Олейников В.К. [65, 101-103, 108, 142], Поляхов Н.Д. [109, 110], Праховник А.В. [111, 112], Розен В.П. [112], Фармер Е.Д. [34, 35], Хохлов Ю.И. [134-136], Andersen F.M. [1, 2], Ashok S. [3], Espasa A. [7], Hyndman R.J. [8, 10, 13], Larsen H.V. [1, 2], Lin C.W. [15], Moodie C.L. [15], Taylor J.W. [18-20], Weron R. [21] 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. [96], Месаровича М., Мишина С.П. [40-42, 56, 97, 98], Новикова Д.А. [105, 106], Такахара И., Цвиркуна А.Д. [138-140] 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.

1 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

1.1 Анализ проблем многоуровневого планирования и управления электропотреблением предприятий

Предприятия черной металлургии относятся к одной из наиболее энергоемких отраслей промышленности РФ [27-29]. При этом, затраты металлургических предприятий РФ на электрическую энергию существенно превышают затраты на электропотребление крупных зарубежных производителей металла. В условиях рыночной экономики и значительного повышения цен на энергоресурсы особую актуальность приобретает задача планирования и управления электропотреблением металлургического предприятия [101].

Современное металлургическое предприятие представляет собой сложную многоуровневую систему, функционирование которой определяется характером взаимосвязей между ее элементами, внешними и внутренними факторами [102]. Вследствие этого задача планирования и управления электропотреблением на металлургическом предприятии должна решаться комплексно как путем детального анализа потребления электрической энергии частных производственных участков, так и с использованием алгоритмов нормирования и прогнозирования потребления энергетических ресурсов в целом по предприятию. Представление металлургического предприятия в виде многоуровневой системы позволяет отразить особенности каждого уровня управления. Координация уровней системы должна осуществляться таким образом, чтобы элементы нижнего уровня способствовали достижению целей все более высокого уровня.

В общем случае многоуровневая структура управления электропотреблением металлургического предприятия включает в себя верхний технико-экономический уровень и нижний уровень подразделений.

Обобщенная схема многоуровневой структуры управления электропотреблением металлургического предприятия приведена на рисунке 1.1.

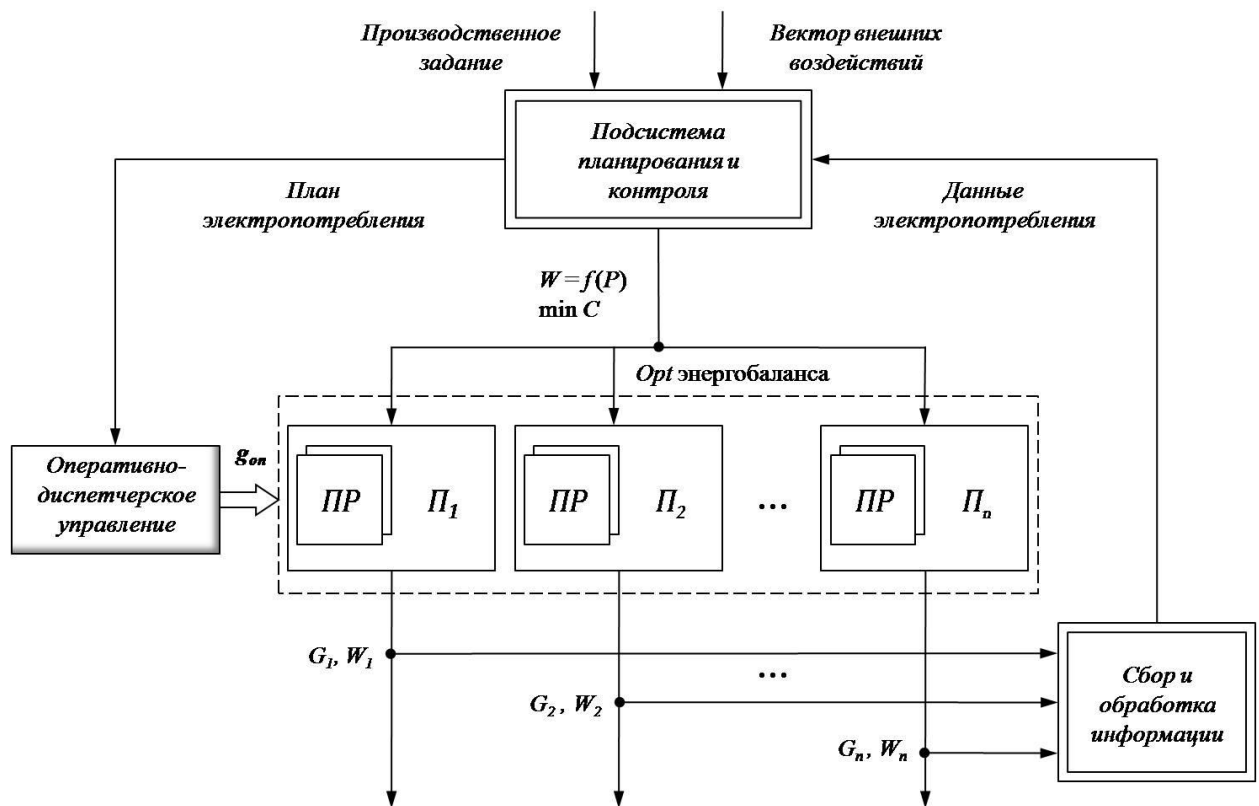


Рис.1.1. Обобщенная схема управления электропотреблением металлургического предприятия

На рис. 1.1: $ПР$ – потребители-регуляторы электропотребления; $П_i$ – прочие потребители энергоресурсов; P – плановое количество продукции; g_{on} – 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 электрической энергии на верхнем уровне и высокой степенью 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.

Особую актуальность вопрос многоуровневого подхода получил 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.

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.

В соответствии с Постановлением Правительства РФ от 04.05.2012 № 442 определены шесть ценовых категорий для потребителей электроэнергии в зависимости от применяемого в расчетах тарифа, пять из которых подразумевает жесткий контроль потребления электроэнергии. В целях стимулирования предприятий внедрять почасовой учет и почасовое

планирование электропотребления с 1 июля 2013 г. для крупных потребителей (с максимальной мощностью не менее 670 кВт) был введен запрет на применение в расчетах первой и второй ценовых категорий, что привело к резкому росту цены электроэнергии для многих предприятий.

Пятая и шестая ценовые категории делают необходимым для потребителей построение почасовых прогнозов на сутки вперед. Такие прогнозы позволяют потребителю снизить стоимость покупной электроэнергии, так как позволяют оптимизировать свое производство и сдвигают наибольшие нагрузки в часы, где нерегулируемая цена минимальна.

Необходимость точного прогнозирования потребления электроэнергии обусловлена механизмом функционирования оптового рынка электроэнергии. Субъект оптового рынка берет на себя некоторый риск, который связан с невозможностью точного планирования заявки на потребление электроэнергии. Отклонения фактического потребления от заявленных значений больше определенного процента приводит к закупке электроэнергии с балансирующего рынка по большей цене. Отклонение в меньшую сторону тоже карается оплатой недопоставленной электроэнергии, определяемой разницей между заявленным и фактическим потреблением по установленным расценкам. Таким образом, высокая точность прогноза позволяет снизить финансовые потери субъекта оптового рынка.

Существующие методики прогноза электрической нагрузки потребителей, как правило, основываются на статистическом анализе временных рядов потребления электроэнергии. Недостатком данного подхода является то, что здесь анализируются только *внешние* для потребителей факторы, влияющие на потребление электроэнергии. Такими факторами являются: температура окружающего воздуха, облачность, долгота дня, день недели, наличие экстраординарных событий, планируемое включение/отключение энергоемких производств и др. Подобный подход дает относительно точные результаты только применительно к большим массивам потребителей, например, промышленный и жилищно-коммунальный секторы города, нагрузка освещения и т.п. Относительно отдельного потребителя, в

нашем случае - промышленного предприятия, точность подобного подхода невелика [70].

Точное прогнозирование потребления электроэнергии промышленного предприятия требует анализа *внутренних* производственных факторов. В настоящее время на многих крупных металлургических предприятиях подход к прогнозированию потребления электроэнергии на основе анализа внутренних производственных факторов реализуется для месячного нормирования и прогнозирования электропотребления. Переход к посуточному и почасовому нормированию и прогнозированию потребления электроэнергии требует разработки иной методики прогнозирования. В данной работе излагаются основы нового подхода к планированию потребления электроэнергии на краткосрочные периоды с учетом многоуровневой структуры предприятия.

1.2 Обзор литературы

Решению проблемы планирования и управления электропотреблением на промышленных предприятиях посвящено большое количество работ.

Важнейшими задачами при планировании и управлении электропотреблением на металлургическом предприятии является задачи нормирования и прогнозирования расходов электроэнергии.

Обоснованные нормы потребления электроэнергии позволяют осуществлять прогноз электропотребления для отдельных подразделений и предприятия в целом, осуществлять контроль эффективности использования электрической энергии конкретным подразделением (на конкретном агрегате), а также определять участки неэффективного электропотребления. Вопросы нормирования электропотребления рассмотрены в работах Анчаровой Т.В. [22], Борисова Б.П., Вагина Г.Я. [33, 38, 39], Гофманом И.В. [53], Кудрина Б.И. [82].

В работе [22] Анчаровой Т.В. предложены методы удельных норм расхода электроэнергии электроемкости продукции для предприятий с широкой номенклатурой производства. В целях нормирования предлагается использовать среднестатистический подход, который заключается в установлении удельных норм по отчетно-статистическим данным о фактическом расходе электроэнергии и выпуске продукции. Для сокращения количества видов продукции, по которым ведется нормирование, предложено разбить их на группы по технологическим признакам или электропотреблению.

Федотовым А.И. в [127] дается описание использования метода математического моделирования при нормировании электропотребления на примере одного из промышленных предприятий химической отрасли. Метод математического моделирования позволяет нормировать электропотребление многономенклатурного промышленного предприятия при изменяемых объемах произведенной продукции с достаточной точностью при минимуме информации о структуре предприятия.

Никифоров Г.В., Олейников В.К., Заславец Б.И. в работе [101] сформулировали основные проблемы управления электропотреблением и энергосбережением в металлургическом производстве и привели возможные пути их решения. В работе рассмотрены задачи нормирования, планирования энергозатрат по уровням управления. Большое внимание уделено вопросам прогнозирования потребления энергии в металлургическом производстве.

В работе [101] Никифорова Г.В. предложен метод прогнозирования расхода энергоресурсов, основанный на построении регрессионных моделей с включением фактора времени. Влияние производственных факторов, выраженное коэффициентами регрессии прогнозной модели, изменяется от периода к периоду. Анализ изменчивого влияния во времени основных факторов позволяет определить закономерности изменения во времени соотношения между детерминированной, вероятностной и случайной компонентами процесса формирования динамики потребления электрической энергии в условиях металлургического производства.

Решение задачи прогнозирования электропотребления на основе многофакторного регрессионного и корреляционного анализов осуществляется в работах Белана А.В., Гордеева В.И. [31], Bianco V. [6], Dordonnat V. [9]. В работе Манусова В.З. [94] оценка и прогнозирование электропотребления в энергосистемах осуществляется на основе нечеткого регрессионного анализа.

В работе Dordonnat V. [9] рассмотрена динамическая множественная периодическая регрессионная модель для почасовых данных. Зависимые почасовые временные ряды представлены как дневные многомерные модели временных рядов. Коэффициенты регрессии различаются в зависимости от уравнений (или часов) и стохастически меняются в течение нескольких дней. Так как неограниченная модель содержит много неизвестных параметров, в рамках пространства состояний разработана эффективная методология, которая накладывает общие динамические факторы для параметров, которые управляют динамикой различных уравнений. Факторный подход приводит к более точной оценке коэффициентов. Имитационное моделирование для

базовой версии модели иллюстрирует повышенную точность для набора одномерных тестовых моделей.

В зависимости от величины горизонта прогноза можно выделить следующие категории прогнозирования:

- долгосрочное прогнозирование;
- среднесрочное прогнозирование;
- краткосрочное и оперативное прогнозирование.

При долгосрочном прогнозировании и планировании горизонт прогноза составляет год и более.

Вопросы долгосрочного прогнозирования электропотребления рассмотрены в работах Andersen F.M., Larsen H.V. [2]. Модель, представленная в работе [2], предполагает, что почасовой график нагрузки также изменяется при изменении величины потребления электроэнергии по категориям потребителей и учитывает влияние введения новых энергосберегающих технологий

Среднесрочный прогноз предполагает прогнозирование сроком от месяца до года.

Краткосрочное прогнозирование и оперативно-диспетчерское управление электропотреблением является на сегодняшний день актуальной технико-экономической задачей для промышленных предприятий и энергоснабжающих организаций [6-10, 13, 16-21]. Краткосрочные и оперативные прогнозные оценки электропотребления составляют основную информацию для принятия решений о планировании потребления электроэнергии предприятиями и развития электроснабжения.

В статье Ashok S. [3] рассмотрены вопросы управления нагрузкой на небольших сталеплавильных заводах в Индии. В работе описана модель нагрузки, которая включает в себя характеристики периодических нагрузок, общих для любого типа перерабатывающей промышленности. Предлагаемая методология может быть использована для всех отраслей промышленности, использующих временные тарифы. Пример металлургического завода показывает, что значительное сокращение в пиковые периоды потребления

(около 50%) и стоимости электроэнергии (около 5,7%) возможно с помощью планирования оптимальной нагрузки.

Авторами в работе [142] рассмотрены теоретические и практические аспекты оперативного планирования и управления электропотреблением на промышленном предприятии. Представлены возможности математического моделирования и оптимизации технологических режимов. На примере агломерационного производства крупного металлургического комбината выполнены расчеты оптимально-компромиссного режима. Показано, что в результате решения задачи координации сменная производительность аглофабрики увеличится, а электропотребление сократится.

Повышение точности краткосрочных прогнозных оценок электропотребления обеспечивает значительную экономию, что обуславливает актуальность работ, связанных с разработкой методов и алгоритмов краткосрочного и оперативного прогнозирования электропотребления для систем принятия решений в электроэнергетике.

Вопросы повышения точности прогнозных оценок рассмотрены в работах Макоклюева Б.И., Поляхова Н.Д. [87, 89, 110].

Новиковым С.С. в [127] представлен пример построения оперативного прогноза электропотребления крупного металлургического предприятия для обеспечения точности планирования, рассматриваемого как средство снижения рисков при работе на оптовом рынке электроэнергии.

В работе [110] авторами предлагается обрабатывать исходные данные наблюдений с помощью метода главных компонент, что позволяет уменьшить размерность обучающей выборки. Для прогнозирования электропотребления выбран метод опорных векторов. Преимуществом метода является то, что параметры регрессионной модели определяются на основе решения задачи квадратичного программирования, имеющей единственное решение. Оптимизация параметров ядерной функции выполнена на основе генетического алгоритма и алгоритма роя частиц. Исследования моделированием подтверждают эффективность предложенного подхода.

Ошибка прогнозирования уменьшилась по сравнению с прогнозом на основе статистических моделей в 2 раза.

Особый интерес представляют работы Б.И. Кудрина, Гнатюка В.И., Лагуткина О.Е., Ошуркова М.Г. по краткосрочному прогнозированию объемов электропотребления на основе техноценоза.

Термин «техноценоз» предложен Б.И. Кудриным в 1974 г. Техноценоз определяется как ограниченное в пространстве и времени сообщество всех изделий, включающее все популяции. При этом характеризуется слабыми связями и слабым взаимодействием элементов, образующих систему искусственного происхождения, несопоставимую времени жизни ценоза и особи. Методологически исследование техноценозов основывается на изучении распределения видов изделий выделенного ценоза по повторяемости. Обнаруженная закономерность построения технических систем может быть объяснена на основе закона информационного отбора.

Специфика техноценозов проявляется в методологических основаниях их исследования. Техноценозы не поддаются описанию ни традиционными методами гауссовой математической статистики, оперирующей понятиями среднего и дисперсии как информативно насыщенными свертками больших массивов статистической информации. Чтобы корректно описать техноценоз необходимо постоянно оперировать выборкой в целом, как бы велика она ни была, что предполагает построение видовых и ранговых распределений, теоретическая основа которых лежит в области негауссовой математической статистики устойчивых безгранично делимых распределений.

Методики построения видовых и ранговых распределений и их последующее использование в целях оптимизации техноценоза составляют основной смысл рангового анализа.

Устойчивость системы обусловлена действием законов энергетического и информационного отборов по аналогии с живыми системами, где действует закон естественного отбора. Б. И. Кудрин предложил использовать модель Н-распределения для математического описания видового и рангового распределения техноценозов:

$$A_i = \frac{A}{X_i^{1+\alpha}} \quad (1.1)$$

где A_i – теоретическое значение числа видов для всех i ; X_i – численность популяции; A , α – постоянные видового распределения.

Современное металлургическое предприятие включает в себя сложные технологические, электрические, информационные и другие сети, и актуальными становятся проблемы их построения и обеспечения нормального функционирования. Отмеченные ценологические свойства металлургических предприятий констатируют устойчивость явления, проявляющегося с определенного уровня организации некоторого множества элементов с неопределенными связями, способность ценозов формировать в процессе образования и сохранять в процессе развития устойчивую структуру при наличии различных механизмов отбора.

Аналогично (1.1) можно определить электропотребление предприятия:

$$W_r = \frac{W_1}{r^\beta}$$

где W_r – электропотребление особи с рангом r ; W_1 – максимальное электропотребление; r^β – ранговый коэффициент, характеризующий форму кривой распределения.

В работе [145] Южанниковым А.Ю. предложена методика ценологического моделирования электропотребления, позволяющая на основе рангового анализа повысить качество электропотребления. Авторами проводится ранжирование данных фактического электропотребления для дальнейшей аппроксимации полученного множества данных функциями различного вида.

Особого внимания заслуживают работы Воронова И.В., Демуры А.В. по краткосрочному прогнозированию объемов электропотребления на основе нейронной сети. В работе [44] авторами рассматривается возможность краткосрочного прогнозирования электропотребления энергосистем с применением искусственных нейронных сетей. Предлагается методика

выбора оптимальной конфигурации искусственной нейронной сети с помощью генетического алгоритма. Производится прогнозирование электропотребления Иркутской, Красноярской и Кузбасской энергосистем с помощью искусственной нейронной сети и оценивается точность получения прогноза.

В работе Манусова В.З. [93] проведен сравнительный анализ двух моделей прогнозирования электрической нагрузки промышленных предприятий, построенных на основе регрессионного анализа и искусственных нейронных сетей. Рассмотрено применение на практике нейронных сетей, а также программных комплексов Statistika и Statistika Neural Networks для прогнозирования электрической нагрузки. Показана точность моделей прогноза с применением искусственных нейронных сетей (ИНС) при решении задачи краткосрочного прогнозирования электрической нагрузки. Модель на основе ИНС для прогнозирования нагрузки показала лучшие результаты, что в свою очередь еще раз доказывает её эффективность по сравнению с традиционными методами. ИНС является мощным и эффективным средством решения задач в условиях неопределенности и вполне удовлетворяет современным требованиям оптового рынка.

Несмотря на большое количество работ, посвященных снижению энергетических затрат на металлургических 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.

В работе [101] Никифоровым Г.В. и др. предлагается рассматривать систему электроснабжения металлургического предприятия как совокупность многоуровневых иерархически организованных подсистем. Авторами предложено выделять отдельные энергоемкие потребители, обладающие ценологическими свойствами системы, и рассматривать их как отдельные уровни управления многоуровневой подсистемы электропотребления

металлургического производства, обладающие определенными закономерностями.

Общие вопросы принятия решений в сложных многоуровневых системах рассмотрены в работах Мако Д., Месаровича М., Такахара И. [96], Мишина С.П. [40-42, 56, 97, 98], Новикова Д.А. [105, 106], Цвиркуна А.Д. [138-140] и др.

В работе Lin C.W., Moodie C.L. [15] «Иерархическое планирование производства для современной системы производства стали» описана методология, которая позволяет получить подробный график производства, обеспечивающий плавное непрерывное операций в современной системе производства стали. Производственный график обеспечивает выполнение заказов клиентов и другие необходимые операции при минимально возможных затратах энергии. Две модели математического программирования и эвристические последовательности разрабатываются на различных уровнях иерархии интегрированного управления. Также была построена имитационная модель, используемая для оценки плановой системы и исследования основных результатов. Статистический анализ показывает повышение точности планирования процесса производства стали.

Проведенный обзор литературы показал, что задача планирования и управления электропотреблением для крупных предприятий в многоуровневой постановке в полной мере еще не решена. Исследованию указанной задачи применительно к электропотреблению металлургических предприятий посвящена предлагаемая диссертационная работа.

1.3 Постановка цели и задач исследования

Решение задачи планирования и управления электропотреблением для крупных предприятий является затруднительным вследствие необходимости учета технологических взаимосвязей между отдельными цехами и производствами, четкого выполнения контактного графика работ. Обзор литературы показал, что в настоящее время данная задача для крупных предприятий в многоуровневой постановке пока еще не решена.

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.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи исследовательского, методологического и прикладного характера:

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».

2 МЕТОДЫ МНОГОУРОВНЕВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

2.1 Метод краткосрочного планирования электропотребления на уровне подразделений

Исходным пунктом почасового расчета и прогнозирования электропотребления является расписание производственных циклов. Примерная форма расписания производственных циклов представлена на рисунке 2.1 [11, 12].

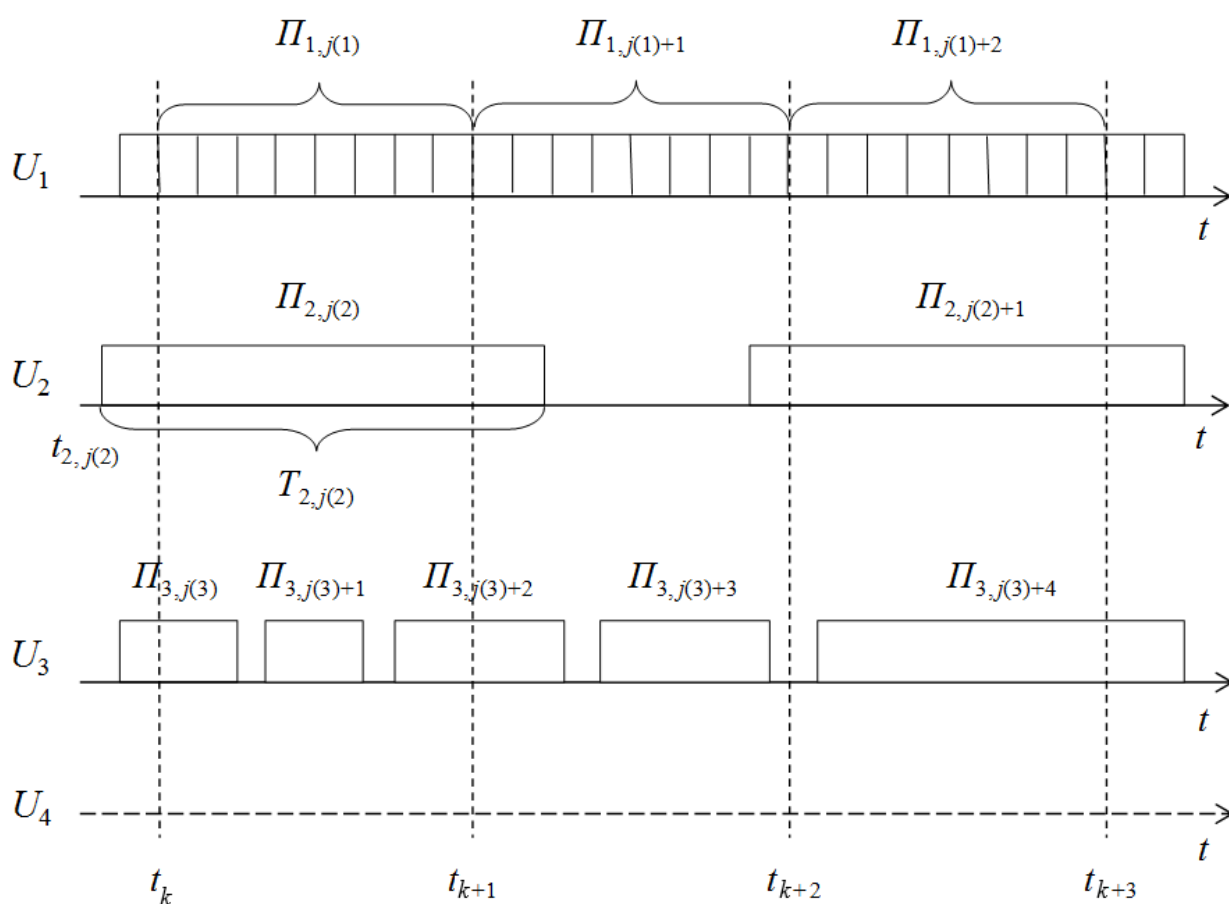


Рис. 2.1. Примерная форма расписания производственных циклов

На рис. 2.1: $U_1, \dots, U_4$ – 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:

$$W_{kin} = \sum_{k=1}^K P_{kin} \cdot I_{kin} \cdot t \quad (2.1)$$

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 (2.1) представляет собой укрупненную формулу, 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:

$$\left(\min \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N ((W_{kin} \cdot C_k) + (C_{add} \cdot I_{add}) \cdot t) \right) \cdot d + C_M \cdot M \quad (2.2)$$

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 (2.2) является оптимальная характеристика при данном объеме выпуска продукции в условиях почасового тарифа на оплату электроэнергии.

Централизованное почасовое нормирование и прогнозирование электропотребления для сложных производственных комплексов представляет собой с вычислительной точки зрения чрезвычайно сложную задачу. Как следует из приведенного выше материала, при централизованных расчетах необходимо знать весьма объемную и подробную информацию о

почасовых графиках электропотребления в зависимости от технологических факторов. Однако знание технологических факторов сложных производственных комплексов сосредоточено на нижних уровнях производственной иерархии. Поэтому точное централизованное решение является практически невыполнимым.

В этой связи для сложных производственных комплексов предлагается децентрализованная процедура почасового нормирования и прогнозирования электропотребления. Процедура основана на том, что на верхнем уровне иерархии расчетов оцениваются *интегральные показатели* производственных циклов:

- объемы выпуска продукции $П_{ij}$;
- объемы потребляемой электрической энергии W_{ij} ,

где i – номер производственного участка; j – индекс производственного цикла.

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:

$$\Pi_{\varepsilon}(t_k) = \Pi_{\varepsilon 0} + \Delta \Pi_{\varepsilon}(t_k), \quad (2.3)$$

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

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

$$C_{\varepsilon}(t_k) = C_{\varepsilon 0} + \Delta C_{\varepsilon}(t_k), \quad (2.4)$$

где $C_{\varepsilon 0}$ – постоянная часть стоимости

$$C_{\varepsilon 0} = W_{\varepsilon} \Pi_{\varepsilon 0}; \quad (2.5)$$

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

$$\Delta C_{\varepsilon}(t_k) = P(t_k) \Delta \Pi_{\varepsilon}(t_k). \quad (2.6)$$

Здесь W_{ε} – 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:

$$I_{сн} = \frac{\sum_k p(t_k) u_{\varepsilon}(t_k)}{\sum_k p_{\bar{o}}(t_k) u_{\varepsilon}(t_k)}, \quad (2.7)$$

где $p(t_k)$, $p_{\bar{o}}(t_k)$, $u_{\varepsilon}(t_k)$ определяются по формулам (2.8)-(2.10):

$$p(t_k) = \frac{P(t_k)}{\sum_k P(t_k)}, \quad (2.8)$$

$$p_{\bar{o}}(t_k) = \frac{P_{\bar{o}}(t_k)}{\sum_k P_{\bar{o}}(t_k)}, \quad (2.9)$$

$$u_{\varepsilon}(t_k) = \frac{\Delta \Pi_{\varepsilon}(t_k)}{\sum_k \Delta \Pi_{\varepsilon}(t_k)}, \quad (2.10)$$

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 формально 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 [128, 129].

Как и показатель удельного электропотребления, формально не зависящий от объемов электропотребления, но фактически зависящий нелинейным образом от объема электропотребления, индекс переменной стоимости зависит от объема электропотребления и средневзвешенной цены за электрическую энергию. Поэтому при централизованном планировании индекса переменной стоимости необходимо на основе статистических данных определять эмпирическую зависимость индекса снижения стоимости от объема электропотребления $W_э$ и средневзвешенной цены $Ц_{св}$. Для решения данной задачи целесообразно использовать формулу:

$$I_{сн} = F_{св}(W_э) + k_n (Ц_{св} - Ц_б), \quad (2.11)$$

где $F_{\text{вс}}(\cdot)$ – нелинейная эмпирическая зависимость; $\Pi_{\text{св}}$ – текущая средневзвешенная цена электроэнергии; $\Pi_{\text{б}}$ – базовая цена электроэнергии; k_n – поправочный коэффициент.

Нелинейная эмпирическая зависимость $F_{\text{вс}}(\cdot)$ может быть определена на основе того же программного обеспечения, которое используется для определения удельного потребления электроэнергии.

Процедура почасового планирования состоит в следующем.

1⁰. На верхнем производственном уровне, исходя из статистики потребления электроэнергии и оценки экономичности почасового графика электропотребления, производственным участкам, на основе календарного графика производства на сутки вперед, назначаются величины показателей: объем производства Π_{ij} , объем потребления электроэнергии W_{ij} и технико-экономический показатель $I_{\text{сн},i}$ – индекс снижения стоимости потребления электроэнергии.

На уровне производственных участков, исходя из полученного задания: объема производства Π_{ij} , объема потребления электроэнергии W_{ij} и технико-экономического показателя $I_{\text{сн},i}$, составляется почасовой график электропотребления на сутки вперед.

2⁰. Почасовые графики электропотребления на сутки вперед для производственных участков суммируются на верхнем уровне управления производством.

3⁰. Суммарный график электропотребления предприятия в целом определяется соотношением:

$$W_0(t_k) = \sum_i a_i \sum_j W_{ij}(t_k), \quad (2.12)$$

где a_i – балансировочные коэффициенты.

Балансировочные коэффициенты a_i определяются согласно методике, приведенной в п. 2.2.

2.2 Метод среднесрочного планирования и управления электропотреблением металлургического предприятия в целом

На основе информации о месячных объемах производства и фактического месячного потребления электрической энергии для каждого подразделения определяются характеристики удельного электропотребления как функции от объемов производства:

$$w_{it} = \frac{W_{it}}{P_{it}} = f(P_{it}). \quad (2.13)$$

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

W_{it} – расход электроэнергии i -го производственного подразделения предприятия за t -ый интервал времени, кВт·ч;

P_{it} – количество продукции, произведенной i -ым производственным подразделением за t -ый 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:

$$w_{it} = A_i \exp\left(\sum_l d_i^l P_{it}^l\right). \quad (2.14)$$

где A_i, d_i – коэффициенты зависимости (2.13).

На основе информации о плановых объемах производства и полученных характеристик (2.14) осуществляется прогноз месячного электропотребления подразделением.

Прогноз объемов потребления электроэнергии предприятием в целом на будущий месяц осуществляется на основе соотношения:

$$W = W_0 + W_o, \quad (2.15)$$

где W_0 – суммарное потребление электроэнергии производственными подразделениями предприятия, т.е. потребление электроэнергии предприятием в целом; W_∂ – дополнительная величина потребления электроэнергии для ненормируемых производств, например, ремонтных и обслуживающих.

Далее рассмотрим определение прогнозного значения расхода электроэнергии для предприятия в целом с максимальной точностью, т.е. задачу минимизации общей ошибки прогноза потребления электроэнергии для металлургического предприятия в целом.

В настоящей работе предлагается два варианта решения задачи минимизации общей ошибки прогноза потребления электроэнергии для металлургического предприятия в целом [69-73].

Вариант 1

Зависимость полного расхода электроэнергии от количества произведенной продукции предприятием в целом за t -ый интервал времени можно записать в следующем виде:

$$W_{0t} = \exp\left(\sum_{i=0}^{Np} a_i \Pi_{it}\right), \quad \Pi_{0t} \equiv 1, \quad (2.16)$$

где N_p -количество производственных подразделений предприятия.

Зависимость полного расхода электроэнергии от количества произведенной продукции для i -го производственного подразделения за t -ый интервал времени описывается соотношением:

$$W_{it} = \Pi_{it} \exp(a_{i0} + a_{i1} \Pi_{it}). \quad (2.17)$$

Сформулируем условие регулярности, которое должно быть выполнено для терминальной точки прогноза t_T .

Для регулярного решения требуется выполнение следующих равенств:

– потребления электроэнергии:

$$W_{0T}^r = \sum_{i=1}^{Np} W_{iT} ; \quad (2.18)$$

– частных производных потребления электроэнергии:

$$\frac{\partial W_{0T}^r}{\partial \Pi_{iT}} = \frac{\partial W_{iT}^r}{\partial \Pi_{iT}}. \quad (2.19)$$

На основе соотношений (2.18), (2.19) можно записать регулярное решение задачи:

$$a_i^r = \frac{w_{iT} + a_{i1} W_{iT}^r}{W_{0T}^r}; \quad (2.20)$$

$$a_0^r = \ln(W_{0T}^r) - \sum_{i=1}^{Np} a_i^r \Pi_{iT}. \quad (2.21)$$

Решение задачи минимизации общей ошибки прогноза потребления электроэнергии для ОАО «ММК» в целом будем осуществлять по следующим критериям:

- 1) точности;
- 2) регулярности.

Критерий точности решения:

$$E_0^2 = M_t \left\{ \left[\ln(W_{0t}^\phi) - \sum_{i=0}^{Np} a_i \Pi_{it}^\phi \right]^2 \right\}, \quad (2.22)$$

Где W_{0t}^ϕ - фактическое значение потребления электроэнергии предприятием за t -ый интервал времени; Π_{it}^ϕ - фактическое значение количества продукции, произведенной i -ым производственным подразделением за t -ый интервал времени.

Критерий регулярности:

$$R_0^2 = \sum_{i=0}^{Np} (a_i - a_i^r)^2. \quad (2.23)$$

Целевая функция представляет собой функцию Лагранжа:

$$Q_L = (1 - \alpha_R) E_0^2 + \alpha_R R_0^2 \rightarrow \min, \quad (2.24)$$

где $\alpha_R \in [0; 1]$ - регуляризующий множитель.

Решение задачи (2.24) сводится к решению следующей системы уравнений:

$$(1 - \alpha_R) \sum_{j=0}^{N_p} c_{ij} a_j + \alpha_R a_i = (1 - \alpha_R) d_i + \alpha_R a_i^r, \quad i \in [0; N_p], \quad (2.25)$$

где

$$c_{ij} = M_t \{ \Pi_{it}^\phi \Pi_{jt}^\phi \};$$

$$d_i = M_t \{ \ln(W_{0t}^\phi) \Pi_{it}^\phi \}.$$

Решение системы уравнений (2.25) осуществляется, например, методом Гаусса.

Вариант 2

Настоящий вариант решения задачи минимизации общей ошибки прогноза потребления электроэнергии предприятием в целом основан на невязке значений фактического общего потребления электроэнергии предприятием W_0^ϕ , определяемого по показаниям прибора учета, и расчетного суммарного расхода электроэнергии i -ых производственных подразделений W_0^p , определяемого по соотношению:

$$W_0^p = \sum_{i=1}^{N_p} W_i^p, \quad (2.26)$$

где частные расходы электроэнергии i -ых производственных подразделений определяются для каждого t -го момента времени:

$$W_{it}^p = \Pi_{it} \exp(a_{i0} + a_{i1} \Pi_{it}).$$

Минимизация указанной выше невязки значений осуществляется на основе коррекции суммарного расхода электроэнергии W_0^p .

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

$$W_{0t}^{np} = \sum_{i=0}^{N_p} a_i W_{it}^p, \quad (2.27)$$

где $W_{it}^p \equiv 1$ при $i = 0$; a_i – корректирующие коэффициенты.

Корректирующие коэффициенты a_i определяются методом наименьших квадратов.

Общий квадратичный критерий имеет вид:

$$Q_E = (1 - \alpha)E_0^2 + \alpha \sum_{i=0}^{Np} (a_i - a_i^H)^2 \rightarrow \min, \quad (2.28)$$

где E_0^2 - общая ошибка, определяемая по соотношению

$$E_0^2 = M_t \left\{ \left(W_{0t}^\phi - \sum_{i=0}^{Np} a_i W_{it}^p \right)^2 \right\}; \quad (2.29)$$

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 (2.28) сводится к решению следующей системы уравнений:

$$(1 - \alpha) \sum_{j=0}^{Np} c_{ij} a_j + \alpha a_i = (1 - \alpha) d_i + \alpha a_i^H, \quad i \in [0; N_p], \quad (2.30)$$

где

$$c_{ij} = M_t \{ W_{it}^p W_{jt}^p \};$$

$$d_i = M_t \{ W_{0t}^\phi W_{it}^p \}.$$

Решение системы уравнений (2.30) осуществляется, например, методом Гаусса.

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

1. для варианта 1 по соотношению:

$$W_{0T}^{np} = \exp \left(\sum_{i=0}^{Np} a_i \Pi_i^{nl} \right), \quad (2.31)$$

где Π_i^{nl} - плановое значение выпуска i -ой продукции;

2. для варианта 2 по соотношению:

$$W_{0T}^{np} = \sum_{i=0}^{Np} a_i W_{iT}^p, \quad (2.32)$$

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

Рассмотрим решение задачи минимизации штрафа за недостоверный прогноз потребления электроэнергии предприятием.

Штраф за недостоверный прогноз потребления электроэнергии можно записать в следующем виде [76]:

$$s_0 = \sum_t^+ s^+ e_{0t}^+ + \sum_t^- s^- e_{0t}^-, \quad (2.33)$$

где $\sum_t^+$ - операция суммирования величин для тех моментов времени, когда общая ошибка прогнозирования потребления электроэнергии положительная; $\sum_t^-$ - операция суммирования величин для тех моментов времени, когда общая ошибка прогнозирования потребления электроэнергии отрицательная; s^+ - величина штрафа за неэффективное потребление электроэнергии; s^- - цена электроэнергии; e_{0t}^+ , e_{0t}^- - соответственно положительные и отрицательные значения ошибки прогнозирования потребления электроэнергии, определяемая в зависимости от варианта решения задачи минимизации общей ошибки прогнозирования потребления электроэнергии:

– для варианта 1:

$$e_{0t} = \ln(W_{0t}^\phi) - \sum_{i=0}^{Np} a_i \Pi_{it}^\phi;$$

– для варианта 2:

$$e_{0t} = W_{0t}^\phi - \sum_{i=0}^{Np} a_i W_{it}^p.$$

Квадратичная функция потерь:

$$Q_\lambda = (1-\lambda) \sum_t^+ (e_{0t}^+)^2 + \lambda \sum_t^- (e_{0t}^-)^2, \quad \lambda \in [0; 1]. \quad (2.34)$$

Решение задачи (2.34) сводится к решению следующей системы уравнений:

– для варианта 1:

$$(1-\alpha_R) \sum_{j=0}^{N_p} c_{ij} a_j + \alpha_R a_i = (1-\alpha_R) d_i + \alpha_R a_i^r, \quad i \in [0; N_p], \quad (2.35)$$

где

$$c_{ij} = (1-\lambda) \sum_t^+ \{ \Pi_{it} \Pi_{jt} \} + \lambda \sum_t^- \{ \Pi_{it} \Pi_{jt} \};$$

$$d_i = (1-\lambda) \sum_t^+ \{ \ln(W_{0t}) \Pi_{it} \} + \lambda \sum_t^- \{ \ln(W_{0t}) \Pi_{it} \};$$

- для варианта 2:

$$(1-\alpha) \sum_{j=0}^{N_p} c_{ij} a_j + \alpha a_i = (1-\alpha) d_i + \alpha a_i^h, \quad i \in [0; N_p], \quad (2.36)$$

где

$$c_{ij} = (1-\lambda) \sum_t^+ \{ W_{it} W_{jt} \} + \lambda \sum_t^- \{ W_{it} W_{jt} \};$$

$$d_i = (1-\lambda) \sum_t^+ \{ W_{0t} W_{it} \} + \lambda \sum_t^- \{ W_{0t} W_{it} \}.$$

Таким образом, будут определены значения коэффициентов a_i , при которых квадратичная функция потерь (2.34) будет минимальной.

2.3 Многоуровневое планирование и управление электропотребления металлургического предприятия

Многоуровневая расчетная схема планирования электропотребления металлургического предприятия представлена на рисунке 2.2.

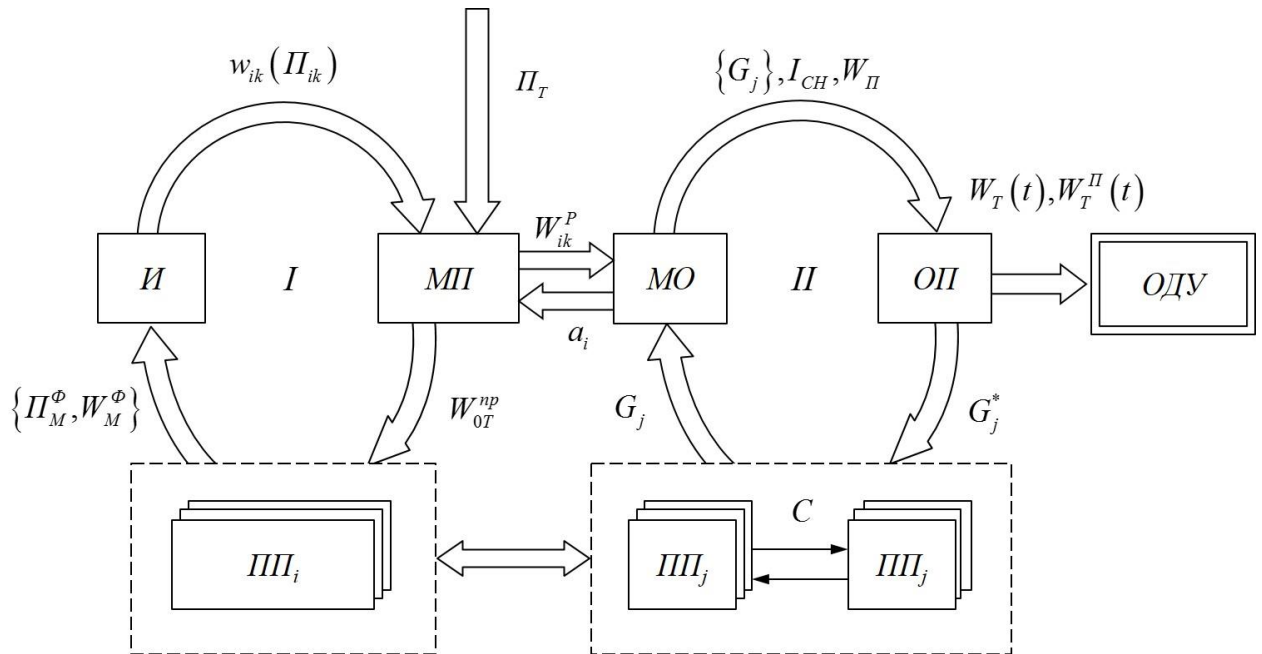


Рис. 2.2. Многоуровневая расчетная схема планирования электропотребления

На рис. 2.2: I – месячное планирование электропотребления; II – почасовое планирование электропотребления; $\Pi\Pi_i$ – производственные подразделения; Π_T – плановый объем производства; блок I – 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 ; $w_k(\Pi_k)$ – функциональная зависимость удельного электропотребления от объемов производства за k -й интервал времени; $МП$ – месячное прогнозирование электропотребления; W_{0T}^{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_{Π} – 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 (II) определяются характеристики удельного электропотребления как функции от объемов производства:

$$w_{ik} = f(\Pi_{ik}). \quad (2.37)$$

где w_{ik} – удельный расход электроэнергии i -го производственного подразделения предприятия за k -ый интервал времени, кВт·ч/единица продукции; Π_{ik} – количество продукции, произведенной i -ым производственным подразделением за k -ый интервал времени.

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

$$W_{ik}^P = w_{ik} \Pi_{ik}. \quad (2.38)$$

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 ($МО$).

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

$$W_{0k}^P = \sum_{i=1}^{Np} W_{ik}^P. \quad (2.39)$$

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:

$$W_{0k}^{np} = \sum_{i=0}^{Np} a_i W_{ik}^p, \quad (2.40)$$

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:

$$Q_E = (1 - \alpha) E_0^2 + \alpha \sum_{i=0}^{Np} (a_i - a_i^H)^2 \rightarrow \min, \quad (2.41)$$

где E_0^2 - общая ошибка, определяемая по соотношению

$$E_0^2 = M_t \left\{ \left(W_{0k}^{\phi} - \sum_{i=0}^{Np} a_i W_{ik}^p \right)^2 \right\}; \quad (2.42)$$

Решение задачи (2.41) приведено в п. 2.2.

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

$$W_{0T}^{np} = \sum_{i=0}^{Np} a_i W_{iT}^p, \quad (2.43)$$

где W_{iT}^p – расчетное значение расхода электроэнергии для выпуска i -ой 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 на данный момент является неформализованной и осуществляется вручную. Скорректированный график направляется в подразделения для согласования работ. Требуемые величины электропотребления и пикового электропотребления задаются подсистеме оперативно-диспетчерского управления ($ОДУ$).

Общая схема оперативно-диспетчерского управления электропотреблением предприятия представлена на рис. 2.3.

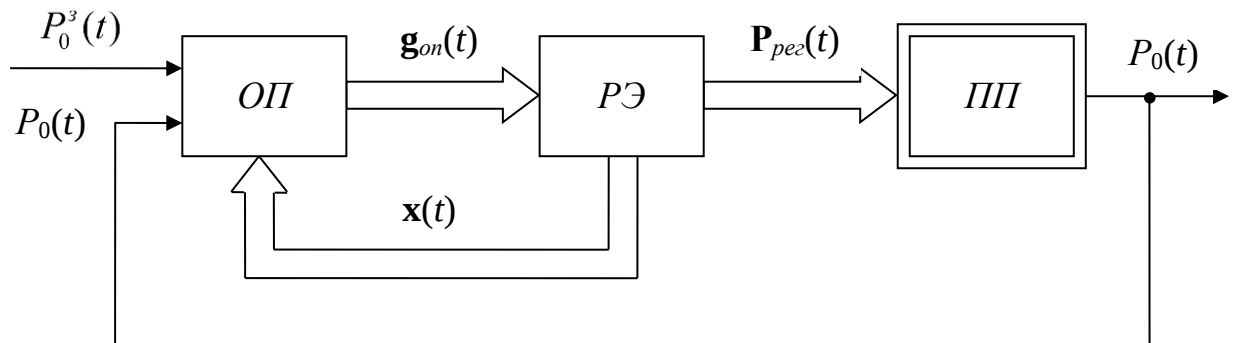


Рис. 2.3

Здесь $ОП$ – оперативное планирование; $РЭ$ – регуляторы электропотребления; $ПП$ – производственный процесс; $P_0^3(t)$ – заявленный график электропотребления; $P_0(t)$ – фактический график электропотребления; g_{on} – оперативное расписание работ регуляторов электропотребления; $P_{pez}(t)$ – вектор текущих значений электропотребления потребителей-регуляторов; $x(t)$ – вектор режимных параметров регуляторов электропотребления.

Для осуществления оперативно-диспетчерского управления необходимо в производственном процессе всего предприятия выделить потребители-регуляторы, задавая электропотребление которых можно добиться управления электропотреблением всего предприятия в заданных пределах.

Условие управляемости общего электропотребления потребителями-регуляторами может быть представлено соотношением:

$$|\Delta P_0(t)| \leq \sum_{i \in I_{pez}} a_i |\Delta P_i(t)|, \quad (2.44)$$

где $\Delta P_0(t)$ - максимально возможное отклонение общей потребляемой мощности от заявленной; $\Delta P_i(t)$ - максимально возможные регулируемые отклонения потребляемой мощности потребителей-регуляторов от плановых значений; a_i – корректирующие коэффициенты.

Условие (2.45) служит основой для выделения потребителей-регуляторов среди всех потребителей предприятия. Для металлургического предприятия обычно подобными потребителями являются дуговые сталеплавильные печи, прокатные станы и другие энергоемкие потребители.

На каждом предприятии имеются средства учета, которые измеряют фактическое W_0^ϕ потребление электроэнергии. В общем случае существует небаланс между фактическим электропотреблением предприятия и суммарным фактическим электропотреблением отдельных потребителей.

$$W_0^\phi \neq \sum_k W_p^\phi + \sum_k W_{np}^\phi, \quad (2.45)$$

где W_p^ϕ – фактическое электропотребление потребителей-регуляторов;
 W_{np}^ϕ – фактическое электропотребление нерегулируемых потребителей.

Оперативное планирование работы потребителей-регуляторов состоит в составлении оперативного расписания работ по критерию минимума уклонения текущего электропотребления $W_0(t)$ от заявленного графика $W_T(t)$. Математически данная задача может быть представлена следующим образом:

$$W_T(t) = \sum a_i \cdot W_p^\phi + \sum W_{np}^\phi, \quad (2.46)$$

где a_i – корректирующие коэффициенты; $W_T(t)$ – требуемая величина электропотребления.

Исходя из этого, возникает задача определения коэффициентов a_i для коррекции фактического значения. Коэффициенты определяются на основе статистики методом наименьших квадратов таким образом, чтобы величина ошибки $E = \left(W_0^\phi - \left(\sum a_i \cdot W_p^\phi + \sum W_{np}^\phi \right) \right)$ была минимальной.

Выводы к разделу 2

1. Разработан метод краткосрочного планирования электропотребления, основанный на интегральной оценке эффективности графиков электропотребления на уровне подразделений металлургического предприятия. В работе в целях разрешения межуровневых противоречий при принятии решений введен агрегированный показатель динамики потребления ресурсов – индекс снижения стоимости, позволяющий согласовать детализованные представления динамики процессов потребления ресурсов на локальных уровнях отдельных технологических процессов и обобщенные представления на верхнем технико-экономическом уровне. Данный показатель является объективным и зависит только от качества составленных графиков электропотребления и формально 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.

2. Предложен новый метод многоуровневого прогнозирования электропотребления, учитывающий несогласованность агрегированных представлений динамики потребления ресурсов на верхнем уровне и высокую степень детализации представления динамики на нижних уровнях при почасовом, основанный на оптимальном построении энергетических характеристик с заданной точностью по критерию минимума технико-экономических потерь. Решение задачи минимизации общей ошибки прогноза потребления электроэнергии предприятием в целом основано на невязке значений фактического общего потребления электроэнергии предприятием, 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.

3. Предложена многоуровневая расчетная схема планирования электропотребления металлургического предприятия, рассмотрены условия выделения потребителей-регуляторов для осуществления оперативно-диспетчерского управления электропотреблением.

3 ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ, АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ И ПРОГРАММНЫЕ ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

3.1 Организация планирования и управления электропотреблением металлургического предприятия

Общая схема организации многоуровневого планирования и управления электропотреблением представлена на рисунке 3.1 [14, 25].

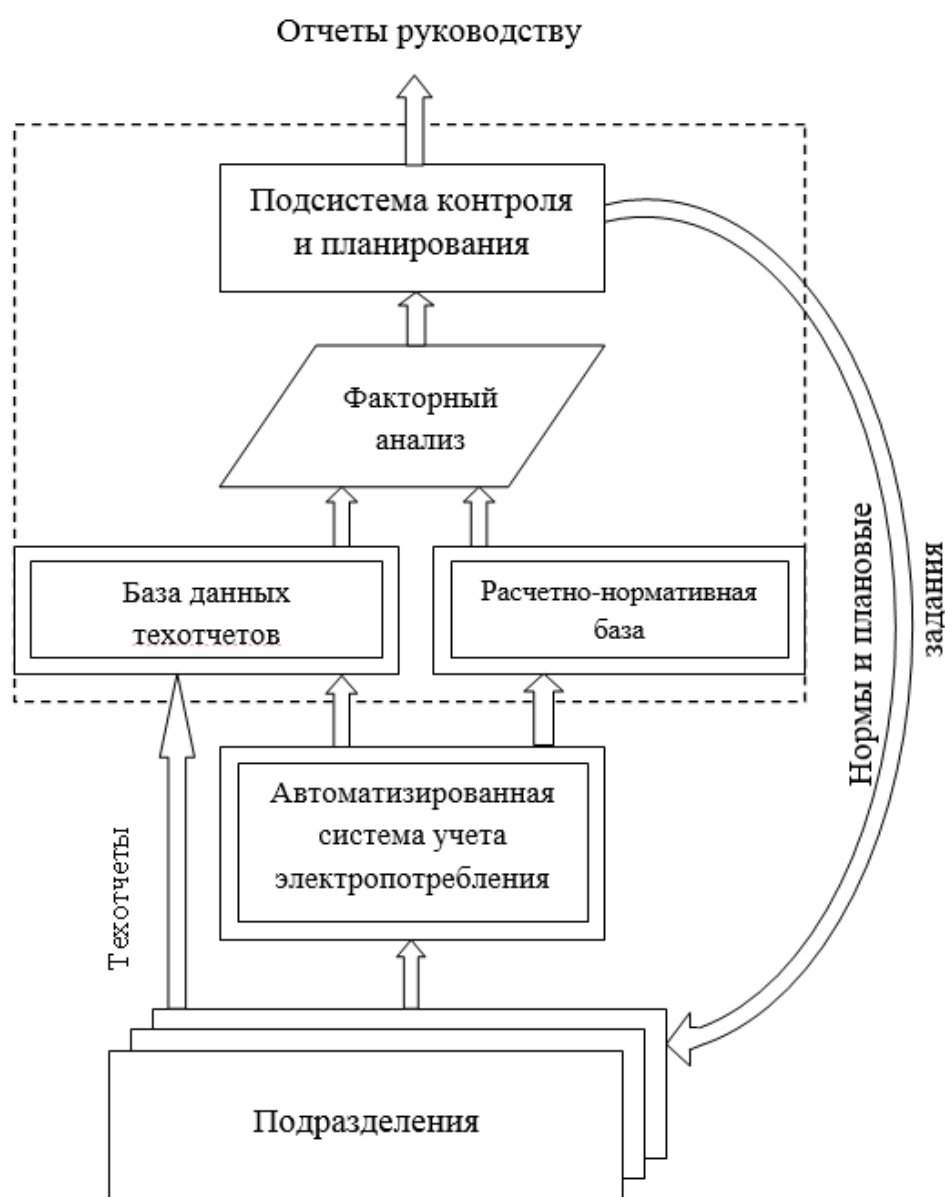


Рис. 3.1. Схема организации многоуровневого планирования и управления электропотреблением

На основе данных автоматизированной системы учета электропотребления и технических отчетов, представляемых подразделениями, формируется информационная база данных технических отчетов об эффективности использования энергетических ресурсов за отчетный период (сутки, месяц, год). С использованием сформированной базы осуществляется текущий контроль эффективности использования электрической энергии подразделениями. При этом также используются данные расчетно-нормативной базы. Текущая информация, содержащаяся в техотчетах, подвергается факторному анализу, при этом выявляются факторы, существенно влияющие на эффективность электропотребления. Выявленные факторы и зависимости используются для построения текущих энергетических характеристик потребителей энергоресурсов. На основе полученных характеристик производится корректировка расчетно-нормативной базы электропотребления. С использованием скорректированной расчетно-нормативной базы на последующий период подразделениям рассчитывается нормы и плановые задания по электропотреблению.

На всех этапах контроля и формирования плановых заданий осуществляется энергетическая экспертиза, целью которой является определение «узких» мест потребления энергетических ресурсов и выявление резервов снижения объемов потребления энергии. Для развязки указанных «узких» мест эксперты с использованием результатов факторного анализа определяют требуемые корректирующие мероприятия. Выполнение предписанных мероприятий служит целям сокращения электропотребления подразделениями.

Общая процедура управления энергетическими затратами предприятия в рамках системы многоуровневого планирования и управления электропотреблением приведена на рисунке 3.2 [28].

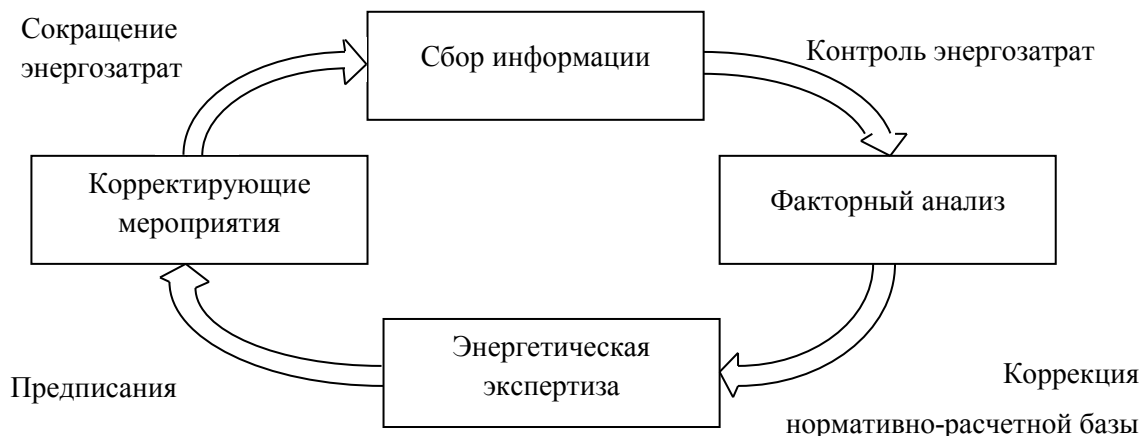


Рис. 3.2. Процедура управления энергетическими затратами

Успех введения системы многоуровневого планирования и управления электропотреблением металлургического предприятия существенно зависит от уровня автоматизации задач. Автоматизация задач планирования и управления электропотреблением позволит ввести строгие и обязательные к исполнению формы технической отчетности как по эффективности использования энергетических ресурсов, так и по выполнению энергосберегающих мероприятий.

Для упрощения процедуры планирования и управления электропотреблением металлургического предприятия в рамках работы разработано программное обеспечение нормирования и оптимального прогноза объемов потребления электрической энергии подразделениями ОАО «ММК» и комбинатом в целом.

В основе программы лежат новые алгоритмы решения задачи минимизации общей ошибки прогноза потребления электроэнергии предприятием в целом. Описание указанных алгоритмов представлено в п.3.2.

3.2 Алгоритмы решения задачи минимизации общей ошибки прогноза потребления электроэнергии предприятием

Разработаны два варианта алгоритма решения задачи минимизации общей ошибки прогноза потребления электроэнергии предприятием в целом в зависимости от варианта поставленной в п. 2.2 задачи.

Вариант 1

1. Задается начальное значение коэффициента регуляризации α_R .
2. Методом наименьших квадратов решается система уравнений вида:

$$y_{it} = a_{i0}^* + a_{i1} \Pi_{it}, \quad i \in [1; N_p], \quad t \in [1; N_t], \quad (3.1)$$

где Π_{it} – количество продукции, произведенной i -ым производственным подразделением за t -ый интервал времени; y_{it} – преобразованный удельный расход электроэнергии i -го производственного подразделения за t -ый интервал времени согласно соотношению:

$$y_{it} = \ln(w_{it}); \quad (3.2)$$

a_{0i}^* - преобразованный коэффициент a_{0i} согласно соотношению:

$$a_{i0}^* = \ln(a_{i0}); \quad (3.3)$$

N_p, N_t – количество соответственно производственных подразделений и интервалов времени.

Система уравнений (3.1) получена на основе следующей экспоненциальной зависимости:

$$w_{it} = \exp(a_{i0} + a_{i1} \Pi_{it}), \quad (3.4)$$

где w_{it} – удельный расход электроэнергии i -го производственного подразделения предприятия за t -ый интервал времени; W_{it} – полное потребление электроэнергии i -ым производственным подразделением за t -ый интервал времени.

Результатом решения системы уравнений (3.1) являются значения коэффициентов a_{i0} , a_{i1} для каждого i -го производственного подразделения.

3. Вычисляются значения регулярных коэффициентов a_0^r , a_i^r по соотношениям:

$$a_i^r = \frac{w_{iT} + a_{i1}W_{iT}}{W_{0T}^r}; \quad (3.5)$$

$$a_0^r = \ln(W_{0T}^r) - \sum_{i=1}^{Np} a_i^r \Pi_{iT}, \quad (3.6)$$

где w_{iT} , W_{iT} – соответственно удельный и полный расход электроэнергии для i -го производственного подразделения в терминальной точке прогноза t_T ; W_{0T}^r – расход электроэнергии для предприятия в целом в терминальной точке прогноза t_T , определяемый по соотношению:

$$W_{0T}^r = \sum_{i=1}^{Np} W_{iT}. \quad (3.7)$$

4. Методом Гаусса решается система уравнений:

$$(1 - \alpha_R) \sum_{j=0}^{Np} c_{ij} a_j + \alpha_R a_i = (1 - \alpha_R) d_i + \alpha_R a_i^r, \quad i \in [0; N_p], \quad (3.8)$$

$$c_{ij} = M_t \{ \Pi_{it}^\phi \Pi_{jt}^\phi \}; \quad (3.9)$$

$$d_i = M_t \{ \ln(W_{0t}^\phi) \Pi_{it}^\phi \}. \quad (3.10)$$

Здесь: $M_t \{ \cdot \}$ – математическое ожидание; W_{0t}^ϕ – фактическое значение потребления электроэнергии предприятием за t -ый интервал времени; Π_{it}^ϕ – фактическое значение количества продукции, произведенной i -ым производственным подразделением за t -ый интервал времени.

Результатом решения системы уравнений (3.8) являются значения коэффициентов a_i для каждого i -го производственного подразделения.

5. Определяется значение общей ошибки прогноза потребления электроэнергии (при значениях коэффициентов a_i , определенных в п. 4 настоящего алгоритма) по соотношению:

$$E_0^2 = M_t \left\{ \left[\ln(W_{0t}^\phi) - \sum_{i=0}^{Np} a_i P_{it}^\phi \right]^2 \right\}. \quad (3.11)$$

6. Вычисленное в п. 5 значение общей ошибки прогноза потребления электроэнергии на настоящей итерации E_0^k сравнивается с аналогичным значением, полученным на предыдущей итерации алгоритма E_0^{k-1} .

Если $E_0^k < E_0^{k-1}$, то осуществляется переход к п. 7. В противном случае необходимо вернуться к значениям переменных на предыдущей итерации и перейти к п. 8.

В случае первой итерации алгоритма сравнение не выполняется, а сразу осуществляется переход к п. 7.

7. Изменяется значение коэффициента регуляризации α_R и осуществляется переход к п. 4.

8. Конец алгоритма.

В результате действий согласно приведенному выше алгоритму определяются значения коэффициентов a_i для каждого i -го производственного подразделения предприятия, при которых квадрат общей ошибки (3.11) прогноза потребления электроэнергии предприятием в целом является минимальным.

Алгоритм решения задачи минимизации общей ошибки прогноза потребления электроэнергии предприятием по варианту 1 иллюстрируется рис. 3.3.

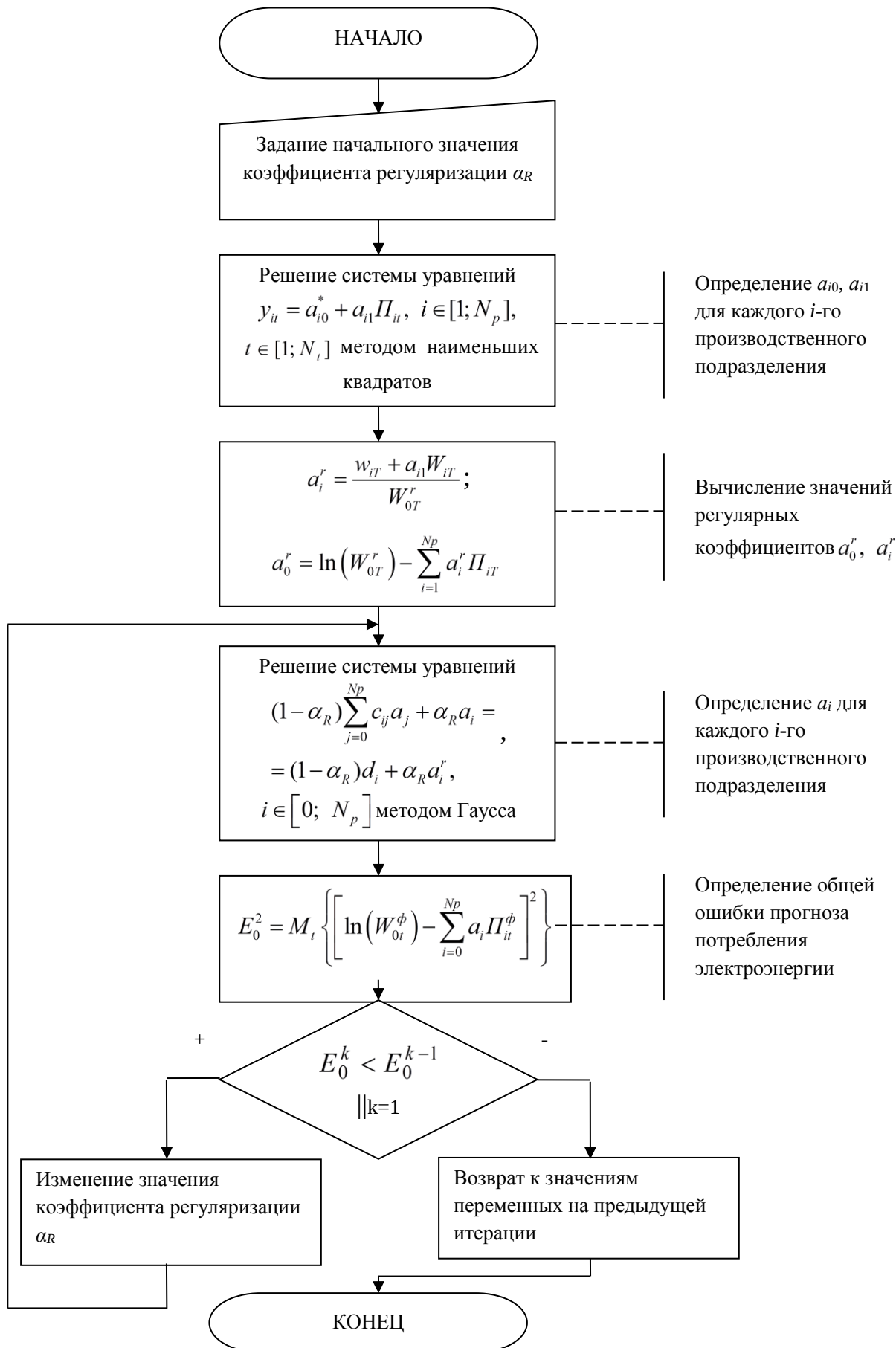


Рис. 3.3.

Вариант 2

1. Задается начальное значение коэффициента регуляризации α .
2. Методом наименьших квадратов решается система уравнений вида:

$$y_{it} = a_{i0}^* + a_{i1} \Pi_{it}, \quad i \in [1; N_p], \quad t \in [1; N_t]. \quad (3.12)$$

Результатом решения системы уравнений (3.12) являются значения коэффициентов a_{i0} , a_{i1} для каждого i -го производственного подразделения.

3. Задаются номинальные значения корректирующих коэффициентов:

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

4. Методом Гаусса решается система уравнений:

$$(1 - \alpha) \sum_{j=0}^{N_p} c_{ij} a_j + \alpha a_i = (1 - \alpha) d_i + \alpha a_i^H, \quad i \in [0; N_p], \quad (3.13)$$

где

$$c_{ij} = M_t \{ W_{it}^P W_{jt}^P \};$$

$$d_i = M_t \{ W_{0t}^\phi W_{it}^P \}.$$

Здесь W_{0t}^ϕ - фактическое значение потребления электроэнергии предприятием за t -ый интервал времени; W_{it}^P - частные расходы электроэнергии i -ых производственных подразделений, определяемые для каждого t -го момента времени на основе соотношения:

$$W_{it} = \Pi_{it} \exp(a_{i0} + a_{i1} \Pi_{it}); \quad (3.14)$$

Результатом решения системы уравнений (3.13) являются значения корректирующих коэффициентов a_i для каждого i -го производственного подразделения.

5. Определяется значение общей ошибки прогноза потребления электроэнергии (при значениях корректирующих коэффициентов a_i , определенных в п. 4 настоящего алгоритма) по соотношению:

$$E_0^2 = M_t \left\{ \left(W_{0t}^\phi - \sum_{i=0}^{Np} a_i W_{it}^p \right)^2 \right\}. \quad (3.15)$$

6. Вычисленное в п. 5 значение общей ошибки прогноза потребления электроэнергии на настоящей итерации E_0^k сравнивается с аналогичным значением, полученным на предыдущей итерации алгоритма E_0^{k-1} .

Если $E_0^k < E_0^{k-1}$, то осуществляется переход к п. 7. В противном случае необходимо вернуться к значениям переменных на предыдущей итерации и перейти к п. 8.

В случае первой итерации алгоритма сравнение не выполняется, а сразу осуществляется переход к п. 7.

7. Изменяется значение коэффициента регуляризации α и осуществляется переход к п. 4.

8. Конец алгоритма.

В результате действий согласно приведенному выше алгоритму определяются значения корректирующих коэффициентов a_i для каждого i -го производственного подразделения предприятия, при которых квадрат общей ошибки (3.15) прогноза потребления электроэнергии.

Алгоритм решения задачи минимизации общей ошибки прогноза потребления электроэнергии предприятием по варианту 2 иллюстрируется рис. 3.4.

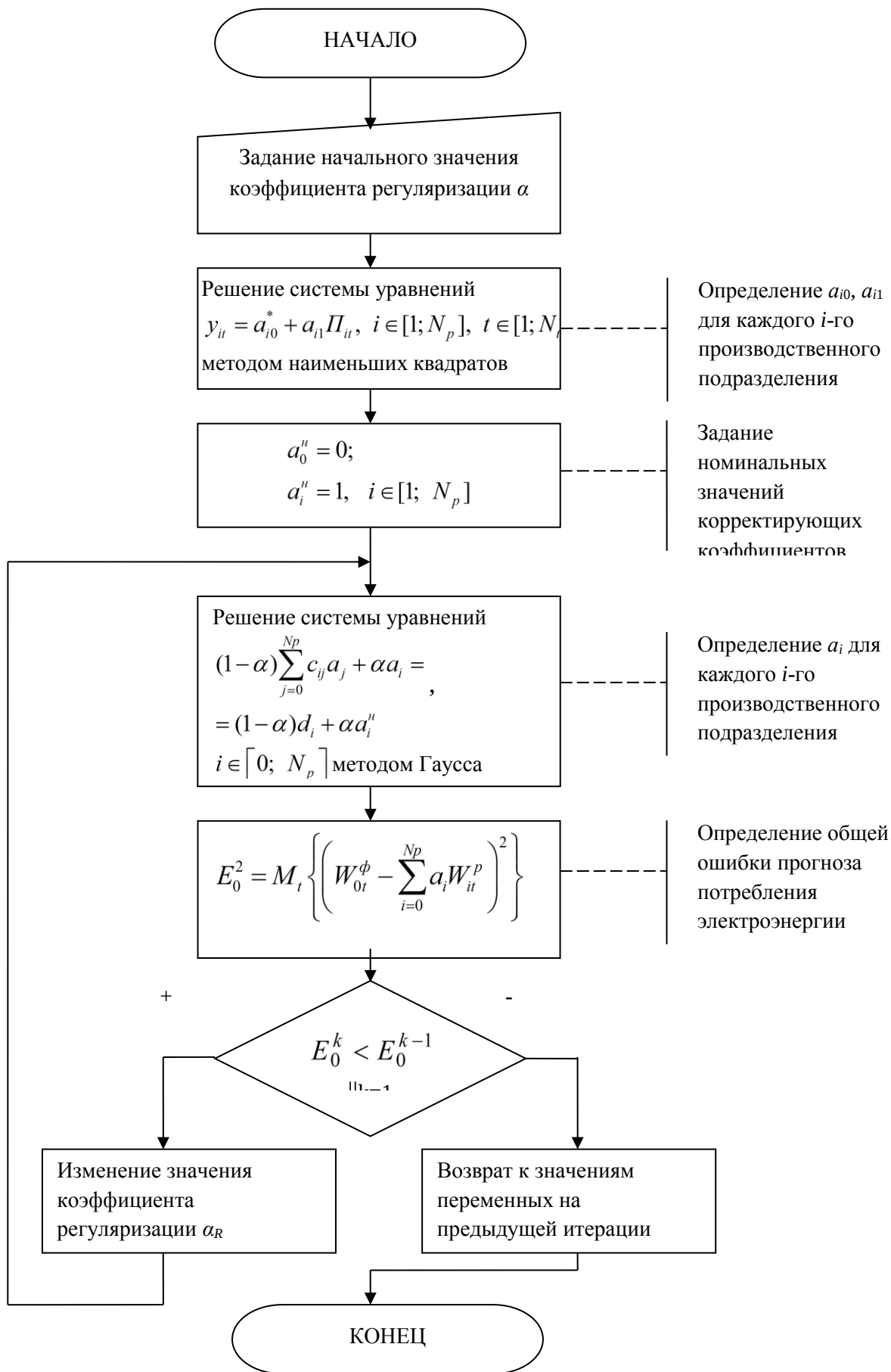


Рис. 3.4

3.3 Программное обеспечение оптимального прогноза объемов потребления электроэнергии подразделениями ОАО «ММК» и комбинатом в целом

С целью упрощения процедуры планирования и управления электропотреблением металлургического предприятия разработано программное обеспечение, которое позволяет централизованно хранить данные о фактическом удельном расходе электроэнергии и объемах произведенной продукции за неограниченный промежуток времени для каждого подразделения предприятия, настраивать права доступа персонала к наборам данных, выполнять расчет зависимостей для получения коэффициентов a_{i0} и a_{i1} , отображать на экране и выводить на печать графики зависимостей. В рамках работы разработано программное обеспечение нормирования и оптимального прогноза объемов потребления электрической энергии подразделениями ОАО «ММК» и комбинатом в целом.

Высокая точность прогнозирования объёмов потребления электроэнергии достигается за счёт:

- формирования функциональной зависимости удельного расхода электроэнергии от объёма производства на основе математической обработки отчётных данных о фактических объёмах производства и удельных расходах электроэнергии;
- обеспечения обработки данных из набора на переменную глубину;
- формирования сезонных зависимостей удельного расхода электроэнергии от объёмов производства («зимняя» и «летняя» зависимости).

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 энергоёмкости подразделений и резервов снижения потребления электроэнергии.
- ввод, регистрация и хранение данных об объёмах производства и удельных расходов электроэнергии для каждого нормируемого структурного подразделения.
- обеспечение возможности исключения части данных из расчёта для получения более обоснованной зависимости;
- применение критериев выборки для формирования зависимостей с учётом дополнительных факторов;
- обеспечение возможности создания и модификации многоуровневой иерархии объектов нормирования, соответствующей технологической структуре предприятия;
- обеспечение одновременного обращения к наборам данных с нескольких рабочих мест с разграничением прав доступа;
- формирование функциональных зависимостей потребляемой мощности и удельного расхода электроэнергии от объёма производства;
- сравнение показателей предшествующими и средними величинами за заданный временной интервал.

Окно работы программы представлено на рисунке 3.5 [4, 5].

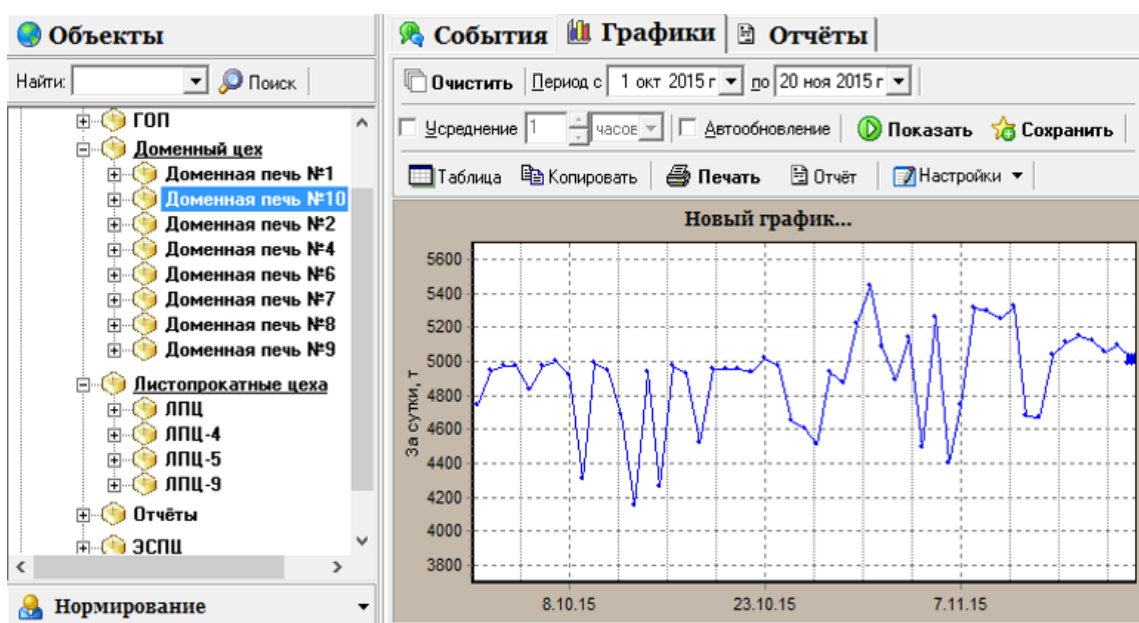


Рис. 3.5. Окно работы программы

Интерфейс пользователя включает в себя два основных раздела: дерево параметров слева и область работы с данными справа. В свою очередь, область работы с данными состоит из 2 разделов: «Графики» и «Отчеты».

Программа обеспечивает возможность создания и модификации многоуровневой иерархии объектов нормирования, соответствующей технологической структуре предприятия. В левой части окна работы программы, приведенного на рисунке 3.5, объекты потребления электрической энергии представлены в виде списка – дерева параметров. Древоподобная структура позволяет описывать объекты нормирования, группы объектов и их иерархию. Объектом электропотребления является нормируемое структурное подразделение (участок, агрегат). Группы объектов служат для объединения нескольких объектов по определенному признаку (например, основное производство, вспомогательное и т.д.), а также для создания иерархии, которая бы соответствовала технологической структуре предприятия. Группа объектов может содержать как объекты, так и вложенные группы объектов. В разделе «Адрес» дерева параметров содержится перечень подразделений (цехов), агрегатов, контуров, например, «Доменный цех». Внутри каждого элемента с наименованием пункта цеха (агрегата, контура) сгруппированы нормируемые параметры, связанные с ним

Функциональные зависимости удельного расхода электроэнергии от объёма производства за месяц формируются на основе математической обработки статистических данных, полученных не при контролируемом активном эксперименте, а в условиях реального производства, которое характеризуется значительными колебаниями объёмов выпускаемой продукции, различным по интенсивности влиянием большого количества других производственных факторов. При обработке набора фактических результатов работы предусматривается возможность пометить часть анализируемых данных с тем, чтобы они не принимались в расчёт, причём согласно одной метке помеченные данные полностью игнорируются, а согласно другой – принимаются «к сведению». В последнем случае помеченные данные в формировании зависимости не участвуют, но на экране

монитора высвечиваются, что даёт возможность визуально проконтролировать степень согласованности их с формируемой зависимостью.

Указанные выше обстоятельства, определяющие разброс фактических удельных расходов электроэнергии, обуславливают также необходимость определения зоны допустимых отклонений. Эта зона формируется одновременно с зависимостью, а ширину её (в процентах) целесообразно выбирать таким образом, чтобы в неё входило приблизительно 15 % точек (значений), принимаемых в расчёт при формировании зависимости.

Пример зависимости для цеха холодного проката в летний период приведён на рис. 3.6.

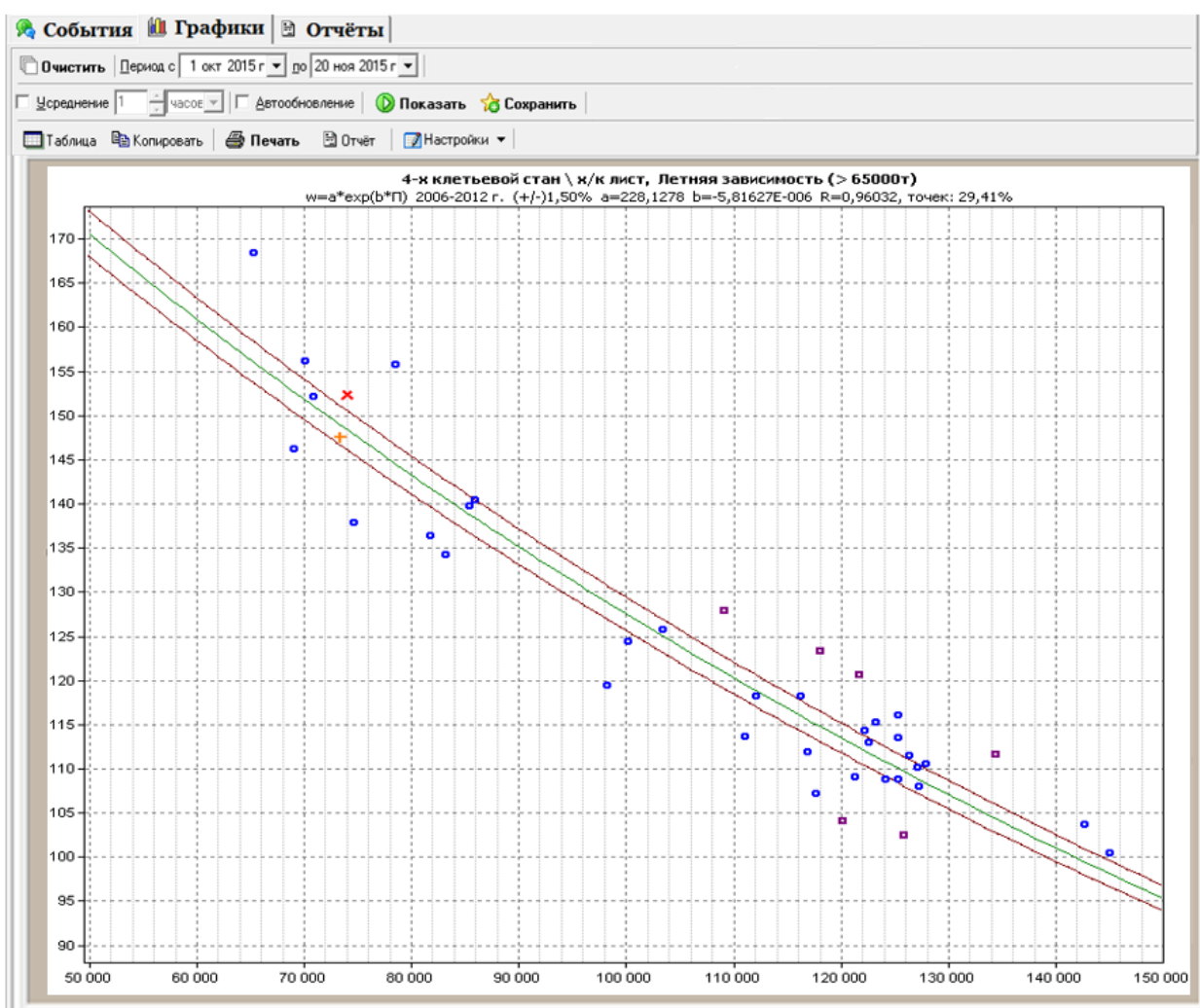


Рис. 3.6. Зависимость для холодного проката в летний период

На рис. 3.6 представлена сформированная зависимость удельного расхода электроэнергии от объёма производства и одновременно в виде точек, наложенных на графическое изображение зависимости, визуализирована база данных, на которых построена зависимость, а над нею – характеристики зависимости, в том числе значения коэффициентов a и b , коэффициента корреляции R зависимости, зоны допустимых отклонений и глубины базы для формирования зависимости.

Набор данных, на базе которых формируется зависимость, регулярно дополняется новыми значениями по итогам каждого прошедшего месяца. Целесообразно формировать зависимость на базе данных за последние три-четыре года. Для реализации этого положения в программе предусмотрена возможность выбирать в наборе данных интервал для формирования зависимости путём указания значений начального и конечного периодов. Сам же исходный набор данных сохраняется неизменным с момента начала его формирования, что создаёт дополнительные возможности для сравнения и анализа данных за различные периоды времени, в частности, для оценки результатов внедрения различных энергосберегающих мероприятий. В результате можно формировать наиболее объективную зависимость удельного расхода электроэнергии от объёма производства для нормирования электропотребления, в некоторых случаях выявлять ошибки в отчётных данных, обнаруживать сбои в работе счётчиков.

Наличие набора данных и инструмента их математической обработки позволяет определять долю постоянной составляющей в электропотреблении производственных подразделений. Введённые с этой целью дополнения в программу дают возможность получать зависимость средней мощности (P), потребляемой производственным подразделением за интервал, от объёма производимой продукции. Потребляемая подразделением мощность при нулевом объёме производства не теряет смысла (в отличие от удельного расхода электроэнергии) и является эквивалентом постоянной составляющей электропотребления. Кроме создания предпосылок для решения задачи определения и анализа тенденций изменения доли постоянной составляющей,

рассматриваемая зависимость предоставляет дополнительную возможность определения объективности анализируемых данных.

В программе осуществляется ведение информационной базы отчетов и их просмотр. В дерево параметров включен раздел «Отчеты», содержащий сводные отчеты по потреблению электрической энергии подразделениями и предприятием в целом. Раздел предназначен для отображения архивных данных согласно согласованной с Заказчиком отчетной форме в формате электронных таблиц MS Excel.

Для построения отчета необходимо перейти на вкладку «Отчеты» и выбрать интервал дат для построения отчета. Для выборки архива параметров укажите начальную дату в поле «Период с» и конечную дату в поле «по» (см. рис. 3.7).

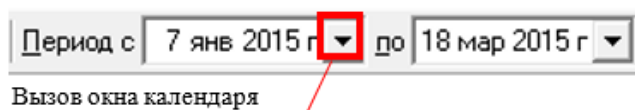


Рис. 3.7. Даты выборки архивов параметров

Далее, в дереве параметров нужно выбрать требуемый пункт типа «Шаблон отчета» и в панели инструментов вкладки «Отчеты» нажать кнопку «Показать». В результате в рабочей области вкладки «Отчеты» будет отображен заполненный шаблон отчета. Пример отчета о потреблении электроэнергии производственными подразделениями ОАО "ММК" представлен на рисунке 3.8.

Представленный отчет содержит следующие данные [25, 28]:

- Год;
- Цех – название цеха;
- Объем производства (плановый и фактический);
- Расход электрической энергии:
 - план – плановый расход электрической энергии, рассчитываемый на основе факторного анализа по плановому объему производства и заданных значениях базовых технологических факторов;

- план/факт – плановый расход электрической энергии, рассчитываемый на основе факторного анализа по фактическому объему производства;
 - факт – фактическое потребление электроэнергии соответствующим цехом.
- Удельный расход электроэнергии (плановый и фактический);
 - Перерасход электроэнергии;
 - Удельный перерасход электроэнергии, %.

 События  Графики  Отчёты									
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		
	ККП		133697950,0		1550060782,0		1159,375		
	ККЦ		860028,0		35202228,0		4093,149		
	КХП		5354100,0	24162389,6	282569167,0		5277,622		
	ПВЭС		809662720,0		111932514,0		13,825		
	ТЭЦ	2515080100,0	2515081000,0	286802540,1	290321755,0	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. 3.8. Пример отчета о потреблении электроэнергии

Разработанное программное обеспечение передано в лабораторию анализа и управления энергоресурсами ЦЭСТ и в отдел нормирования энергоресурсов Технологического управления ОАО «ММК» и используется при решении задач нормирования и управления электропотреблением промплощадки ОАО «ММК».

Выводы к разделу 3

1. Предложена схема организации многоуровневого планирования и управления электропотреблением металлургического предприятия. Управление энергетическими затратами предприятия в рамках представленной схемы представляет собой непрерывный процесс, включающий этапы сбора информации, построения зависимостей электропотребления, энергетической экспертизы и корректирующие мероприятия.

2. Предложены новые алгоритмы решения задачи минимизации общей ошибки прогноза потребления электроэнергии предприятием в целом для упрощения процедуры планирования и управления электропотреблением металлургического предприятия. В результате действий согласно разработанным алгоритмам, определяются значения корректирующих коэффициентов для каждого производственного подразделения предприятия, при которых квадрат общей ошибки прогноза потребления электроэнергии предприятием в целом является минимальным.

3. В целях поддержки принятия решений по многоуровневому планированию и управлению электропотреблением металлургического предприятия разработано программное обеспечение нормирования и оптимального прогноза объемов потребления электрической энергии подразделениями ОАО «ММК» и комбинатом в целом. Разработанное программное обеспечение позволяет централизованно хранить данные о фактическом удельном расходе электроэнергии и объемах произведенной продукции за неограниченный промежуток времени для каждого подразделения предприятия, выполнять расчет зависимостей для получения корректирующих коэффициентов, отображать на экране и выводить на печать графики зависимостей, а также позволяет создавать многоуровневую иерархию объектов нормирования, соответствующую технологической структуре предприятия. Реализована возможность ведения информационной базы отчетов и их просмотра.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОВ ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

4.1 Результаты проведения экспериментальных исследований метода среднесрочного планирования электропотребления на реальных данных ОАО «ММК»

Проведение экспериментальных исследований по среднесрочному планированию объемов потребления электрической энергии на месяц вперед подразделениями ОАО «ММК» и комбинатом в целом осуществлялось на основе исходных данных, предоставленных ЦЭСТ ОАО «ММК».

Решение задачи минимизации общей ошибки прогнозирования потребления электрической энергии согласно алгоритмам, проводилось для следующих блоков данных:

I. Основные виды продукции, выпускаемые производственными подразделениями ОАО «ММК», к которым относятся:

- прокат горячий, т;
- сталь ДСА, т;
- электросталь ЭСПЦ, т;
- руда железная, т;
- агломерат, т;
- кокс, т;
- чугун, т;
- сталь конвертерная, т;
- известь;
- электроэнергия, кВт·ч;
- тепло станций, Гкал;
- дутье, тыс. м³;
- кислород, тыс. м³;
- сжатый воздух, тыс. м³;
- вода техническая, тыс. м³.

II. Виды продукции, выпускаемые цехами металлургического производства: доменным цехом, кислородно-конвертерным цехом, электросталеплавильным цехом, к которым относятся:

- чугун, т;
- сталь, т;
- т стали, электродуговой нагрев;
- т стали, печь-ковш ККЦ;
- т стали, печь-ковш №1;
- т стали, печь-ковш №2;
- т готовой продукции МНЛЗ №6;
- сталь ДСА, т;
- сталь ДСП, т.

III. Виды продукции, выпускаемые электрическими станциями ОАО «ММК»: ТЭЦ, ЦЭС, ПВЭС, к которым относятся:

- выработка э/э, кВт ч (ТЭЦ);
- тепло с острым паром ККП, Гкал (ТЭЦ);
- тепло с горячей водой, Гкал (ТЭЦ);
- химводоочистка, м³ воды (ТЭЦ);
- береговая насосная, 1000м³ т/воды (ТЭЦ);
- выработка электроэнергии, кВт ч (ЦЭС);
- тепло с горячей водой, Гкал (ЦЭС);
- тепло с паром, Гкал (ЦЭС);
- химводоочистка, м³ отпущен. ХОВ (ЦЭС);
- выработка электроэнергии, кВт ч (ПВЭС);
- выработка дутья, м³ (ПВЭС);
- тепло отпущенное, Гкал (ПВЭС);
- с/нужды котельной (ПВЭС).

Для указанных блоков данных прогнозирование общего расхода электроэнергии для предприятия в целом осуществлялось следующим образом.

Прежде всего, необходимо определить выборки данных из общего объема реальных данных эксплуатации, на которых впоследствии будет осуществляться прогноз общего расхода электроэнергии для предприятия в целом. Дело в том, что аналитическая зависимость общего расхода электроэнергии от объема производства (для варианта 1) или от суммы расходов электроэнергии отдельными производственными подразделениями (для варианта 2) формируется на основе математической обработки статистических данных, полученных в условиях реального производства, которое характеризуется значительными колебаниями объемов выпускаемой продукции, различным по интенсивности влиянием большого количества других производственных факторов.

В связи с выше сказанным, необходимо исключить из рассмотрения те данные при прогнозировании общего расхода электроэнергии, которые характеризуются значительными отклонениями.

Следующим шагом является построение матрицы коэффициентов корреляции значений выработки продукции с ошибкой прогнозирования потребления электроэнергии, определяемой как разность между фактическим и расчетным потреблением электроэнергии за месяцы, предшествующие терминальной точке прогноза. На основе полученных коэффициентов корреляции можно исключить из рассмотрения некоторые виды продукции, влияние выработки которых на ошибку прогнозирования потребления электроэнергии является более низким по сравнению с другими. Данное действие необходимо для корректного формирования выборки статистики, а именно, чтобы количество точек статистики превышало количество факторов (видов вырабатываемой продукции). Более низким влияние выпуска некоторого вида продукции является тогда, когда коэффициент корреляции принимает значение по абсолютной величине меньше 0,3. В случае исключения из рассмотрения некоторого вида продукции необходимо из общего фактического потребления электроэнергии вычесть фактическое потребление электроэнергии для выпуска исключаемого вида продукции.

Далее для выборки данных с использованием разработанных алгоритмов, приведенных в п. 2.2, определяются коэффициенты a_i : для варианта 1 при решении системы уравнений (2.25); для варианта 2 при решении системы уравнений (2.30).

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

1. для варианта 1 по соотношению (2.31):

$$W_{0T}^{np} = \exp\left(\sum_{i=0}^{Np} a_i \Pi_i^{nl}\right),$$

где Π_i^{nl} - плановое значение выпуска i -ой продукции;

2. для варианта 2 по соотношению (2.32):

$$W_{0T}^{np} = \sum_{i=0}^{Np} a_i W_{iT}^p,$$

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

4.1.1 Экспериментальные исследования для основных видов продукции

Расчеты проводились на данных зимнего периода (с октября по март) 2010-2012 гг.

На первом шаге были исключены данные, характеризующиеся более сильными отклонениями от средних значений.

Далее с помощью встроенных средств Excel сформирована матрица коэффициентов корреляции значений выработки продукции с ошибкой прогнозирования потребления электроэнергии, приведенная в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Матрица коэффициентов корреляции

№ показателя	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	1,00																
2	-0,05	1,00															
3	0,74	-0,41	1,00														
4	0,23	-0,14	0,20	1,00													
5	0,64	0,43	0,19	0,33	1,00												
6	0,61	0,17	0,27	0,39	0,50	1,00											
7	0,82	0,33	0,33	0,21	0,77	0,82	1,00										
8	0,66	0,10	0,06	0,16	0,64	0,66	0,82	1,00									
9	0,70	0,20	0,43	0,48	0,76	0,63	0,71	0,51	1,00								
10	-0,19	0,29	-0,28	0,27	0,29	0,19	0,12	0,03	0,37	1,00							
11	0,05	0,01	0,39	0,34	-0,09	0,19	0,00	-0,42	0,21	0,39	1,00						
12	0,77	0,42	0,35	0,06	0,67	0,64	0,87	0,63	0,74	0,06	0,00	1,00					
13	0,71	0,26	0,18	0,38	0,77	0,67	0,86	0,87	0,60	0,18	-0,12	0,63	1,00				
14	0,44	0,08	0,31	0,68	0,42	0,68	0,53	0,35	0,74	0,55	0,58	0,43	0,52	1,00			
15	0,31	0,18	0,11	0,28	0,63	0,16	0,34	0,28	0,78	0,41	-0,12	0,48	0,26	0,38	1,00		
16	-0,02	0,18	-0,42	-0,09	0,25	-0,14	0,01	0,39	0,13	0,02	-0,64	0,19	0,21	-0,06	0,43	1,00	
17	-0,39	-0,16	-0,40	0,05	-0,31	0,23	-0,17	0,06	-0,34	0,12	-0,04	-0,38	-0,03	-0,04	-0,47	-0,14	1,00

Здесь порядковый номер показателя соответствует следующему виду продукции: 1 – прокат горячий; 2 - сталь ДСА; 3 - электросталь ЭСПЦ; 4 - руда железная; 5 - агломерат; 6 - кокс; 7 - чугун; 8 - сталь конвертерная; 9 - известь; 10 - электроэнергия; 11 - тепло станций; 11 - дутье; 12 - кислород; 13 - сжатый воздух; 14 - вода техническая.

Как видно из таблицы 4.1, на ошибку прогнозирования потребления электроэнергии оказывают влияние выработки следующих видов продукции: прокат горячий, электросталь ЭСПЦ, агломерат, известь, дутье, вода техническая, т.к. коэффициент корреляции указанных показателей выше по абсолютной величине, чем 0,3.

Виды продукции, оказывающие более низкое влияние (коэффициент корреляции которых ниже по абсолютной величине, чем 0,3), можно исключить из рассмотрения, предварительно уменьшив значение общего фактического потребления электроэнергии на величину фактического потребления электроэнергии для выпуска этих видов продукции.

В таблице 4.3 приведена выборка статистических данных по выработке основных видов продукции, выпускаемых производственными подразделениями ОАО «ММК», расходу электроэнергии для выработки основных видов продукции и общему расходу электроэнергии за зимний период (с октября по март) 2010-2012 гг.

Определение коэффициентов a_i осуществлялось на основе данных, приведенных в таблице 4.3, за исключением данных за март 2012 г., т.к. этот месяц был принят в качестве терминальной точки прогноза. Для указанной выборки получены значения коэффициентов a_i , приведенные в таблице 4.2.

Таблица 4.2

Наименование показателя	Вариант 1	Вариант 2
a_0	18,81177	5760847,0001
a_1	-5,46E-07	1,0724
a_2	2,09E-06	0,9801
a_3	-3,07E-07	0,7816
a_4	6,33E-06	1,5386
a_5	2,07E-07	0,6057
a_6	4,00E-07	0,7382

Таблица 4.3

Выборка статистических данных

№ п/п	Наименование продукции		Дата								
			Март 2010	Октябрь 2010	Январь 2011	Февраль 2011	Март 2011	Октябрь 2011	Ноябрь 2011	Декабрь 2011	Март 2012
1	Прокат горячий, т	Выработка продукции	1008151	907434	1081503	963896	926736	970731	880480	913577	1023057
		Расчет. расход э/э, кВт·ч	114524271	108280981	118094091	105748252	107627037	114373471	110235202	114449766	119730914
		Факт. расход э/э, кВт·ч	114344715	107647609	118062041	105229148	106245705	113929626	109973463	113929862	119346847
2	Электро- сталь ЭСПЦ, т	Выработка продукции	124312	55759	217028	191167	31375	100555	80780	137465	151812
		Расчет. расход э/э, кВт·ч	45248193	23612707	78122734	77210308	12137810	38277128	30245504	50604132	52791811
		Факт. расход э/э, кВт·ч	44741795	23536921	77789593	77203213	13420062	38360033	29997809	49195646	52434873
3	Агломерат, т	Выработка продукции	956283	975235	1001011	900562	972076	919286	941320	958099	950776
		Расчет. расход э/э, кВт·ч	33491051	33359061	34929379	30948691	34103700	34279346	34341777	35706178	34163262
		Факт. расход э/э, кВт·ч	33033198	33208160	34871540	30861408	33795759	34173609	34323499	35535585	34058487
4	Известь	Выработка продукции	84932	84780	89623	78702	83272	85652	80076	83938	85002
		Расчет. расход э/э, кВт·ч	4998824	4837646	5098717	4686524	4815913	4866987	4631302	4828385	4933687
		Факт. расход э/э, кВт·ч	4949362	4771332	5064514	4656336	4724952	4861598	4603568	4826471	4903565

Окончание таблицы 4.3

№ п/п	Наименование продукции		Дата								
			Март 2010	Октябрь 2010	Январь 2011	Февраль 2011	Март 2011	Октябрь 2011	Ноябрь 2011	Декабрь 2011	Март 2012
5	Дутье, тыс. м ³	Выработка продукции	2044730	1860298	1978526	1748705	1959042	1994930	1866035	1835234	2094393
		Расчет. расход э/э, кВт·ч	4137879	3701993	3858719	3514897	4036410	4049708	3917588	3822005	4356337
		Факт. расход э/э, кВт·ч	4137050	3653202	3773947	3507702	4155641	4079432	3917588	3822005	4273566
6	Вода техничес- кая, тыс. м ³	Выработка продукции	161998	172822	159374	152506	160040	169675	160061	170080	161468
		Расчет. расход э/э, кВт·ч	28310000	28880406	28485112	26232001	28471598	29523504	28364857	29338901	28673861
		Факт. расход э/э, кВт·ч	28293026	29229382	28483237	26231047	28471079	29523504	28362854	29338745	28579872
	Фактич. общий расход э/э, кВт·ч		229499146	202046606	268044872	247688854	190813198	224927802	211178781	236648314	243597210

С использованием полученных коэффициентов a_i и реальных данных в терминальной точке прогноза можно вычислить прогнозное значение общего расхода электроэнергии соответственно по соотношениям (2.31) и (2.32):

3. для варианта 1:

$$W_{0\text{ддек1}}^{\text{пр1}} = 244\,062\,967;$$

4. для варианта 2

$$W_{0\text{ддек1}}^{\text{пр1}} = 243\,995\,363.$$

В таблице 4.4 приведены сводные данные по общему расходу электроэнергии на выработку выбранных видов продукции. В таблице 4.4 приняты следующие обозначения: $W_0^{\text{вар1}}$, $W_0^{\text{вар2}}$, $W_0^{\text{ММК}}$ -общий расход электроэнергии, определенный соответственно на основе первого варианта расчетов, второго варианта расчетов и методики, используемой в настоящее время на ОАО «ММК»; $W_0^{\text{факт}}$ -фактический общий расход электроэнергии.

Таблица 4.4

Дата	$W_0^{\text{вар1}}$	$W_0^{\text{вар2}}$	$W_0^{\text{факт}}$	$W_0^{\text{ММК}}$
1	2	3	4	5
Март 2010	229 525 010	230 192 581	229 499 146	230 710 218
Октябрь 2010	201 832 679	202 099 339	202 046 606	202 672 794
Январь 2011	267 899 925	267 477 602	268 044 872	268 588 751
Февраль 2011	247 743 648	247 726 929	247 688 854	248 340 672
Март 2011	191 087 905	190 601 416	190 813 198	191 192 467
Октябрь 2011	224 887 716	224 454 526	224 927 802	225 370 144
Ноябрь 2011	210 835 837	210 896 137	211 178 781	211 736 231
Декабрь 2011	237 034 663	237 399 045	236 648 314	238 749 367
Март 2012 (точка прогноза)	244 062 967	243 995 363	243 597 210	244 649 872

В таблице 4.5 приведены данные по отклонениям общего расчетного по разным вариантам расхода электроэнергии на выработку выбранных основных видов продукции от фактического значения. В таблице 3.5 приняты следующие обозначения: $E_0^{\text{вар1}}$, $E_0^{\text{вар2}}$, $E_0^{\text{ММК}}$ -отклонение общего расхода электроэнергии, определенного соответственно на основе первого варианта расчетов, второго варианта расчетов и методики, используемой в настоящее время на ОАО «ММК», от фактического значения.

Таблица 4.5

Дата	$E_0^{вар1}$	$E_0^{вар2}$	$E_0^{ММК}$
1	2	3	4
Март 2010	-25 864	-693 435	-1 211 072
Октябрь 2010	213 927	-52 733	-626 188
Январь 2011	144 947	567 270	-543 879
Февраль 2011	-54 794	-38 075	-651 819
Март 2011	-274 707	211 782	-379 269
Октябрь 2011	40 087	473 277	-442 341
Ноябрь 2011	342 944	282 644	-557 450
Декабрь 2011	-386 348	-750 730	-2 101 052
Март 2012 (точка прогноза)	-465 757	-398 153	-1 052 662

Определим приведенную погрешность прогноза потребления электроэнергии ОАО «ММК» для выбранной точки(март 2012 г.):

$$\frac{|W_{фиб} - W_{нлиб}|}{W_{нлиб}} = \frac{|243\,597\,210 - 244\,649\,872|}{244\,649\,872} = 0,00430.$$

Определим приведенную погрешность прогноза потребления электроэнергии на основе разработанных алгоритмов для выбранной точки (март 2012 г.):

- для варианта 1

$$\frac{|W_{фиб} - W_{нлиB1}|}{W_{нлиB1}} = \frac{|243\,597\,210 - 244\,062\,967|}{244\,062\,967} = 0,00191;$$

- для варианта 2:

$$\frac{|W_{фиб} - W_{нлиB2}|}{W_{нлиB2}} = \frac{|243\,597\,210 - 243\,995\,363|}{243\,995\,363} = 0,00163.$$

Из приведенных расчетов видно, что точность прогноза потребления электроэнергии на основе разработанных алгоритмов выше по сравнению с точностью прогноза потребления электроэнергии по методике, принятой в настоящее время на ОАО «ММК».

4.1.2 Экспериментальные исследования для цехов металлургического производства

В таблице 4.7 приведена выборка статистических данных по выработке видов продукции, выпускаемых цехами металлургического производства ОАО «ММК» (доменным цехом, кислородно-конвертерным цехом, электросталеплавильным цехом), расходу электроэнергии для выработки каждого вида продукции и общему расходу электроэнергии металлургическим производством по основным показателям за период с мая 2007 года по август 2008 года.

Определение коэффициентов a_i осуществлялось на основе данных, приведенных в таблице 4.7, за исключением данных за август 2008 г., т.к. этот месяц был принят в качестве первой терминальной точки прогноза.

Для указанной выборки получены численные значения коэффициентов a_i , приведенные в таблице 4.6. Также в таблице 4.6 приведены значения квадрата общей ошибки, вычисляемой по соотношениям (2.23) или (2.29) соответственно для разных вариантов решения задачи минимизации общей ошибки прогноза потребления электроэнергии предприятием: варианта 1 и варианта 2.

Таблица 4.6

Результаты решения

Наименование показателя	Вариант 1	Вариант 2
a_0	18,0277646315149	-1383789,88491808
a_1	-0,0000028493144	2,85504163052538
a_2	0,0000030076215	0,716970078818841
a_3	-0,0000002446215	0,288578589566011
a_4	-0,0000021735478	1,90238436990592
a_5	0,0000051712142	3,6751872304243
a_6	0,0000045377628	0,985459161848249
E_0^2	$7,20946914242377 \cdot 10^{-26}$	$1,16446534954256 \cdot 10^{-13}$

Таблица 4.7

Статистические данные

		май.07	июн.07	июл.07	авг.07	май.08	июн.08	июл.08	авг.08
чугун, т	Выработка продукции	753 935	778 040	859 664	857 877	872 265	754 406	679 403	785 294
	Потребление э/э факт, кВт·ч	3 886 106	3 749 594	4 017 901	4 120 863	4 390 333	4 092 041	3 690 668	4 201 043
сталь, т	Выработка продукции	831 956	842 826	880 954	885 027	895 021	778 984	722 226	832 268
	Потребление э/э факт, кВт·ч	17 111 090	16 453 370	17 599 769	17 109 799	16 628 390	14 613 807	14 457 297	16 258 255
эл. дуг. нагрев	Выработка продукции	296 465	284 170	303 948	294 516	295 487	256 833	255 503	280 664
	Потребление э/э факт, кВт·ч	4 564 092	3 747 012	3 771 432	3 374 112	4 003 224	3 494 364	4 239 636	4 221 552
печь-ковш ККЦ, т	Выработка продукции	422 714	437 036	449 950	439 365	448 376	422 123	419 587	444 181
	Потребление э/э факт, кВт·ч	7 416 428	7 694 806	7 820 806	7 031 846	7 679 328	7 847 660	9 248 496	8 640 772
ДСА, т стали	Выработка продукции	34 921	33 655	69 057	63 138	40 343	26 699	9 294	9 944
	Потребление э/э факт, кВт·ч	1 004 111	930 596	979 161	967 676	548 334	557 596	530 964	456 912
ДСП, т стали	Выработка продукции	215 486	226 024	223 098	195 614	256 671	264 258	279 977	295 582
	Потребление э/э факт, кВт·ч	73 652 490	71 897 761	72 016 284	61 512 572	75 280 743	79 426 779	81 517 020	84 486 000
Общее потребление электроэнергии металлургическим производством		113 677 157	111 110 239	113 240 233	101 174 148	115 038 458	117 035 601	120 619 419	124 948 506

Расчет прогнозного значения потребления электрической энергии цехами металлургического производства с использованием первого варианта решения задачи осуществляется на основе соотношения (2.31).

Подставив значения выработки продукции цехов металлургического производства и корректирующих коэффициентов a_i , рассчитаем прогнозное значение потребления электроэнергии для первой точки (август 2008 года):

$$\begin{aligned} W_{0aug08}^{np1} &= \exp(a_0 + a_1 P_{ЧУГУН} + a_2 P_{СТАЛЬ} + a_3 P_{ЭЛ.ДУГ.} + a_4 P_{ПЕЧЬ-КОВШ} + a_5 P_{ДСА} + a_6 P_{ДСП}) = \\ &= \exp(18,03 - 2,85 \cdot 10^{-6} \cdot 785\,294 + 3,01 \cdot 10^{-6} \cdot 832\,268 - 2,45 \cdot 10^{-7} \cdot 280\,664 - \\ &- 2,17 \cdot 10^{-6} \cdot 444\,181 + 5,17 \cdot 10^{-6} \cdot 9\,944 + 4,54 \cdot 10^{-6} \cdot 295\,582) = 126\,021\,199,7 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \end{aligned}$$

В таблице 4.9 представлен прогноз потребления электрической энергии цехами металлургического производства для 1-й терминальной точки с использованием первого варианта алгоритма.

Прогнозное значение потребления электроэнергии цехами металлургического производства ОАО «ММК» для каждого t -го момента времени по второму варианту алгоритма определяется по соотношению (4.21).

Подставив расчетные значения потребления электроэнергии для каждого вида продукции цехов металлургического производства и рассчитанные значения корректирующих коэффициентов a_i , определим прогнозное значение потребления электроэнергии для первой терминальной точки (август 2008 года). Расчетные значения потребления электроэнергии цехами металлургического производства приведены в таблице 4.8.

$$\begin{aligned} W_{0aug08}^{np2} &= a_0 + a_1 W_{ЧУГУН} + a_2 W_{СТАЛЬ} + a_3 W_{ЭЛ.ДУГ.} + a_4 W_{ПЕЧЬ-КОВШ} + a_5 W_{ДСА} + a_6 W_{ДСП} = \\ &= -1\,383\,790 + 2,86 \cdot 4\,206\,050 + 0,72 \cdot 16\,725\,119 + 0,29 \cdot 4\,080\,000 + \\ &+ 1,90 \cdot 7\,973\,049 + 3,68 \cdot 467\,169 + 0,99 \cdot 87\,441\,977 = 126\,848\,704 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \end{aligned}$$

В таблице 4.10 представлен прогноз потребления электроэнергии цехами металлургического производства для 1-й терминальной точки с использованием 2-го варианта алгоритма.

В таблице 4.11 приведены прогнозные и фактические значения потребления электроэнергии цехами металлургического производства.

Таблица 4.8

Расчетные значения потребления электрической энергии (расчет ОАО «ММК»)

	май.07	июн.07	июл.07	авг.07	май.08	июн.08	июл.08	авг.08
W (чугун)	3 996 609	4 038 028	4 384 286	4 339 914	4 390 333	4 179 409	3 726 050	4 206 050
W (сталь)	17 113 796	16 748 755	17 461 887	17 194 950	16 938 112	14 625 405	15 782 600	16 725 119
W(эл.дугов)	4 564 092	3 747 012	4 033 998	3 389 785	3 650 000	3 530 000	3 650 000	4 080 000
W(печь-ковш)	7 582 982	7 791 128	7 933 293	7 467 228	7 792 775	7 898 343	7 980 545	7 973 049
W (дса)	960 467	957 821	1 009 544	962 791	876 655	640 840	442 673	467 169
W (дсп)	68 955 610	72 327 680	71 391 360	62 596 480	75 550 745	79 116 598	82 255 794	87 441 977
WрасчетММК	109216395	112247524	113249249	103008428,5	115706726	116993950	120772999	127577336

Таблица 4.9

Прогноз потребления электрической энергии цехами металлургического производства для 2 терминальной точки с использованием первого варианта алгоритма

	a ₀	P _{чугун}	a ₁	P _{сталь}	a ₂	P _{эл.дуг.}	a ₃	P _{п-к}	a ₄	P _{дса}	a ₅	P _{дсп}	a ₆	Wрасчет 1
май.07	18,03	753 935	-2,85·10 ⁻⁶	831 956	3,01·10 ⁻⁶	296 465	-2,45·10 ⁻⁷	422 714	-2,17·10 ⁻⁶	34 921	5,17·10 ⁻⁶	215 486	4,54·10 ⁻⁶	113 677 289,7
июн.07		778 040		842 826		284 170		437 036		33 655		226 024		111 110 239,0
июл.07		859 664		880 954		303 948		449 950		69 057		223 098		113 240 233,0
авг.07		857 877		885 027		294 516		439 365		63 138		195 614		101 174 148,0
май.08		872 265		895 021		295 487		448 376		40 343		256 671		115 038 226,1
июн.08		754 406		778 984		256 833		422 123		26 699		264 258		117 035 601,0
июл.08		679 403		722 226		255 503		419 587		9 294		279 977		120 619 419,0
авг.08		785 294		832 268		280 664		444 181		9 944		295 582		126 021 199,7

Таблица 4.10

Прогноз потребления электрической энергии цехами металлургического производства для 1 терминальной точки с использованием второго варианта алгоритма

	a ₀	a ₁	W _{ЧУГУН}	a ₂	W _{СТАЛЬ}	a ₃	W _{ЭЛДУГ.}	a ₄	W _{П-К}	a ₅	W _{ДСА}	a ₆	W _{ДСП}	W _{расчет 2}
май.07	-1 383 790	2,86	3 886 106	0,72	17 111 090	0,29	4 564 092	1,90	7 416 428	3,68	1 004 111	0,99	73 652 490	113 677 157
июн.07			3 749 594		16 453 370		3 747 012		7 694 806		930 596		71 897 761	111 110 239
июл.07			4 017 901		17 599 769		3 771 432		7 820 806		979 161		72 016 284	113 240 233
авг.07			4 120 863		17 109 799		3 374 112		7 031 846		967 676		61 512 572	101 174 148
май.08			4 390 333		16 628 390		4 003 224		7 679 328		548 334		75 280 743	115 038 458
июн.08			4 092 041		14 613 807		3 494 364		7 847 660		557 596		79 426 779	117 035 601
июл.08			3 690 668		14 457 297		4 239 636		9 248 496		530 964		81 517 020	120 619 419
авг.08			4 206 050		16 725 119		4 080 000		7 973 049		467 169		87 441 977	<u>126 848 704</u>

Таблица 4.11

Сравнение прогнозных и фактических значений потребления электрической энергии цехами металлургического производства ОАО «ММК»

	W _{факт}	W _{расчММК}	W _{расч1}	W _{расч2}	Ошибка ММК	Ошибка Вар1	Ошибка Вар2
май.07	113 677 157	109 216 395	113 677 290	113 677 157	4 460 762	-132,67831	0
июн.07	111 110 239	112 247 524	111 110 239	111 110 239	-1 137 285	4,9442E-05	-5,3644E-07
июл.07	113 240 233	113 249 249	113 240 233	113 240 233	-9 016	2,5913E-05	-3,7253E-07
авг.07	101 174 148	103 008 429	101 174 148	101 174 148	-1 834 281	-3,693E-05	5,06639E-07
май.08	115 038 458	115 706 726	115 038 226	115 038 458	-668 268	231,8879	-3,2783E-07
июн.08	117 035 601	116 993 950	117 035 601	117 035 601	41 651	-2,587E-05	1,49012E-07
июл.08	120 619 419	120 772 999	120 619 419	120 619 419	-153 580	-4,977E-06	1,78814E-07
авг.08	124 948 506	127 577 336	126 021 200	126 848 704	<u>-2 628 830</u>	<u>-1 072 694</u>	<u>-1 900 198</u>

Определение точности прогноза потребления электроэнергии цехами металлургического производства для i -й терминальной точки осуществляется по формуле:

$$T_i^1 = \frac{\frac{|W_{\phi i \delta} - W_{nl i \delta}|}{W_{nl i \delta}} - \frac{|W_{\phi i} - W_{nl B j}|}{W_{nl B j}}}{\frac{|W_{\phi i} - W_{nl B j}|}{W_{nl B 1}}},$$

где $\frac{|W_{\phi i \delta} - W_{nl i \delta}|}{W_{nl i \delta}}, \frac{|W_{\phi i} - W_{nl B j}|}{W_{nl B j}}$ – приведенные погрешности прогноза потребления электроэнергии для i -й терминальной точки; $W_{\phi i \delta}, W_{\phi i}$ – фактический объём потребления электроэнергии за i -й месяц в базовом периоде и периоде после реализации мероприятия, тыс. кВт·ч; $W_{nl i \delta}, W_{nl i}$ – плановый объём потребления электроэнергии, тыс. кВт·ч.

Определим приведенную погрешность прогноза потребления электроэнергии ОАО «ММК» для 1 терминальной точки (август 2008 года):

$$\frac{|W_{\phi i \delta} - W_{nl i \delta}|}{W_{nl i \delta}} = \frac{|124\,948\,506 - 127\,577\,336|}{127\,577\,336} = 0,02103931$$

Определим приведенную погрешность прогноза для 1 терминальной точки (август 2008 года), осуществленного с использованием разработанных алгоритмов.

Для алгоритма 1:

$$\frac{|W_{\phi i} - W_{nl i B 1}|}{W_{nl i B 1}} = \frac{|124\,948\,506 - 126\,021\,200|}{126\,021\,200} = 0,008408184$$

Для алгоритма 2:

$$\frac{|W_{\phi i} - W_{nl i B 2}|}{W_{nl i B 2}} = \frac{|124\,948\,506 - 126\,848\,704|}{126\,848\,704} = 0,015078403$$

Точность прогноза потребления электроэнергии цехами металлургического производства с использованием 1-го варианта алгоритма относительно прогноза ОАО «ММК»:

$$T_{AUG08}^1 = \frac{\frac{|W_{\phi i \delta} - W_{nl i \delta}|}{W_{nl i \delta}} - \frac{|W_{\phi i} - W_{nl B1}|}{W_{nl B1}}}{\frac{|W_{\phi i} - W_{nl B1}|}{W_{nl B1}}} = \frac{0,02103931 - 0,008408184}{0,008408184} = 1,502241759$$

Точность прогноза потребления электроэнергии цехами металлургического производства с использованием 2-го варианта алгоритма относительно прогноза ОАО «ММК»:

$$T_{AUG08}^1 = \frac{\frac{|W_{\phi i \delta} - W_{nl i \delta}|}{W_{nl i \delta}} - \frac{|W_{\phi i} - W_{nl B2}|}{W_{nl B2}}}{\frac{|W_{\phi i} - W_{nl B2}|}{W_{nl B2}}} = \frac{0,02103931 - 0,015078403}{0,015078403} = 0,395327449$$

Значения точности прогноза потребления электроэнергии цехами металлургического производства, полученные с использованием первого и второго вариантов алгоритма, представлены в таблице 4.24.

В таблице 4.12 приведена выборка статистических данных по выработке видов продукции, выпускаемых цехами металлургического производства ОАО «ММК» (доменным цехом, кислородно-конвертерным цехом, электросталеплавильным цехом), расходу электроэнергии для выработки каждого вида продукции и общему расходу электроэнергии металлургическим производством по основным показателям за период с апреля 2010 года по сентябрь 2011 года.

Определение коэффициентов a_i осуществлялось на основе данных, приведенных в таблице 4.12, за исключением данных за сентябрь 2011 г., т.к. этот месяц был принят в качестве терминальной точки прогноза (вторая терминальная точка).

Таблица 4.12

Статистические данные

			апр.10	май.10	авг.10	сен.10	апр.11	май.11	июн.11	июл.11	авг.11	сен.11
ДЦ	чугун, т	Выработка продукции	842 436	769 632	761 355	798 966	778 798	721 734	808 248	792 027	847 840	799 893
		W факт, кВт·ч	4 200 137	4 145 964	4 024 149	4 255 142	4 289 524	3 772 656	4 039 704	4 181 820	4 332 657	4 042 036
ККЦ	сталь, т	Выработка продукции	853 802	831 216	772 166	802 371	794 169	755 396	830 384	811 663	839 511	783 863
		W факт, кВт·ч	16 606 458	18 002 261	16 884 908	16 197 345	16 082 900	16 082 900	19 661 352	16 027 718	16 778 875	15 935 243
	эл.дуг.нагрев	Выработка продукции	255 023	200 521	191 486	174 756	236 514	315 134	435 737	424 549	393 212	389 173
		W факт, кВт·ч	3 478 848	3 349 554	3 730 614	3 454 734	4 101 425	3 967 402	3 967 402	4 484 223	3 935 731	3 191 619
	печь-ковш №1, т	Выработка продукции	486 535	472 846	360 108	391 720	386 666	355 253	404 138	396 316	384 031	396 409
		W факт, кВт·ч	8 114 513	8 607 367	7 441 527	7 787 429	7 728 864	7 785 880	7 785 880	9 528 391	8 187 521	7 862 816
	печь-ковш №2, т	Выработка продукции	164 972	168 761	162 841	168 354	202 337	198 848	196 625	203 233	216 889	197 217
		W факт, кВт·ч	4 949 280	6 123 540	7 038 210	6 545 146	8 557 642	7 578 132	7 578 132	8 411 622	8 168 290	7 161 627
	МНЛЗ №6	Выработка продукции	112 678	115 331	124 511	126 562	147 854	77 281	130 364	101 059	100 347	81 346
		W факт, кВт·ч	718 320	667 760	1 289 722	1 216 630	958 450	887 900	887 900	1 432 330	1 378 050	1 271 770
ЭСЦ	ДСА, т стали	Выработка продукции	74 801	9 610	35 442	66 242	74 138	40 678	62 511	51 924	102 949	82 312
		W факт, кВт·ч	739 969	601 465	563 917	635 003	739 414	586 906	601 185	634 302	666 818	636 094
	ДСП, т стали	Выработка продукции	108 964	183 288	146 341	134 601	55 759	104 135	110 137	145 023	66 135	131 921
		W факт, кВт·ч	31 906 881	57 911 452	42 922 071	39 755 232	18 896 232	31 599 220	35 081 749	44 877 399	20 628 210	39 275 464
W ⁰ факт, кВт·ч			90 316 636	120 360 831	105 316 241	101 824 732	80 537 998	90 943 891	101 228 306	112 658 539	84 442 051	101 759 275

Таблица 4.13

Расчетные значения потребления электрической энергии (расчет ОАО «ММК»)

		апр.10	май.10	авг.10	сен.10	апр.11	май.11	июн.11	июл.11	авг.11	сен.11
ДЦ	чугун, т	4 254 302	4 209 887	4 035 182	4 256 085	4 062 950	3 882 929	4 138 230	4 197 743	4 442 682	4 079 454
ККЦ	сталь, т	16 692 469	16 963 258	16 894 130	16 501 008	16 096 536	16 096 536	16 554 098	16 302 751	16 704 765	16 191 064
	эл.дуг. нагрев	3 500 102	3 350 694	3 623 107	3 334 344	4 079 867	4 352 946	6 193 653	4 827 122	4 101 201	3 832 576
	печь-ковш №1, т	8 136 699	8 758 054	7 446 515	7 779 763	7 563 187	7 300 449	7 921 105	8 335 556	8 095 969	7 916 288
	печь-ковш №2, т	4 949 280	6 123 540	7 038 210	6 545 146	8 477 920	8 136 860	8 179 600	8 424 591	8 335 044	7 228 397
	МНЛЗ №6	718 320	667 760	1 289 722	1 216 630	968 739	921 383	1 083 325	1 241 207	1 232 642	1 086 294
ЭСЦ	ДСА, т стали	747 632	610 014	610 666	595 516	685 814	597 438	671 993	653 204	648 949	665 081
	ДСП, т стали	31 493 865	57 622 872	43 172 058	39 782 382	18 898 955	32 109 548	34 762 349	44 885 199	20 477 256	39 342 817
WрасчетММК		90 734 127	119 580 619	105 541 981	102 297 550	80 667 588	92 201 475	100 854 216	112 334 071	84 701 032	102 812 024

Для указанной выборки получены численные значения коэффициентов a_i , приведенные в таблице 4.14. Также в таблице 4.14 приведены значения квадрата общей ошибки для двух вариантов решения задачи минимизации общей ошибки прогноза потребления электроэнергии предприятием.

Таблица 4.14

Результаты решения

Наименование показателя	Вариант 1	Вариант 2
a_0	17,477684678595	171608264,840227
a_1	-0,000000445009	-185,506842532508
a_2	0,000000595981	11,9674931392038
a_3	0,000000187010	-82,0369775575642
a_4	-0,000000288571	8,35817439916012
a_5	0,000001172112	20,8942801743611
a_6	0,000001118866	88,9711796578392
a_7	0,000000521911	646,208451791975
a_8	0,000004051067	2,23152084087991
E_0^2	3,10750761870847·10 ⁻²⁵	9,38876953959777·10 ⁻⁹

Рассчитаем прогнозное значение потребления электрической энергии для первой терминальной точки (сентябрь):

$$\begin{aligned}
 W_{0sept11}^{np1} = & \exp(a_0 + a_1 P_{ЧУГУН} + a_2 P_{СТАЛЬ} + a_3 P_{ЭЛ.ДУГ.} + a_4 P_{ПЕЧЬ-КОВШ \text{ №1}} + a_5 P_{ПЕЧЬ-КОВШ \text{ №2}} + \\
 & + a_6 P_{МНЛЗ \text{ №6}} + a_7 P_{ДСА} + a_8 P_{ДСП}) = \exp(17,48 - 4,45 \cdot 10^{-7} \cdot 799\,893 + 5,96 \cdot 10^{-7} \cdot 783\,863 + \\
 & + 1,87 \cdot 10^{-7} \cdot 389\,173 - 2,89 \cdot 10^{-7} \cdot 396\,409 + 1,17 \cdot 10^{-6} \cdot 197\,217 + 1,12 \cdot 10^{-6} \cdot 81\,346 + \\
 & + 5,22 \cdot 10^{-7} \cdot 82\,312 + 4,05 \cdot 10^{-6} \cdot 131\,921) = 102\,650\,023 \text{ кВт} \cdot \text{ч}
 \end{aligned}$$

В таблице 4.15 представлен прогноз потребления электрической энергии цехами металлургического производства для 2-й терминальной точки с использованием первого варианта алгоритма.

Определим прогнозное значение потребления электрической энергии для второй терминальной точки (сентябрь 2011 года). Расчетные значения потребления электрической энергии цехами металлургического производства приведены в таблице 4.13.

$$\begin{aligned}
W_{0sept11}^{np2} = & a_0 + a_1 W_{ЧУГУН} + a_2 W_{СТАЛЬ} + a_3 W_{ЭЛ.ДУГ.} + a_4 W_{ПЕЧЬ-КОВШ \text{ №1}} + a_5 W_{ПЕЧЬ-КОВШ \text{ №2}} + \\
& + a_6 W_{МНЛЗ \text{ №2}} + a_7 W_{ДСА} + a_8 W_{ДСП} = -174\,180\,837 + 85,37 \cdot 4\,079\,454 - 1,11 \cdot 16\,191\,064 - \\
& - 0,98 \cdot 3\,832\,576 - 33,06 \cdot 7\,916\,288 + 9,03 \cdot 7\,228\,397 - 29,54 \cdot 1\,086\,294 + \\
& + 128,84 \cdot 665\,081 + 2,30 \cdot 39\,342\,817 = 100\,059\,944 \text{ кВт} \cdot \text{ч}
\end{aligned}$$

В таблице 4.16 представлен прогноз потребления электрической энергии цехами металлургического производства для 2-й терминальной точки с использованием второго варианта алгоритма.

В таблице 4.17 приведены прогнозные и фактические значения потребления электрической энергии цехами металлургического производства ОАО «ММК». Сравнение полученных значений с изначально заданными показывает правильность работы алгоритма.

Таблица 4.15

Прогноз потребления электрической энергии цехами металлургического производства для 2 терминальной точки с использованием алгоритма 1

	а ₀	ДЦ		ККЦ										ЭСЦ				Wрасч1
		а ₁	Р _{ЧУГУН}	а ₂	Р _{СТАЛЬ}	а ₃	Р _{ЭЛ.ДУГ.}	а ₄	Р _{П-К№1}	а ₅	Р _{П-К№2}	а ₆	Р _{МНЛЗ №6}	а ₇	Р _{ДСА}	а ₈	Р _{ДСП}	
апр.10	17,48	-4,45·10 ⁻⁷	842 436	5,96·10 ⁻⁷	853 802	1,87·10 ⁻⁷	255 023	-2,89·10 ⁻⁷	486 535	1,17·10 ⁻⁶	164 972	1,12·10 ⁻⁶	112 678	5,22·10 ⁻⁷	74 801	4,05·10 ⁻⁶	108 964	90 316 636
май.10			769 632		831 216		200 521		472 846		168 761		115 331		9 610		183 288	120 360 831
авг.10			761 355		772 166		191 486		360 108		162 841		124 511		35 442		146 341	105 316 241
сен.10			798 966		802 371		174 756		391 720		168 354		126 562		66 242		134 601	101 824 732
апр.11			778 798		794 169		236 514		386 666		202 337		147 854		74 138		55 759	80 537 998
май.11			721 734		755 396		315 134		355 253		198 848		77 281		40 678		104 135	90 943 891
июн.11			808 248		830 384		435 737		404 138		196 625		130 364		62 511		110 137	101 228 306
июл.11			792 027		811 663		424 549		396 316		203 233		101 059		51 924		145 023	112 658 539
авг.11			847 840		839 511		393 212		384 031		216 889		100 347		102 949		66 135	84 442 051
сен.11			799 893		783 863		389 173		396 409		197 217		81 346		82 312		131 921	102 650 023

Таблица 4.16

Прогноз потребления электрической энергии цехами металлургического производства для 2 терминальной точки с использованием алгоритма 2

	a ₀	ДЦ		ККЦ										ЭСЦ				W _{расч2}
		a ₁	W _{ЧУГУН}	a ₂	W _{СТАЛЬ}	a ₃	W _{ЭЛ.ДУГ.}	a ₄	W _{П-К№1}	a ₅	W _{П-К№2}	a ₆	W _{МНЛЗ 6}	a ₇	W _{ДСА}	a ₈	W _{ДСП}	
апр.10	-174 180 837	85,37	4 254 302	-1,11	16 692 469	-0,98	3 500 102	-33,06	8 136 699	9,03	4 949 280	-29,54	718 320	128,84	747632	2,30	31 493 865	90 316 638
май.10			4 209 887		16 963 258		3 350 694		8 758 054		6 123 540		667 760		610014		57 622 872	120 360 844
авг.10			4 035 182		16 894 130		3 623 107		7 446 515		7 038 210		1 289 722		610666		43 172 058	105 316 160
сен.10			4 256 085		16 501 008		3 334 344		7 779 763		6 545 146		1 216 630		595516		39 782 382	101 824 724
апр.11			4 062 950		16 096 536		4 079 867		7 563 187		8 477 920		968 739		685814		18 898 955	80 537 956
май.11			3 882 929		16 096 536		4 352 946		7 300 449		8 136 860		921 383		597438		32 109 548	90 943 862
июн.11			4 138 230		16 554 098		6 193 653		7 921 105		8 179 600		1 083 325		671993		34 762 349	101 228 328
июл.11			4 197 743		16 302 751		4 827 122		8 335 556		8 424 591		1 241 207		653204		44 885 199	112 658 551
авг.11			4 442 682		16 704 765		4 101 201		8 095 969		8 335 044		1 232 642		648949		20 477 256	84 442 055
сен.11			4 079 454		16 191 064		3 832 576		7 916 288		7 228 397		1 086 294		665081		39 342 817	100 059 944

Таблица 4.17

Сравнение прогнозных и фактических значений потребления электрической энергии цехами металлургического производства ОАО «ММК»

	Wфакт	WрасчММК	Wрасч1	Wрасч2	Ошибка ММК	Ошибка Вар1	Ошибка Вар2
апр.10	90 316 636	90 734 127	90 316 636	90 316 638	-417 491,36	0,0000492	-2,03
май.10	120 360 831	119 580 619	120 360 831	120 360 844	780 211,83	-0,0000323	-13,09
авг.10	105 316 241	105 541 981	105 316 241	105 316 160	-225 739,90	0,0000542	81,46
сен.10	101 824 732	102 297 550	101 824 732	101 824 724	-472 817,84	-0,0000725	8,43
апр.11	80 537 998	80 667 588	80 537 998	80 537 956	-129 589,97	0,0000304	42,15
май.11	90 943 891	92 201 475	90 943 891	90 943 862	-1 257 584,33	-0,0000364	28,59
июн.11	101 228 306	100 854 216	101 228 306	101 228 328	374 089,83	-0,0000781	-21,74
июл.11	112 658 539	112 334 071	112 658 539	112 658 551	324 467,64	0,0000966	-11,98
авг.11	84 442 051	84 701 032	84 442 051	84 442 055	-258 981,46	-0,0000130	-3,78
сен.11	101 759 275	102 812 024	102 650 023	100 059 944	-1 052 748,56	-890748,1924	1 699 331,14

Определим приведенную погрешность прогноза потребления электроэнергии ОАО «ММК» для 2-й терминальной точки (сентябрь 2011 года):

$$\frac{|W_{\phi i \bar{o}} - W_{nl \bar{i} \bar{o}}|}{W_{nl \bar{i} \bar{o}}} = \frac{|101\,759\,275 - 102\,812\,024|}{102\,812\,024} = 0,01034548$$

Определим приведенную погрешность прогнозирования потребления электрической энергии цехами металлургического производства с использованием разработанных алгоритмов для 2-й терминальной точки (сентябрь 2011 года). Для варианта 1:

$$\frac{|W_{\phi i} - W_{nl B1}|}{W_{nl B1}} = \frac{|101\,759\,275 - 102\,650\,023|}{102\,650\,023} = 0,008663852.$$

Для алгоритма 2:

$$\frac{|W_{\phi i} - W_{nl B2}|}{W_{nl B2}} = \frac{|101\,759\,275 - 100\,059\,944|}{100\,059\,944} = 0,01655461.$$

Точность прогноза потребления электроэнергии цехами металлургического производства с использованием первого варианта расчета относительно прогноза ОАО «ММК»:

$$T_{SEPT11}^1 = \frac{\frac{|W_{\phi i \bar{o}} - W_{nl \bar{i} \bar{o}}|}{W_{nl \bar{i} \bar{o}}} - \frac{|W_{\phi i} - W_{nl B1}|}{W_{nl B1}}}{\frac{|W_{\phi i} - W_{nl B1}|}{W_{nl B1}}} = \frac{0,01034548 - 0,008663852}{0,008663852} = 0,19409701.$$

Точность прогноза потребления электроэнергии цехами металлургического производства с использованием 2-го варианта расчета относительно прогноза ОАО «ММК»:

$$T_{SEPT11}^1 = \frac{\frac{|W_{\phi i \bar{o}} - W_{nl \bar{i} \bar{o}}|}{W_{nl \bar{i} \bar{o}}} - \frac{|W_{\phi i} - W_{nl B2}|}{W_{nl B2}}}{\frac{|W_{\phi i} - W_{nl B2}|}{W_{nl B2}}} = \frac{0,01034548 - 0,01655461}{0,01655461} = -0,37506955.$$

Значения точности прогноза потребления электроэнергии цехами металлургического производства, полученные с использованием первого и второго вариантов алгоритма, представлены в таблице 4.24.

В таблице 4.19 приведена выборка статистических данных по выработке видов продукции, выпускаемых цехами металлургического производства ОАО «ММК» (доменным цехом, кислородно-конвертерным цехом, электросталеплавильным цехом), расходу электроэнергии для выработки каждого вида продукции и общему расходу электроэнергии металлургическим производством по основным показателям за период с июня 2011 года по сентябрь 2012 года.

Определение коэффициентов a_i осуществлялось на основе данных, приведенных в таблице 4.19, за исключением данных за сентябрь 2012 г., т.к. этот месяц был принят в качестве терминальной точки прогноза (третья терминальная точка).

Для указанной выборки получены численные значения коэффициентов a_i , приведенные в таблице 4.18. Также в таблице 4.18 приведены значения квадрата общей ошибки, вычисляемой по соотношениям (2.22) или (2.29) соответственно для разных вариантов решения задачи минимизации общей ошибки прогноза потребления электроэнергии предприятием: варианта 1 и варианта 2.

Таблица 4.18

Результаты решения

Наименование показателя	Вариант 1	Вариант 2
a_0	17,7450588678384	2387740,00051476
a_1	-0,0000018357622	1,35096282980258
a_2	0,0000030882313	1,02186980024691
a_3	-0,0000002014917	2,06521783011528
a_4	-0,0000001928407	2,1078131262162
a_5	-0,0000022861193	-0,488299949063955
a_6	-0,0000013341763	-1,02121784824068
a_7	-0,0000010299913	8,27994491943869
a_8	0,0000028466032	0,982284660583371
E_0^2	$4,75227660459565 \cdot 10^{-25}$	$4,15050709850422 \cdot 10^{-13}$

Таблица 4.19

Статистические данные

			июн.11	июл.11	авг.11	сен.11	апр.12	май.12	июн.12	июл.12	авг.12	сен.12
ДЦ	чугун, т	Выработка продукции	808 248	792 027	847 840	799 893	842 648	867 075	847 695	875 485	859 205	836 069
		W факт, кВт·ч	4 039 704	4 181 820	4 332 657	4 042 036	4 063 131	4 194 096	4 103 419	4 064 007	4 246 422	4 129 848
ККЦ	сталь, т	Выработка продукции	830 384	811 663	839 511	783 863	816 676	790 891	789 076	823 788	796 498	791 410
		W факт, кВт·ч	19 661 352	16 027 718	16 778 875	15 935 243	17 326 075	18 553 945	16 534 177	17 501 945	17 334 035	16 755 102
	эл.дуг. нагрев	Выработка продукции	435 737	424 549	393 212	389 173	217 387	229 103	233 884	251 995	247 990	236 909
		Wфакт, кВт·ч	3 967 402	4 484 223	3 935 731	3 191 619	2 995 082	2 920 301	2 368 583	2 643 326	2 883 383	2 860 589
	печь-ковш №1, т	Выработка продукции	404 138	396 316	384 031	396 409	367 675	342 213	344 376	358 758	350 764	350 263
		W факт, кВт·ч	7 785 880	9 528 391	8 187 521	7 862 816	6 396 992	5 964 754	6 089 080	6 269 343	5 696 864	5 620 272
	печь-ковш №2, т	Выработка продукции	196 625	203 233	216 889	197 217	213 713	204 517	204 951	212 972	209 611	207 580
		W факт, кВт·ч	7 578 132	8 411 622	8 168 290	7 161 627	7 538 912	6 476 070	6 850 742	7 053 506	7 116 322	7 095 118
	МНЛЗ №6	Выработка продукции	130 364	101 059	100 347	81 346	112 946	74 375	89 842	92 515	102 409	104 164
		W факт, кВт·ч	887 900	1 432 330	1 378 050	1 271 770	778 670	780 280	845 530	915 890	922 730	818 820
ЭСЦ	ДСА, т стали	Выработка продукции	62 511	51 924	102 949	82 312	100 772	87 204	100 326	75 286	85 582	80 414
		W факт, кВт·ч	601 185	634 302	666 818	636 094	730 984	666 433	807 605	894 124	830 789	772 045
	ДСП, т стали	Выработка продукции	110 137	145 023	66 135	131 921	118 634	102 376	106 091	213 337	111 832	209 046
		W факт, кВт·ч	35 081 749	44 877 399	20 628 210	39 275 464	33 987 010	27 222 135	29 708 655	59 860 074	28 594 090	57 582 138
Общее потребление электроэнергии металлургическим производством			87 372 203	97 524 680	71 160 856	86 347 592	80 212 016	73 915 982	74 213 959	106 259 799	74 349 579	102 340 654

Таблица 4.20

Расчетные значения потребления электрической энергии (расчет ОАО «ММК»)

		июн.11	июл.11	авг.11	сен.11	апр.12	май.12	июн.12	июл.12	авг.12	сен.12
ДЦ	чугун, т	4 138 230	4 197 743	4 442 682	4 079 454	4 121 054	4 278 495	4 186 935	4 131 939	4 330 393	4 134 186
ККЦ	сталь, т	16 554 098	16 302 751	16 704 765	16 191 064	16 496 319	16 794 199	16 028 132	16 614 465	16 868 152	16 691 884
	эл.дуг. нагрев	6 193 653	4 827 122	4 101 201	3 832 576	3 096 982	3 268 154	2 423 272	2 909 030	2 902 326	2 903 794
	печь-ковш №1, т	7 921 105	8 335 556	8 095 969	7 916 288	6 985 237	6 505 298	6 570 694	6 827 796	6 297 617	5 890 303
	печь-ковш №2, т	8 179 600	8 424 591	8 335 044	7 228 397	7 680 845	7 259 454	6 974 216	7 223 542	7 275 598	7 133 829
	МНЛЗ №6	1 083 325	1 241 207	1 232 642	1 086 294	785 652	956 582	865 223	1 005 083	923 791	846 249
ЭСПЦ	ДСА, т стали	671 993	653 204	648 949	665 081	720 570	671 471	730 323	731 780	756 887	734 920
	ДСП, т стали	34 762 349	44 885 199	20 477 256	39 342 817	33 988 641	27 435 279	29 014 021	60 140 426	28 718 458	57 761 500
Плановое потребление электроэнергии металлургическим производством		100 854 216	112 334 071	84 701 032	102 812 024	95 173 047	88 410 288	87 918 297	123 881 627	88 891 501	120 389 654

Рассчитаем прогнозное значение потребления электрической энергии для третьей терминальной точки (сентябрь 2012 года):

$$W_{0sept12}^{np1} = \exp(a_0 + a_1 P_{ЧУГУН} + a_2 P_{СТАЛЬ} + a_3 P_{ЭЛ.ДУГ.} + a_4 P_{ПЕЧЬ-КОВШ \text{ №1}} + a_5 P_{ПЕЧЬ-КОВШ \text{ №2}} + a_6 P_{МНЛЗ \text{ №2}} + a_7 P_{ДСА} + a_8 P_{ДСП}) = \exp(17,75 - 1,84 \cdot 10^{-6} \cdot 836\,069 + 3,09 \cdot 10^{-6} \cdot 791\,410 - 2,01 \cdot 10^{-7} \cdot 236\,909 - 1,93 \cdot 10^{-7} \cdot 350\,263 - 2,29 \cdot 10^{-6} \cdot 207\,580 - 1,33 \cdot 10^{-6} \cdot 104\,164 - 1,03 \cdot 10^{-6} \cdot 80\,414 + 2,85 \cdot 10^{-6} \cdot 209\,046) = 101\,719\,694 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

В таблице 4.21 представлен прогноз потребления электрической энергии цехами металлургического производства для 3-й терминальной точки с использованием первого варианта алгоритма.

Определим прогнозное значение потребления электрической энергии для третьей терминальной точки (сентябрь 2012 года). Расчетные значения потребления электрической энергии цехами металлургического производства приведены в таблице 4.20.

$$W_{0sept12}^{np2} = a_0 + a_1 W_{ЧУГУН} + a_2 W_{СТАЛЬ} + a_3 W_{ЭЛ.ДУГ.} + a_4 W_{ПЕЧЬ-КОВШ \text{ №1}} + a_5 W_{ПЕЧЬ-КОВШ \text{ №2}} + a_6 W_{МНЛЗ \text{ №6}} + a_7 W_{ДСА} + a_8 W_{ДСП} = 2\,387\,740 + 1,35 \cdot 4\,134\,186 + 1,02 \cdot 16\,691\,884 + 2,07 \cdot 2\,903\,794 + 2,11 \cdot 5\,890\,303 - 0,49 \cdot 7\,133\,829 - 1,02 \cdot 846\,249 + 8,28 \cdot 734\,920 + 0,98 \cdot 57\,761\,500 = 101\,918\,104 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

В таблице 4.22 представлен прогноз потребления электрической энергии цехами металлургического производства для 3-й терминальной точки с использованием второго варианта алгоритма.

В таблице 4.23 приведены прогнозные и фактические значения потребления электрической энергии цехами металлургического производства ОАО «ММК». Сравнение полученных значений с изначально заданными показывает правильность работы алгоритма.

Таблица 4.21

Прогноз потребления электрической энергии цехами металлургического производства для 3 терминальной точки с использованием алгоритма 1

	а ₀	ДЦ		ККЦ										ЭСПЦ				W _{расч1}
		а ₁	Р _{чугун}	а ₂	Р _{СТАЛЬ}	а ₃	Р _{ЭЛ.ДУГ.}	а ₄	Р _{П-К№1}	а ₅	Р _{П-К№2}	а ₆	Р _{МНЛЗ №6}	а ₇	Р _{ДСА}	а ₈	Р _{ДСП}	
июн.11	17,75	-1,84·10 ⁻⁶	808 248	3,09·10 ⁻⁶	830 384	-2,01·10 ⁻⁷	435 737	-1,93·10 ⁻⁷	404 138	-2,29·10 ⁻⁶	196 625	-1,33·10 ⁻⁶	130 364	-1,03·10 ⁻⁶	62 511	2,85·10 ⁻⁶	110 137	87 372 203
июл.11			792 027		811 663		424 549		396 316		203 233		101 059		51 924		145 023	97 524 680
авг.11			847 840		839 511		393 212		384 031		216 889		100 347		102 949		66 135	71 160 856
сен.11			799 893		783 863		389 173		396 409		197 217		81 346		82 312		131 921	86 347 592
апр.12			842 648		816 676		217 387		367 675		213 713		112 946		100 772		118 634	80 212 016
май.12			867 075		790 891		229 103		342 213		204 517		74 375		87 204		102 376	73 915 982
июн.12			847 695		789 076		233 884		344 376		204 951		89 842		100 326		106 091	74 213 959
июл.12			875 485		823 788		251 995		358 758		212 972		92 515		75 286		213 337	106 259 799
авг.12			859 205		796 498		247 990		350 764		209 611		102 409		85 582		111 832	74 349 579
сен.12			836 069		791 410		236 909		350 263		207 580		104 164		80 414		209 046	101 719 694

Таблица 4.22

Прогноз потребления электрической энергии цехами металлургического производства для 3 терминальной точки с использованием алгоритма 2

	а ₀	ДЦ		ККЦ										ЭСПЦ				W _{расч2}
		а ₁	W _{чугун}	а ₂	W _{СТАЛЬ}	а ₃	W _{ЭЛ.ДУГ.}	а ₄	W _{П-К№1}	а ₅	W _{П-К№2}	а ₆	W _{МНЛЗ№6}	а ₇	W _{ДСА}	а ₈	W _{ДСП}	
июн.11	2 387 740	1,35	4 039 704	1,02	19 661 352	2,07	3 967 402	2,11	7 785 880	-0,49	7 578 132	-1,02	887 900	8,28	601 185	0,98	35 081 749	87 372 203
июл.11			4 181 820		16 027 718		4 484 223		9 528 391		8 411 622		1 432 330		634 302		44 877 399	97 524 680
авг.11			4 332 657		16 778 875		3 935 731		8 187 521		8 168 290		1 378 050		666 818		20 628 210	71 160 856
сен.11			4 042 036		15 935 243		3 191 619		7 862 816		7 161 627		1 271 770		636 094		39 275 464	86 347 592
апр.12			4 063 131		17 326 075		2 995 082		6 396 992		7 538 912		778 670		730 984		33 987 010	80 212 016
май.12			4 194 096		18 553 945		2 920 301		5 964 754		6 476 070		780 280		666 433		27 222 135	73 915 982
июн.12			4 103 419		16 534 177		2 368 583		6 089 080		6 850 742		845 530		807 605		29 708 655	74 213 959
июл.12			4 064 007		17 501 945		2 643 326		6 269 343		7 053 506		915 890		894 124		59 860 074	106 259 799
авг.12			4 246 422		17 334 035		2 883 383		5 696 864		7 116 322		922 730		830 789		28 594 090	74 349 579
сен.12			4 134 186		16 691 884		2 903 794		5 890 303		7 133 829		846 249		734 920		57 761 500	101 918 104

Таблица 4.23

Сравнение прогнозных и фактических значений потребления электрической энергии цехами металлургического производства ОАО «ММК»

	Wфакт	WрасчММК	Wрасч1	Wрасч2	Ошибка ММК	Ошибка Вар1	Ошибка Вар2
июн.11	87 372 203	87 273 251	87 372 203	87 372 203	98951,50	-0,0000015	0,000001103
июл.11	97 524 680	96 814 248	97 524 680	97 524 680	710432,33	0,0000704	-0,000000417
авг.11	71 160 856	71 123 212	71 160 856	71 160 856	37643,53	-0,0000143	0,000000000
сен.11	86 347 592	87 312 894	86 347 592	86 347 592	-965302,24	-0,0000406	0,000000164
апр.12	80 212 016	80 270 461	80 212 016	80 212 016	-58445,22	-0,0000003	-0,000001088
май.12	73 915 982	74 306 899	73 915 982	73 915 982	-390917,10	-0,0000189	-0,000000790
июн.12	74 213 959	73 698 986	74 213 959	74 213 959	514973,40	0,0001184	0,000000522
июл.12	106 259 799	106 641 645	106 259 799	106 259 799	-381845,68	-0,0000180	0,000000179
авг.12	74 349 579	74 798 166	74 349 579	74 349 579	-448586,77	-0,0000687	0,000000477
сен.12	102 340 654	102 803 387	101 719 694	101 918 104	-462732,73	620 960	422 550

Определим приведенную погрешность прогноза потребления электроэнергии ОАО «ММК» для 3-й терминальной точки (сентябрь 2012 года):

$$\frac{|W_{\phi i \delta} - W_{nл i \delta}|}{W_{nл i \delta}} = \frac{|102\,340\,654 - 102\,803\,387|}{102\,803\,387} = 0,00452149$$

Определим приведенную погрешность прогнозирования потребления электрической энергии цехами металлургического производства с использованием разработанных алгоритмов для 3-й терминальной точки (сентябрь 2012 года).

Для первого варианта алгоритма:

$$\frac{|W_{\phi i} - W_{nл B1}|}{W_{nл B1}} = \frac{|102\,340\,654 - 101\,719\,694|}{101\,719\,694} = 0,00604027.$$

Для второго варианта алгоритма:

$$\frac{|W_{\phi i} - W_{nл B2}|}{W_{nл B2}} = \frac{|102\,340\,654 - 101\,918\,104|}{101\,918\,104} = 0,00415406.$$

Точность прогноза потребления электроэнергии цехами металлургического производства с использованием первого варианта алгоритма относительно прогноза ОАО «ММК»:

$$T_{SEPT12}^1 = \frac{\frac{|W_{\phi i \delta} - W_{nл i \delta}|}{W_{nл i \delta}} - \frac{|W_{\phi i} - W_{nл B1}|}{W_{nл B1}}}{\frac{|W_{\phi i} - W_{nл B1}|}{W_{nл B1}}} = \frac{0,00452149 - 0,00604027}{0,00604027} = -0,251442.$$

Точность прогноза потребления электроэнергии цехами металлургического производства с использованием алгоритма 2 относительно прогноза ОАО «ММК»:

$$T_{SEPT11}^2 = \frac{\frac{|W_{\phi i \delta} - W_{nл i \delta}|}{W_{nл i \delta}} - \frac{|W_{\phi i} - W_{nл B2}|}{W_{nл B2}}}{\frac{|W_{\phi i} - W_{nл B2}|}{W_{nл B2}}} = \frac{0,00452149 - 0,00415406}{0,00415406} = 0,088452.$$

Приведенные ошибки и значения точности прогноза потребления электрической энергии цехами металлургического производства, рассчитанные с использованием первого и второго вариантов алгоритма для трех терминальных точек (август 2008 года, сентябрь 2011 года, сентябрь 2012 года), приведены в таблице 4.24.

Таблица 4.24

Точность прогноза потребления электрической энергии цехами металлургического производства ОАО «ММК» для трех терминальных точек для 1-го и 2-го варианта расчета

Терминальная точка	Приведенная ошибка, расчет ММК $\frac{ W_{\phi i \delta} - W_{nl i \delta} }{W_{nl i \delta}}$	Приведенная ошибка, вариант расчета 1, $\frac{ W_{\phi i} - W_{nl B1} }{W_{nl B1}}$	Приведенная ошибка, вариант расчета 2, $\frac{ W_{\phi i} - W_{nl B2} }{W_{nl B2}}$	Точность прогноза, вариант расчета 1, T_1	Точность прогноза, вариант расчета 2, T_2
1	0,02103931	0,008408184	0,015078403	1,502241759	0,395327449
2	0,01034548	0,008663852	0,01655461	0,19409701	-0,37506955
3	0,00452149	0,00604027	0,00415406	-0,251442	0,088452

Определим среднюю точность прогноза потребления электрической энергии цехами металлургического производства в трех терминальных точках.

Для варианта 1 получим:

$$T^1 = \frac{T_{AUG08}^1 + T_{SEPT11}^1 + T_{SEPT12}^1}{3} = \frac{1,502241759 + 0,19409701 - 0,251442}{3} = 0,481632.$$

Для варианта 2:

$$T^2 = \frac{T_{AUG08}^2 + T_{SEPT11}^2 + T_{SEPT12}^2}{3} = \frac{0,395327449 - 0,37506955 + 0,088452}{3} = 0,036237$$

Таким образом, снижение погрешности расчётов объёмов потребления и выработки электрической энергии цехами металлургического производства ОАО «ММК» не менее чем на 0,5 % для совокупности трех терминальных точек достигнуто для первого и второго вариантов алгоритма прогнозирования.

4.1.3 Экспериментальные исследования для электростанций

В таблице 4.26 приведена выборка статистических данных по выработке продукции электростанциями ОАО «ММК», расходу электроэнергии для выработки продукции и общему расходу электроэнергии за летний период (в период с мая 2010 г. по июль 2012 г.).

Определение коэффициентов a_i осуществлялось на основе данных, приведенных в таблице 4.26.

Для выборки данных получены численные значения коэффициентов a_i , приведенные в таблице 4.25. Также в таблице 4.25 приведены значения квадрата общей ошибки для двух вариантов решения задачи минимизации общей ошибки прогноза потребления электроэнергии предприятием.

В качестве терминальных точек прогноза выбраны следующие месяцы: август 2012, сентябрь 2012, май 2010, июль 2011.

С использованием полученных коэффициентов a_i и реальных данных в терминальной точке прогноза можно вычислить прогнозное значение общего расхода электроэнергии.

Таблица 4.25

Наименование показателя	Вариант 1	Вариант 2
a_0	16,12878547387120000000	0,00000179558992385864
a_1	0,00000000123807209438	0,98399469224941100000
a_2	0,00000078789523080880	1,00924675256003000000
a_3	0,00000176540579739227	1,06452840169000000000
a_4	0,00000043194538175955	1,76340063893583000000
a_5	0,00000101333166868495	0,96034558140947500000
a_6	0,00000000107891546449	1,55731367052209000000
a_7	-0,00000001107508958937	1,14353989147287000000
a_8	0,00000071045968603346	0,80915436203029800000
a_9	0,00000042294353501434	-3,12870263639089000000
a_{10}	-0,00000000042997000661	1,40357249950660000000
a_{11}	0,00000027947660626678	1,00741514923223000000
a_{12}	0,00000120292846166424	0,94444687278301600000
a_{13}	0,00000183876481923223	-1,60353659110730000000
E_0^2	4,54746446404458E-6	9,6081193855769E-10

Таблица 4.26

Статистические данные

№	Наименование продукции		Дата												
			Май 2010	Июнь 2010	Июль 2010	Август 2010	Сентябрь 2010	Май 2011	Июнь 2011	Июль 2011	Август 2011	Сентябрь 2011	Май 2012	Июнь 2012	Июль 2012
1	2		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	Выработка э/э, кВт*ч (ТЭЦ)	Выработка продукции	222050800,0	208930000,0	197630600,0	206519600,0	210294000,0	214610200,0	200239000,0	203965000,0	220094400,0	225599000,0	208169200,0	202722200,0	217193000,0
		Потребление э/э факт, кВт*ч	13846867,00	12861495,00	12872107,00	14084255,00	13579492,00	13447643,00	13159376,00	13923827,00	14661318,00	14259492,00	13936444,00	13225751,00	15433172,00
2	Тепло с острым паром ККП, Гкал (ТЭЦ)	Выработка продукции	121017,18	115000,00	114110,37	136200,00	137800,00	153980,71	146495,44	153907,09	143420,01	136532,00	159051,64	151770,14	150641,72
		Потребление э/э факт, кВт*ч	2648746,00	2250699,00	2298424,00	2881022,00	2948952,00	3330594,00	3131377,00	3356158,00	3046708,00	2878595,00	3449063,00	3290065,00	3286875,00
3	Тепло с горячей водой, Гкал (ТЭЦ)	Выработка продукции	65035,31	51537,56	59620,11	54657,82	67760,03	65408,71	57748,00	48780,93	53496,15	68100,38	42355,31	50503,65	49273,00
		Потребление э/э факт, кВт*ч	3132561,00	1914587,00	2167275,00	2240090,00	2831930,00	3380807,00	2180258,00	2031736,00	2384432,00	3073596,00	2235972,00	2376985,00	2318295,00
4	Химволо- очистка, м3 воды (ТЭЦ)	Выработка продукции	82817,00	107956,00	87057,00	75997,00	77628,00	110905,00	53916,00	56649,00	64063,00	65907,00	95254,00	61068,00	78138,00
		Потребление э/э факт, кВт*ч	92632,00	120633,00	97799,00	84386,00	86596,00	123794,00	60156,00	63181,00	71647,00	74048,00	106590,00	68309,00	Июль 2012
5	Береговая насосная, 1000м3 т/воды	Выработка продукции	20938,50	21401,20	21247,00	22186,00	21434,60	21835,00	20480,00	22116,70	22106,20	21389,20	21018,90	21306,00	21405,20
		Потребление э/э факт, кВт*ч	2868575,00	2931964,00	2910839,00	3039482,00	2936540,00	2991395,00	2805760,00	3029988,00	3028549,00	2930320,00	2879589,00	2918922,00	2932512,00
6	Выработка электроэнергии, кВт*ч (ЦЭС)	Выработка продукции	146584860,	142890700,0	140043590,0	140762750,0	124647010,0	147084400,0	140749590,0	129467140,0	126735550,0	122378600,0	138309990,00	119078460,00	125936710,00
		Потребление э/э факт, кВт*ч	8557024,00	8520011,00	8819921,00	8878283,00	7939462,00	8796719,00	8673931,03	8145145,00	8008835,00	7934489,00	8580743,77	8194547,97	8382181,26

Продолжение таблицы 4.26

1	2		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
7	Тепло с горячей водой, Гкал	Выработка продукции	50841,60	38838,32	37014,79	40173,19	51347,41	45009,71	39977,70	40862,06	44396,70	46357,86	36723,02	38764,65	37517,53
		Потребление э/э факт, кВт·ч	1965390,00	1229768,00	1238584,00	1192469,00	1337497,00	1844308,00	1369082,60	1369273,00	1407848,00	1252624,00	1705172,74	1409643,39	1238087,55
8	Тепло с паром, Гкал (ЦЭС)	Выработка продукции	51047,66	70089,37	40997,34	35404,14	27298,37	19787,95	21462,42	30329,06	29351,38	42127,54	25918,73	30676,92	33401,75
		Потребление э/э факт, кВт·ч	704458,00	1156475,00	705154,00	561156,00	384907,00	247349,00	356276,11	448870,00	434694,00	667721,00	323984,06	452484,59	492675,74
9	Химоводо-очистка мз оппцел.	Выработка продукции	168496,10	130228,28	148050,60	170371,43	145813,72	110945,34	67389,30	76974,91	64900,00	62937,10	184176,81	140300,03	166074,33
		Потребление э/э факт, кВт·ч	281713,00	194646,00	255551,00	290758,00	234176,00	194763,00	143008,27	107561,00	140367,00	114892,00	308413,43	217185,06	276972,46
10	Выработка электроэнергии, кВт·ч	Выработка продукции	63191360,00	46640600,00	47952040,00	55078160,00	63870880,00	50435560,00	64685960,00	63768360,00	63984600,00	64911240,00	72937960,00	68468800,00	68800000,00
		Потребление э/э факт, кВт·ч	2722453,00	1978859,00	1945344,00	2327030,00	2579141,00	1977140,00	2587480,00	2601720,00	2680915,00	2655644,00	3021364,00	2887140,00	2949773,00
11	Выработка дутья мз (ПВЭС)	Выработка продукции	2025524,00	1887485,00	1959799,00	2084381,00	1956394,00	1882123,00	2086923,00	2108143,00	2181025,00	2090260,00	2117678,00	2233923,00	2314639,00
		Потребление э/э факт, кВт·ч	4134763,00	3745908,00	4014315,00	4327801,00	3905209,00	3891433,00	4212890,00	4238048,00	4503073,00	4212711,00	4440746,00	4621180,00	4759177,00
12	Тепло отпущенное, Гкал (ПВЭС)	Выработка продукции	147898,37	113188,57	137471,98	155862,94	180963,86	189546,08	165344,10	163273,65	171086,48	166685,48	175824,91	144234,15	136477,65
		Потребление э/э факт, кВт·ч	2191023,00	1615790,00	2033984,00	2360077,00	2583894,00	2866239,00	2453277,00	2414907,00	2592350,00	2457421,00	2726866,00	2214033,00	2092027,00
13	Службы котельной (ПВЭС)	Выработка продукции	12337,41	17005,97	13521,50	10624,14	7757,71	14586,30	28151,98	30801,35	21922,11	18481,16	12288,84	16752,33	16315,09
		Потребление э/э факт, кВт·ч	182771,00	242762,00	200059,00	160870,00	110768,00	220568,00	417701,00	455569,00	332170,00	272464,00	190588,00	257153,00	250090,00

В таблице 4.27. приведены данные потребления электроэнергии станциями ТЭЦ, ЦЭС и ПВЭС: $W_{\text{вариант1}}$, $W_{\text{вариант2}}$, $W_{\text{р ммк}}$ – потребление электроэнергии, спрогнозированное соответственно по первому варианту расчетов, по второму варианту расчетов, по методике ОАО «ММК»; $W_{\text{о факт}}$ – фактическое общее потребление электроэнергии электростанциями.

Таблица 4.27

№	Дата	$W_{\text{вариант1}}$	$W_{\text{вариант2}}$	$W_{\text{р ммк}}$	$W_{\text{о факт}}$
1	Май 2010	47 464 241,73	47 576 252,00	47 737 366,67	47 576 252,00
2	Июнь 2010	42 749 132,39	42 683 011,00	42 929 646,43	42 683 011,00
3	Июль 2010	43 467 423,83	43 558 248,00	43 707 705,57	43 558 248,00
4	Август 2010	46 646 219,44	46 550 221,00	46 466 406,70	46 550 221,00
5	Сентябрь 2010	45 755 710,40	45 615 239,00	45 715 341,16	45 615 239,00
6	Май 2011	47 661 903,87	47 731 585,00	48 029 620,92	47 731 585,00
7	Июнь 2011	45 780 492,77	45 668 133,00	45 919 764,07	45 668 133,00
8	Июль 2011	45 979 526,15	46 020 702,00	46 167 703,95	46 020 702,00
9	Август 2011	47 274 842,55	47 284 410,00	47 326 079,12	47 284 410,00
10	Сентябрь 2011	46 962 839,99	46 978 179,00	47 128 058,44	46 978 179,00
11	Май 2012	48 098 328,89	48 122 165,00	74 865 225,03	48 122 165,00
12	Июнь 2012	46 032 272,31	46 235 081,00	46 237 204,28	46 235 081,00
13	Июль 2012	48 628 138,65	48 452 882,00	48 370 885,14	48 452 882,00
14	Август 2012	49 445 530,50	49 853 232,88	49 684 719,37	49 478 897,00
15	Сентябрь 2012	47 796 025,91	47 843 346,16	47 620 075,78	47 789 103,00

В таблице 4.28 приведены расчеты точности расчета потребления электроэнергии электростанциями ОАО «ММК» по сравнению с фактическими значениями.

Таблица 4.28

№	Дата	Потребление э.э, факт	Потребление э.э, расчет ОАО «ММК»	Е	$\frac{ W_{\text{ф.б}} - W_{\text{пл.б}} }{W_{\text{пл.б}}}$
1	2	3	4	5	6
1	Май 2010	47 576 252,00	47 737 366,67	-161 114,67	0,003375022
2	Июнь 2010	42 683 011,00	42 929 646,43	-246 635,43	0,005745108
3	Июль 2010	43 558 248,00	43 707 705,57	-149 457,57	0,003419479
4	Август 2010	46 550 221,00	46 466 406,70	83 814,30	0,001803761
5	Сентябрь 2010	45 615 239,00	45 715 341,16	-100 102,16	0,002189684
6	Май 2011	47 731 585,00	48 029 620,92	-298 035,92	0,006205252
7	Июнь 2011	45 668 133,00	45 919 764,07	-251 631,07	0,005479799
8	Июль 2011	46 020 702,00	46 167 703,95	-147 001,95	0,003184086

Окончание таблицы 4.28

1	2	3	4	5	6
9	Август 2011	47 284 410,00	47 326 079,12	-41 669,12	0,000880468
10	Сентябрь 2011	46 978 179,00	47 128 058,44	-149 879,44	0,003180259
11	Май 2012	48 122 165,00	74 865 225,03	-26 743 060,03	0,357216051
12	Июнь 2012	46 235 081,00	46 237 204,28	-2 123,28	4,59215E-05
13	Июль 2012	48 452 882,00	48 370 885,14	81 996,86	0,00169517
14	Август 2012	49 478 897,00	49 684 719,37	-205 822,37	0,004142569
15	Сентябрь 2012	47 789 103,00	47 620 075,78	169 027,22	0,003549495

В таблице 4.29 приведены расчеты точности восстановления данных по полученным зависимостям для первого и второго алгоритмов расчета.

Первые тринадцать точек входят в выборку данных, по которым построены прогнозные модели. Как видно из таблицы 4.29 восстановление данных по потреблению электроэнергии станциями по первому алгоритму осуществляется с приемлемой точностью, в то время как восстановление данных по второму алгоритму осуществляется с малой погрешностью.

В таблице 4.29 в строках 14-17 приведены расчеты прогнозных значений потребления электрической энергии станциями.

Таблица 4.29

№	Дата	Потребление э.э по варианту 1	E_1	$\frac{ W_{\phi i} - W_{n l i} }{W_{n l i}}$ Точность 1	Потребление э.э по варианту 2	E_2	$\frac{ W_{\phi i} - W_{n l i} }{W_{n l i}}$ Точность 2
1	2	3	4	5	6	7	8
Восстановление данных							
1	Май 2010	47 464 241,73	112 010,27	0,00235989	47 576 252,00	-0,00003128	6,57576E-13
2	Июнь 2010	42 749 132,39	-66 121,39	0,00154673	42 683 011,00	0,00003447	8,07497E-13
3	Июль 2010	43 467 423,83	90 824,17	0,00208948	43 558 248,00	0,00000495	1,13747E-13
4	Август 2010	46 646 219,44	-95 998,44	0,00205801	46 550 221,00	-0,00006694	1,43809E-12
5	Сентябрь 2010	45 755 710,40	-140 471,40	0,00307003	45 615 239,00	0,00003054	6,69512E-13
6	Май 2011	47 661 903,87	69 681,13	0,00146199	47 731 585,00	0,00001369	2,86899E-13
7	Июнь 2011	45 780 492,77	-112 359,77	0,00245432	45 668 133,00	0,00002126	4,65456E-13
8	Июль 2011	45 979 526,15	41 175,85	0,00089553	46 020 702,00	-0,00004797	1,04229E-12
9	Август 2011	47 274 842,55	9 567,45	0,00020238	47 284 410,00	0,00003389	7,16626E-13
10	Сентябрь 2011	46 962 839,99	15 339,01	0,00032662	46 978 179,00	-0,00002007	4,27259E-13
11	Май 2012	48 098 328,89	23 836,11	0,00049557	48 122 165,00	0,00000330	6,85881E-14
12	Июнь 2012	46 032 272,31	202 808,69	0,00440579	46 235 081,00	0,00001027	2,22059E-13
13	Июль 2012	48 628 138,65	-175 256,65	0,00360402	48 452 882,00	0,00001667	3,44136E-13

1	2	3	4	5	6	7	8
Прогноз							
14	Август 2012	49 445 530,50	33 366,50	0,00067481	49 853 232,88	-374 335,88	0,007508758
15	Сентябрь 2012	47 796 025,91	-6 922,91	0,00014484	47 843 346,16	-54 243,16	0,001133766
16	Май 2010	47 505 758,79	-1481026,8	0,03117573	46 621 355,43	-596 623,43	0,012797213
17	Июль 2011	42 535 324,32	2124388,7	0,04994410	43 448 013,34	1 211 699,66	0,027888494

Расчет точности прогнозирования потребления электроэнергии по методике, принятой на ОАО «ММК»:

$$\frac{\sum_{i=1}^n \frac{|W_{\phi i \phi} - W_{nl i \phi}|}{W_{nl i \phi}}}{n} = 0,486930966/17 = 0,028642998.$$

Расчет точности прогнозирования по варианту 1:

$$\frac{\sum_{i=1}^m \frac{|W_{\phi i} - W_{nl i}|}{W_{nl i}}}{m} = 0,081939492/4 = 0,020484873.$$

Расчет точности прогнозирования по варианту 2:

$$\frac{\sum_{i=1}^m \frac{|W_{\phi i} - W_{nl i}|}{W_{nl i}}}{m} = 0,049328232/4 = 0,012332058.$$

В таблице 4.30 приведено сравнение точности расчетов вычисления прогнозирования потребления электроэнергии станциями ОАО «ММК».

Таблица 4.30

Точность прогноза по методике ОАО «ММК»	Точность прогноза по варианту 1	Точность прогноза по варианту 2
0,028642998	0,020484873	0,012332058

Из таблицы 4.30 видно, что прогнозирование для заданной выборки исходных статистических данных осуществляется по второму алгоритму вычисления с большей точностью.

4.1.4 Технический эффект внедрения методики среднесрочного планирования и управления электропотреблением на ОАО «ММК»

4.1.4.1 Расчет технического эффекта для группы цехов (доменный цех, ЛПЦ-10, КХП)

Прогнозирование объемов потребления электроэнергии группой цехов (доменный цех (ДЦ), ЛПЦ-10, КХП) осуществлялось согласно разработанной методике, представленной в п. 2.2, с использованием статистических данных за период с января 2009 г. по декабрь 2014 г. Данные включают численные значения по фактической выработке продукции: чугуна (ДЦ), горячего проката ЛПЦ-10, кокса (КХП), а также по фактическому и расчетному потреблению электроэнергии для выработки указанных видов продукции.

Так как осуществляется математическая обработка, согласно разработанной методике прогнозирования, статистических данных, полученных не при контролируемом активном эксперименте, а в условиях реального производства, которое характеризуется значительными колебаниями объемов выпускаемой продукции, различным по интенсивности влиянием большого количества других производственных факторов, поэтому необходимо предварительно произвести выборку данных.

Выборка данных из общей статистики проводится с целью поиска максимально совместной подсистемы данных, для которой ошибка прогнозирования является минимальной при допустимом значении ошибки восстановления данных. На рис. 4.1 приводятся графики зависимости ошибки прогнозирования потребления электроэнергии группой цехов (ДЦ, ЛПЦ-10, КХП) от ошибки восстановления данных.

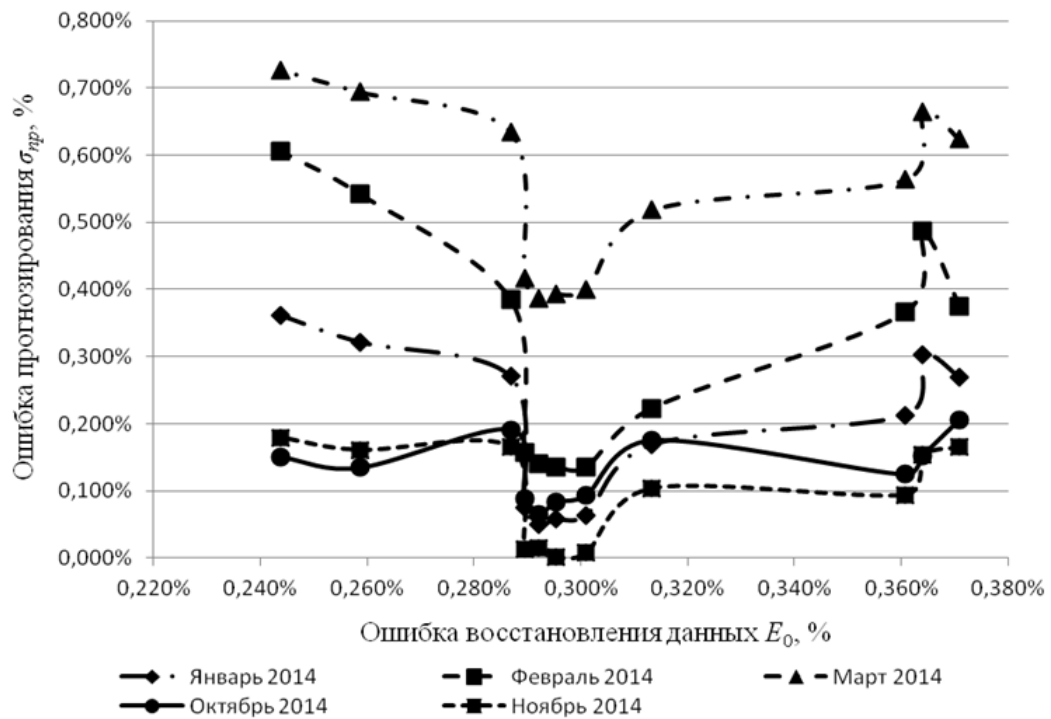


Рис. 4.1

Численные значения корректирующих коэффициентов a_i для каждого прогнозного месяца зимнего периода 2014 г., полученные при минимальном значении ошибки прогнозирования, приведены в таблице 4.31.

Таблица 4.31

Коэффициенты	Дата					
	Январь 2014	Февраль 2014	Март 2014	Октябрь 2014	Ноябрь 2014	Декабрь 2014
a_0	-73949,6	-228359,1	-73949,6	-73949,6	-169169,0	-1099146,6
a_1	0,845	0,829	0,845	0,845	0,834	1,058
a_2	0,994	0,997	0,994	0,994	0,995	1,000
a_3	1,035	1,040	1,035	1,035	1,039	1,036

Точность прогноза потребления электроэнергии определяется по соотношениям:

$$E_{i,M} = \frac{W_{\phi i} - W_{nl i,M}}{W_{nl i,M}}; \quad (4.1)$$

$$E_i = \frac{W_{\phi i} - W_{nl i}}{W_{nl i}}, \quad (4.2)$$

где $E_{i,M}$, E_i – точность прогнозирования потребления электроэнергии по методике ОАО «ММК» и по разработанной методике соответственно; $W_{\phi i}$ – фактический объем потребления электроэнергии за i -й месяц, тыс. кВт·ч;

$W_{nli,M}$, W_{nli} – плановый объем потребления электроэнергии за i -й месяц, рассчитанный соответственно по методике ОАО «ММК» и по разработанной методике, тыс. кВт·ч.

Численные значения фактического и планового объема потребления электроэнергии, а также точность прогноза потребления электроэнергии группой цехов (ДЦ, ЛПЦ-10, КХП) для зимнего периода 2014 г. приведены в таблице 4.32.

Таблица 4.32

Наименование величины	Дата					
	Январь 2014	Февраль 2014	Март 2014	Октябрь 2014	Ноябрь 2014	Декабрь 2014
$W_{\phi i}$	66239125	62639900	65886029	67776157	66599444	65147179
$W_{nli,M}$	66495512	62988017	66374891	67976277	66778934	65079238
W_{nli}	66272201	62724482	66141253	67819960	66598437	65128805
$E_{i,M}$	-0,00386	-0,00553	-0,00737	-0,00294	-0,00269	0,00104
E_i	-0,00050	-0,00135	-0,00386	-0,00065	0,00002	0,00028

Повышение точности прогноза потребления электроэнергии при использовании разработанной методики прогнозирования следует определять из выражения:

$$\frac{\sum_{i=1}^n \frac{|W_{\phi i} - W_{nli,M}|}{W_{nli,M}}}{n} - \frac{\sum_{i=1}^m \frac{|W_{\phi i} - W_{nli}|}{W_{nli}}}{m} > \Delta T, \quad (4.3)$$

где n , m – число месяцев; $\Delta T = 0,002$ (0,2%) – планируемое повышение точности прогноза согласно пункту 13 технического задания.

Подставляя численные значения из таблицы 4.32 в соотношение (4.3), получаем:

$$\frac{0,02342}{6} - \frac{0,00665}{6} = 0,0028. \quad (4.4)$$

Полученные результаты доказывают возможность повышения точности прогнозирования объемов потребления электроэнергии группой цехов (ДЦ, ЛПЦ-10, КХП) на величину 0,28%.

4.1.4.2 Расчет технического эффекта для электростанций (ТЭЦ, ЦЭС, ПВЭС)

Прогнозирование объемов потребления электроэнергии электростанциями ОАО «ММК» (ТЭЦ, ЦЭС, ПВЭС) осуществлялось согласно разработанной методике, представленной в п. 2.2, с использованием статистических данных за период с января 2009 г. по декабрь 2014 г. Данные включают численные значения по фактической выработке продукции: электроэнергии, тепла с острым паром ККП, тепла с горячей водой, на химводоочистку, на береговую насосную (ТЭЦ); электроэнергии, тепла с горячей водой, тепла с паром, на химводоочистку (ЦЭС); электроэнергии, дутья, отпущенное тепло, на собственные нужды котельной (ПВЭС), а также по фактическому и расчетному потреблению электроэнергии для выработки указанных видов продукции.

После проведения выборки статистических данных для электростанций получены графики зависимости ошибки прогнозирования потребления электроэнергии от ошибки восстановления данных, приведенные на рис. 4.2.

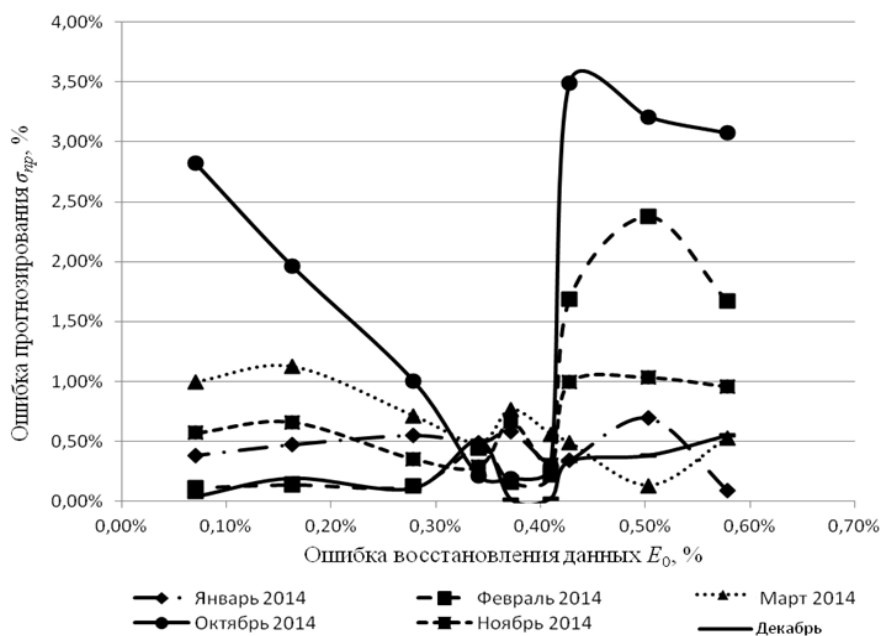


Рис. 4.2

Численные значения корректирующих коэффициентов a_i для каждого прогнозного месяца зимнего периода 2014 г., полученные при минимальном значении ошибки прогнозирования, приведены в таблице 4.33.

Таблица 4.33

Коэффициенты	Дата					
	Январь 2014	Февраль 2014	Март 2014	Октябрь 2014	Ноябрь 2014	Декабрь 2014
1	2	3	4	5	6	7
a_0	3611352,09	7626641,71	4840510,76	3884405,85	4788998,99	3884405,85
a_1	0,78	0,77	0,71	1,23	0,91	1,23
a_2	3,35	0,85	3,59	1,42	0,84	1,42
a_3	1,25	0,90	1,22	1,18	0,96	1,18
a_4	-13,81	-13,68	-18,88	-16,26	-12,07	-16,26
a_5	1,18	2,52	1,22	1,91	1,61	1,91
a_6	2,06	1,52	1,88	1,38	1,57	1,38
a_7	1,11	1,53	0,98	1,02	1,05	1,02
a_8	-0,05	0,10	-0,25	-0,96	-0,63	-0,96
a_9	0,63	0,63	2,59	-2,34	-1,93	-2,34
a_{10}	2,55	2,43	2,48	2,10	2,25	2,10
a_{11}	-1,18	-0,74	-1,03	-0,19	0,34	-0,19
a_{12}	-1,40	-0,52	-1,12	-0,41	-0,02	-0,41
a_{13}	-4,62	0,32	-3,05	-1,09	2,67	-1,09

В таблице 4.34 приведены численные значения фактического и планового объема потребления электроэнергии, а также точность прогноза потребления электроэнергии электростанциями (ТЭЦ, ЦЭС, ПВЭС), определенная по соотношениям (4.1), (4.2).

Таблица 4.34

Наименование величины	Дата					
	Январь 2014	Февраль 2014	Март 2014	Октябрь 2014	Ноябрь 2014	Декабрь 2014
$W_{\phi i}$	57102442	52733380	54346738	53617004	53117158	56339097
$W_{\text{пл},M}$	57344454	53329634	54614726	53211908	52791498	56830015
$W_{\text{пл}}$	57051796	52791472	54275303	53719231	52964369	56347535
$E_{i,M}$	-0,00422	-0,01118	-0,00491	0,00761	0,00617	-0,00864
E_i	0,00089	-0,00110	0,00132	-0,00190	0,00288	-0,00015

Повышение точности прогноза потребления электроэнергии при использовании разработанной методики прогнозирования следует определять из выражения (4.3). Подставляя численные значения из таблицы 4.34 в соотношение (4.3), получаем:

$$\frac{0,04273}{6} - \frac{0,00824}{6} = 0,00575 . \quad (4.5)$$

Полученные результаты доказывают возможность повышения точности прогнозирования объемов потребления электроэнергии электростанциями (ТЭЦ, ЦЭС, ПВЭС) на величину 0,575%.

4.2 Результаты проведения экспериментальных исследований методики краткосрочного планирования электропотребления на реальных данных металлургических предприятий

4.2.1 Результаты проведения экспериментальных исследований методики почасового планирования электропотребления для ЛПЦ-4, ЛПЦ-5, ЛПЦ-9 ОАО «ММК»

Апробация методики почасового планирования электропотребления осуществлялась на реальных данных почасового потребления электрической энергии листопрокатными цехами ОАО «ММК» (ЛПЦ-4, ЛПЦ-5, ЛПЦ-9) в период с января по август 2013 г., предоставленных Центром энергосберегающих технологий ОАО «ММК», а также на данных по индексу равновесных цен на продажу электроэнергии, полученных с сайта компании ОАО «АТС».

Данные по индексу равновесных цен на продажу электроэнергии на оптовом рынке приведены в таблице 4.35.

Таблица 4.35

Индекс равновесных цен на продажу электроэнергии

Час	Индекс равновесных цен на продажу электроэнергии, руб./МВт·ч
1	2
0	892.13
1	845.26
2	812.47
3	773.20
4	843.24
5	995.09
6	1124.69
7	1301.07
8	1357.64
9	1386.07
10	1383.42
11	1351.44
12	1339.91
13	1348.77
14	1388.21
15	1403.29
16	1373.81

Окончание таблицы 4.35

1	2
17	1326.52
18	1358.12
19	1410.46
20	1339.64
21	1308.17
22	1271.68
23	1186.29

Принимая в качестве постоянной части индекса равновесных цен на продажу электроэнергии на оптовом рынке минимальный индекс равновесных цен (773.20 руб./МВт·ч), на основе соотношения (2.3) можно определить переменную часть (см. таблицу 4.36).

Таблица 4.36

Переменная часть индекса
равновесных цен на продажу электроэнергии

Час	Переменная часть индекса равновесных цен на продажу электроэнергии, руб./МВт·ч
1	2
0	118,93
1	72,06
2	39,27
3	0
4	70,04
5	221,89
6	351,49
7	527,87
8	584,44
9	612,87
10	610,22
11	578,24
12	566,71
13	575,57
14	615,01
15	630,09
16	600,61
17	553,32
18	584,92
19	637,26
20	566,44
21	534,97
22	498,48
23	413,09

Для зимнего периода (январь-февраль 2013 г.) за базовый график потребления электроэнергии $\{P_o(t_k)\}$ для ЛПЦ-4, ЛПЦ-5, ЛПЦ-9 примем график потребления 14.01.2013 г. соответствующих цехов.

По соотношению (2.4) на основе данных по текущему потреблению электроэнергии и переменной части индекса равновесных цен на продажу электроэнергии на оптовом рынке, приведенной в таблице 4.36, можно рассчитать переменную часть стоимости покупки электроэнергии $\Delta C_o(t_k)$.

Далее по соотношению (2.7) можно рассчитать индекс снижения стоимости потребления электроэнергии I_{cn} .

В таблице 4.37 приведены численные посуточные значения индекса снижения стоимости потребления электроэнергии I_{cn} и потребления электроэнергии W_o для зимнего периода (январь-февраль 2013 г.) для ЛПЦ-4, ЛПЦ-5, ЛПЦ-9.

Таблица 4.37

№ п/п	Дата	Индекс снижения стоимости потребления электроэнергии I_{cn}	Потребление электроэнергии W_o
1	2	3	4
ЛПЦ-4			
1	02.01.2013	0,9783	836,14
2	03.01.2013	0,9815	766,62
3	04.01.2013	0,9819	829,08
4	05.01.2013	0,9689	822,06
5	06.01.2013	0,9912	823,40
6	07.01.2013	0,9903	758,96
7	08.01.2013	0,9713	753,55
8	09.01.2013	0,9806	839,85
9	10.01.2013	0,9282	671,37
10	11.01.2013	1,0062	806,28
11	12.01.2013	0,9718	737,85
12	13.01.2013	1,0031	816,48
13	14.01.2013	1,0000	771,39
14	15.01.2013	0,9878	717,90
15	16.01.2013	1,0885	777,92
16	17.01.2013	0,7197	425,21
17	18.01.2013	1,1156	581,90

Продолжение таблицы 4.37

1	2	3	4
18	19.01.2013	0,9751	722,73
19	20.01.2013	0,9660	699,42
20	21.01.2013	1,0108	690,81
...			
55	25.02.2013	1,0199	712,25
56	26.02.2013	0,9705	683,35
57	27.02.2013	1,0461	744,16
58	28.02.2013	1,0009	801,96
ЛПЦ-5			
1	02.01.2013	0,9211	534,32
2	03.01.2013	0,9347	481,58
3	04.01.2013	0,9795	502,22
4	05.01.2013	0,9256	489,08
5	06.01.2013	0,9579	501,68
6	07.01.2013	0,9179	520,43
7	08.01.2013	0,9794	527,62
8	09.01.2013	0,9230	495,56
9	10.01.2013	0,9090	538,28
10	11.01.2013	0,9647	543,37
11	12.01.2013	0,9698	539,23
12	13.01.2013	0,9360	544,04
13	14.01.2013	1,0000	504,24
14	15.01.2013	0,9328	521,71
15	16.01.2013	0,9376	515,57
16	17.01.2013	0,9210	454,75
17	18.01.2013	0,9013	495,30
18	19.01.2013	0,9926	495,73
19	20.01.2013	0,9838	516,92
20	21.01.2013	0,9451	459,38
...			
55	25.02.2013	0,9905	501,46
56	26.02.2013	0,9466	487,32
57	27.02.2013	0,9016	447,33
58	28.02.2013	1,0143	470,25
ЛПЦ-9			
1	02.01.2013	1,0187	626,4300
2	03.01.2013	1,0192	607,5600
3	04.01.2013	1,0168	647,8300
4	05.01.2013	1,0210	623,8400
5	06.01.2013	1,0181	623,3000
6	07.01.2013	1,0038	616,9100
7	08.01.2013	1,0206	624,6000
8	09.01.2013	1,0088	617,2200
9	10.01.2013	1,0119	629,2000
10	11.01.2013	1,0135	615,7500
11	12.01.2013	1,0154	599,0700

Окончание таблицы 4.38

12	13.01.2013	1,0081	585,4900
13	14.01.2013	1,0000	609,3000
14	15.01.2013	1,0166	595,1100
15	16.01.2013	1,0000	587,2400
16	17.01.2013	1,0119	562,8400
17	18.01.2013	1,1189	531,2100
18	19.01.2013	1,0136	607,6600
...			
55	25.02.2013	1,0169	649,9900
56	26.02.2013	1,0164	621,6400
57	27.02.2013	1,0235	629,1600
58	28.02.2013	1,0127	619,4600

Далее определим индекс снижения стоимости потребления электроэнергии $I_{сн}$ совместно для ЛПЦ-4, ЛПЦ-5, ЛПЦ-9 для зимнего периода (январь-февраль 2013 г.). Расчет осуществляется по методике, приведенной в п. 2.1. Численные значения индекса снижения стоимости потребления электроэнергии $I_{сн}$ приведены в таблице 4.38.

Таблица 4.38

№ п/п	Дата	Индекс снижения стоимости потребления электроэнергии $I_{сн}$	Потребление электроэнергии W_9
1	2	3	4
1	02.01.2013	0,972	1996,89
2	03.01.2013	0,978	1855,76
3	04.01.2013	0,992	1979,13
4	05.01.2013	0,971	1934,98
5	06.01.2013	0,988	1948,38
6	07.01.2013	0,970	1896,3
7	08.01.2013	0,990	1905,77
8	09.01.2013	0,970	1952,63
9	10.01.2013	0,949	1838,85
10	11.01.2013	0,994	1965,4
11	12.01.2013	0,985	1876,15
12	13.01.2013	0,982	1946,01
13	14.01.2013	1,000	1884,93
14	15.01.2013	0,978	1834,72
15	16.01.2013	1,008	1880,73
16	17.01.2013	0,884	1442,8
17	18.01.2013	1,043	1608,41
18	19.01.2013	0,994	1826,12
19	20.01.2013	0,985	1819,47
20	21.01.2013	0,994	1736,72

1	2	3	4
21	22.01.2013	0,955	1755,64
22	23.01.2013	1,003	1751,17
23	24.01.2013	0,962	1657,24
24	25.01.2013	1,043	1748,16
25	26.01.2013	0,978	1938,67
26	27.01.2013	1,003	1873,26
27	28.01.2013	0,944	1831,09
28	29.01.2013	0,936	1615
29	30.01.2013	0,989	1554,33
30	31.01.2013	0,633	1497,22
31	01.02.2013	1,019	1728,14
32	02.02.2013	0,973	1966,29
33	03.02.2013	0,978	1911,33
34	04.02.2013	0,955	1720,68
35	05.02.2013	0,969	1783,9
36	06.02.2013	0,991	1948,18
37	07.02.2013	0,942	1611,67
38	08.02.2013	1,028	1552,37
39	09.02.2013	0,975	1721,79
40	10.02.2013	0,999	1828,31
41	11.02.2013	0,953	1574,8
42	12.02.2013	1,037	1615,76
43	13.02.2013	0,983	1963,56
44	14.02.2013	0,978	1926,58
45	15.02.2013	0,988	1914,11
46	16.02.2013	0,976	1781,28
47	17.02.2013	0,991	1836,04
48	18.02.2013	0,970	1854,03
49	19.02.2013	0,995	1918,88
50	20.02.2013	0,993	1945,91
51	21.02.2013	0,983	1956,65
52	22.02.2013	0,981	2024,98
53	23.02.2013	0,967	1936,81
54	24.02.2013	0,958	1864,85
55	25.02.2013	1,009	1863,7
56	26.02.2013	0,977	1792,31
57	27.02.2013	0,989	1820,65
58	28.02.2013	1,009	1891,67

С целью уменьшения значения индекса снижения стоимости потребления электроэнергии $I_{сн}$ были проведены исследования, заключающиеся во временном смещении графиков потребления электроэнергии ЛПЦ-4, ЛПЦ-5, ЛПЦ-9. Результаты проведенных исследований приведены на рис. 4.3-4.8.

На рис. 4.3 приведены графики изменения значений индекса снижения стоимости потребления электроэнергии $I_{сн}$ при временном смещении (на 3, 6, 9 и 12 часов) графика потребления электроэнергии ЛПЦ-4.

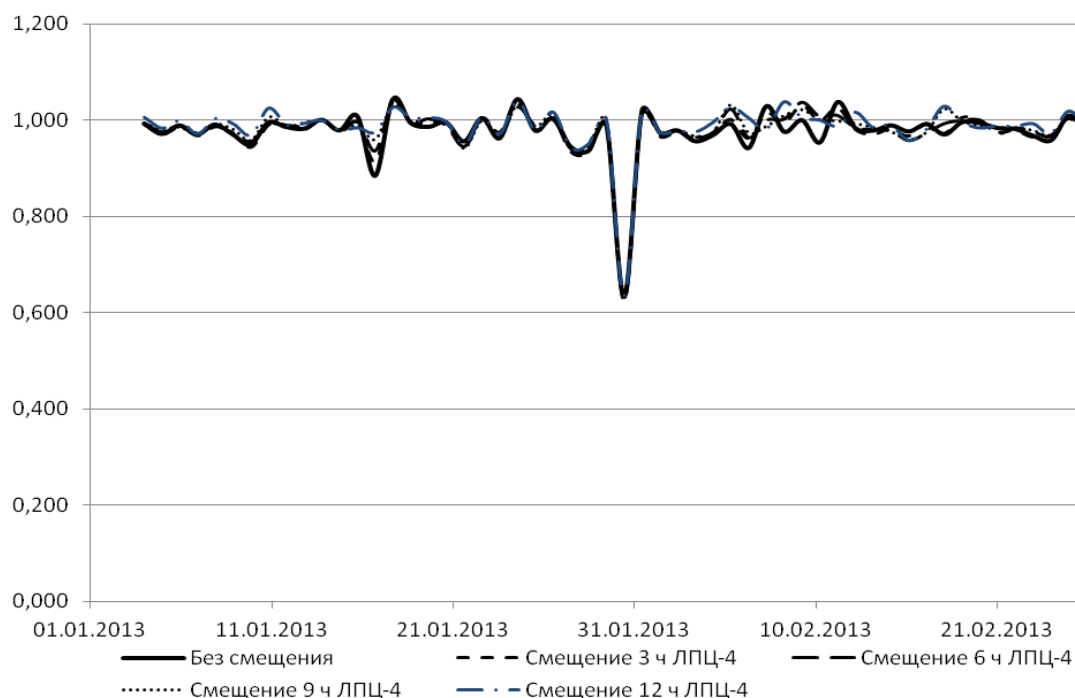


Рис. 4.3

На рис. 4.4 приведены графики изменения значений индекса снижения стоимости потребления электроэнергии $I_{сн}$ при временном смещении (на 3, 6, 9 и 12 часов) графика потребления электроэнергии ЛПЦ-5.

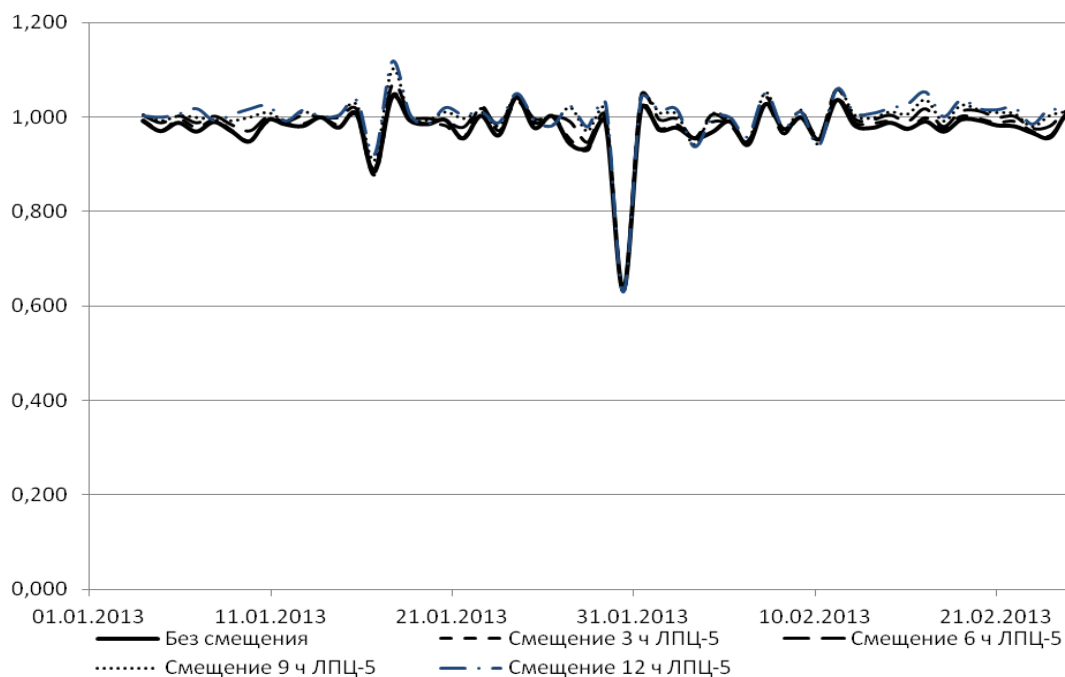


Рис. 4.4

На рис. 4.5 приведены графики изменения значений индекса снижения стоимости потребления электроэнергии $I_{сн}$ при временном смещении (на 3, 6, 9 и 12 часов) графика потребления электроэнергии ЛПЦ-9.

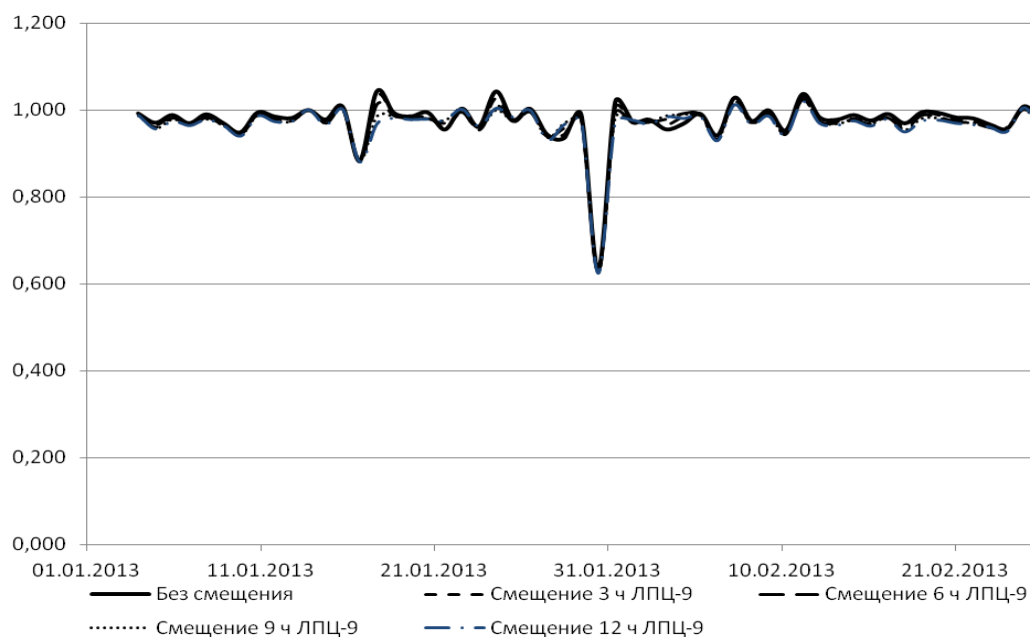


Рис. 4.5

На рис. 4.6 приведены графики изменения значений индекса снижения стоимости потребления электроэнергии $I_{сн}$ при временном смещении (на 3, 6 и 9 часов) графика потребления электроэнергии ЛПЦ-4, ЛПЦ-5.

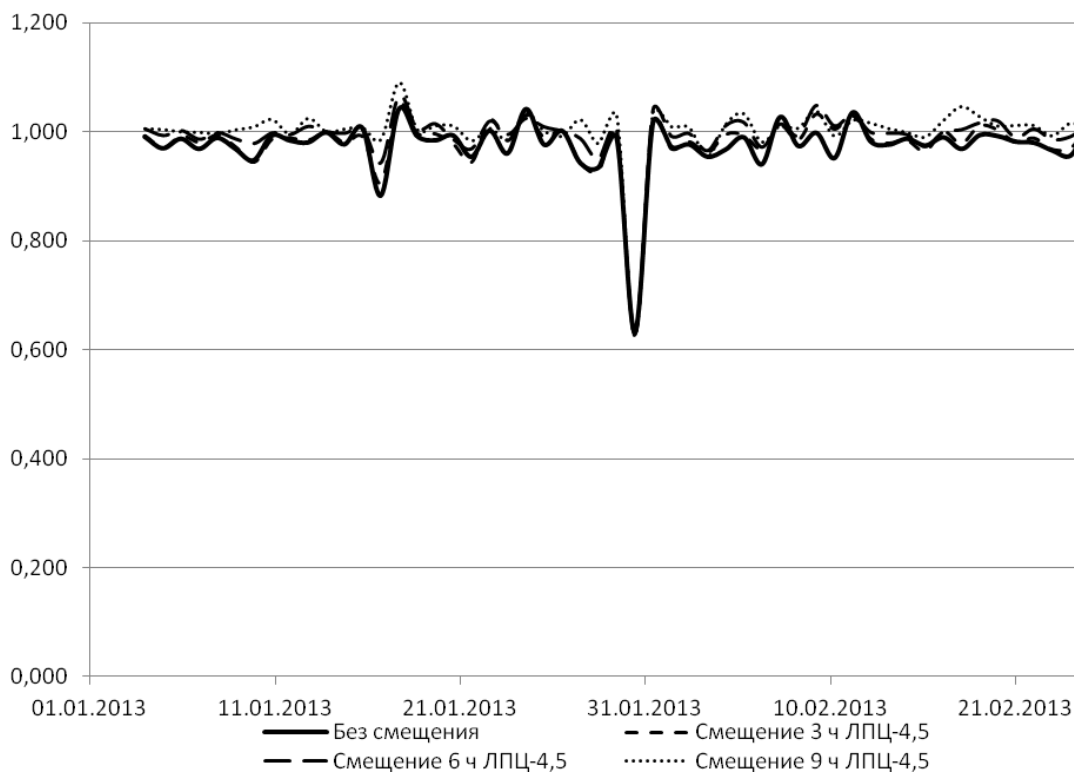


Рис. 4.6

На рис. 4.7 приведены графики изменения значений индекса снижения стоимости потребления электроэнергии $I_{сн}$ при временном смещении (на 3, 6 и 9 часов) графика потребления электроэнергии ЛПЦ-4, ЛПЦ-9.

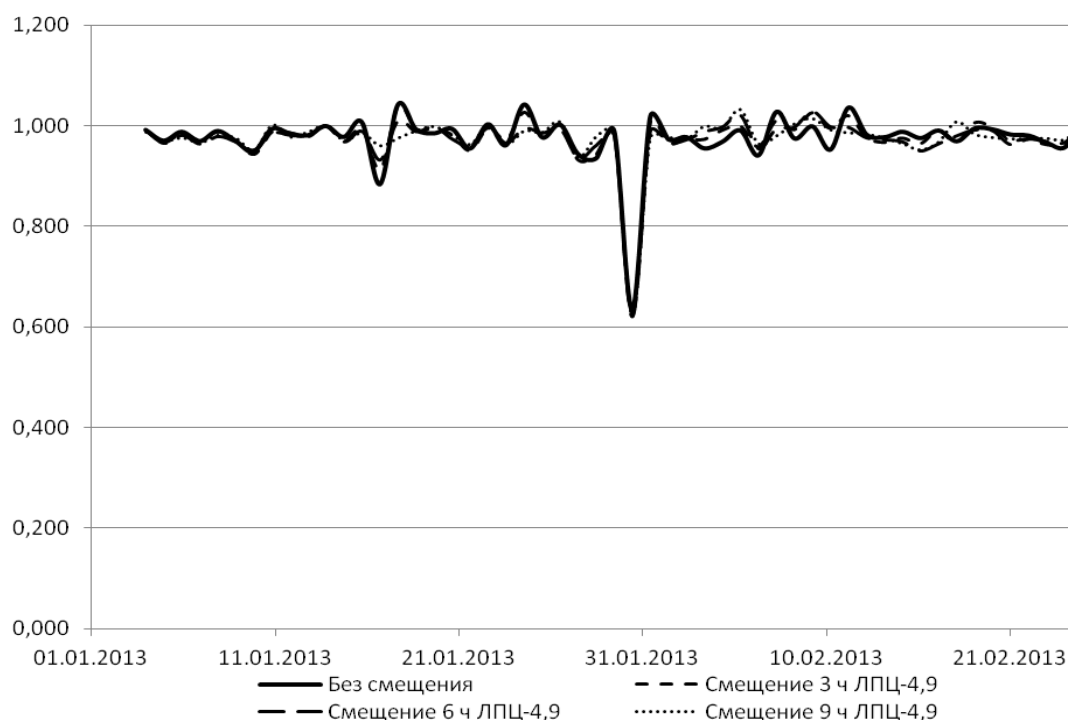


Рис. 4.7

На рис. 4.8 приведены графики изменения значений индекса снижения стоимости потребления электроэнергии $I_{сн}$ при временном смещении (на 3, 6 и 9 часов) графика потребления электроэнергии ЛПЦ-5, ЛПЦ-9.

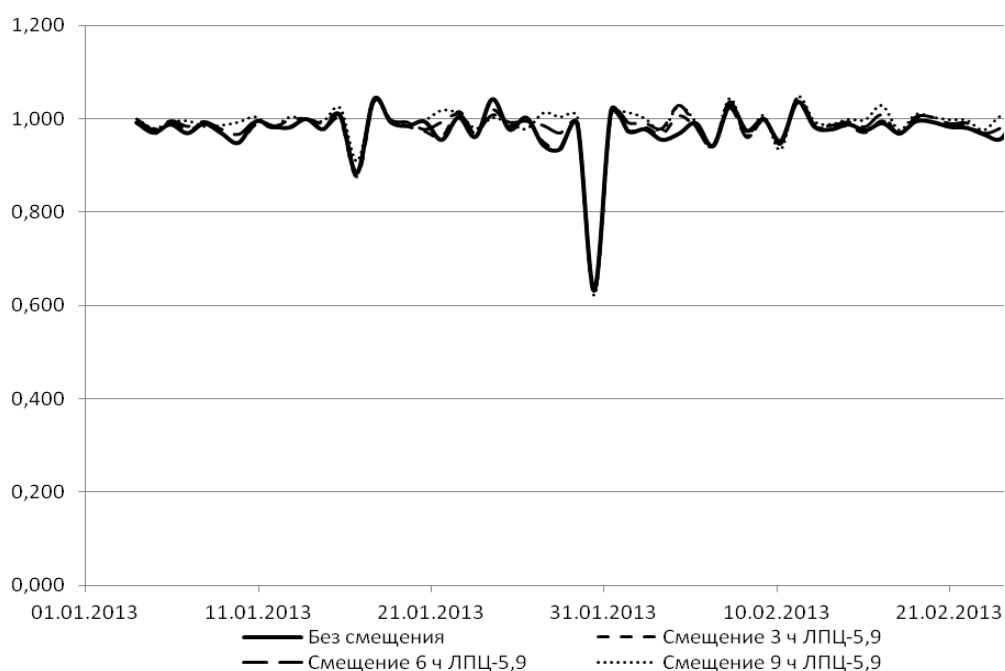


Рис. 4.8

Из приведенных графиков видно, что при временных смещениях графика потребления электроэнергии ЛПЦ-9 возможно уменьшение значения индекса снижения стоимости потребления электроэнергии $I_{сн}$.

4.2.2 Результаты проведения экспериментальных исследований методики почасового планирования электропотребления для металлургического предприятия 1-й ценовой зоны

Апробация методики почасового планирования электропотребления для сложных производственных комплексов проводилась на реальных данных почасового потребления электрической энергии агрегатами электросталеплавильного цеха металлургического предприятия 1-й ценовой зоны в период за сентябрь 2014 г., а также на данных по индексу равновесных цен на продажу электроэнергии, полученных с сайта компании ОАО «АТС».

Данные по индексу равновесных цен на продажу электроэнергии на оптовом рынке приведены в таблице 4.39.

Таблица 4.39

Индекс равновесных цен на продажу электроэнергии, руб./МВт·ч

Время	01.09.14	02.09.14	03.09.14	04.09.14	05.09.14	06.09.14	07.09.14	08.09.14	09.09.14	10.09.14
0:00	1091,08	1073,01	1150,83	930,45	969,14	979,47	1071,77	1099,03	997,77	1001,08
1:00	1028,75	999,25	908,75	846,19	946,22	984,53	1005,25	1020,64	948,35	969,63
2:00	1009,50	992,64	869,98	860,79	1143,79	985,60	988,95	977,55	940,78	973,69
3:00	998,70	944,59	859,68	844,55	1141,55	929,44	966,09	929,15	857,06	926,10
4:00	1001,99	1015,14	901,82	900,61	1140,57	1019,13	995,67	932,13	944,44	986,47
5:00	1002,81	1075,40	928,49	949,06	1137,96	1084,71	1016,36	933,70	997,43	1037,00
6:00	1018,01	1162,07	1085,77	1095,85	1080,74	1119,81	1046,62	984,47	1083,97	1070,06
7:00	1042,82	1222,72	1173,59	1155,94	1135,65	1243,35	1075,13	968,13	1195,11	1146,20
8:00	1117,86	1405,36	1557,13	1301,04	1289,04	1388,25	1130,18	1067,42	1229,59	1227,54
9:00	1193,97	1446,09	1682,52	1313,96	1325,76	1438,22	1204,00	1115,06	1284,36	1256,93
10:00	1281,16	1432,90	1716,89	1309,09	1318,17	1438,20	1226,95	1136,86	1265,93	1257,13
11:00	1273,65	1424,57	1605,63	1290,38	1289,30	1418,81	1220,49	1133,12	1266,68	1235,55
12:00	1242,79	1348,97	1589,41	1267,17	1273,44	1414,03	1214,52	1131,50	1269,76	1201,33
13:00	1259,85	1500,12	1727,34	1298,50	1308,29	1434,73	1200,71	1131,75	1263,06	1197,61
14:00	1264,54	1515,79	1725,95	1323,12	1304,90	1431,36	1185,37	1130,27	1245,52	1196,96
15:00	1270,89	1568,30	1721,51	1343,93	1314,37	1445,74	1198,40	1149,50	1242,83	1207,18
16:00	1273,38	1522,52	1684,17	1331,87	1317,87	1447,16	1203,03	1172,34	1251,34	1208,32
17:00	1292,80	1310,02	1555,85	1307,32	1320,75	1451,13	1216,38	1193,18	1236,90	1217,19
18:00	1341,07	1328,44	1328,70	1317,72	1287,06	1425,70	1225,43	1216,41	1230,16	1224,53

Продолжение таблицы 4.39

Время	01.09.14	02.09.14	03.09.14	04.09.14	05.09.14	06.09.14	07.09.14	08.09.14	09.09.14	10.09.14
19:00	1315,64	1426,56	1302,21	1285,63	1264,82	1398,51	1219,34	1235,41	1208,41	1200,41
20:00	1337,71	1526,46	1299,25	1286,51	1304,20	1415,11	1237,89	1232,28	1178,37	1184,75
21:00	1359,62	1571,67	1291,33	1247,17	1184,17	1345,72	1193,94	1193,52	1085,81	1137,55
22:00	1314,74	1302,05	1131,70	1129,12	1078,94	1157,23	1119,97	1115,81	996,70	1048,30
23:00	1143,50	1050,39	993,70	988,59	990,92	1039,46	1039,14	1029,77	978,49	987,65
0:00	967,71	1021,83	1023,84	1132,32	1114,29	1018,87	1025,72	1031,84	966,07	1003,71
1:00	884,20	965,69	956,19	1076,13	1058,60	933,14	976,38	984,84	851,01	924,68
2:00	891,76	946,34	917,82	1085,78	1017,54	934,88	952,62	965,05	846,47	906,60
3:00	893,98	897,69	877,03	1035,34	942,29	906,24	930,65	931,93	839,39	909,69
4:00	1009,69	1036,73	1033,64	1048,25	961,80	962,06	1013,48	1005,45	858,95	975,99
5:00	1092,56	1105,37	1104,44	1089,52	971,20	1065,67	1098,44	1109,48	1005,24	1079,84
6:00	1070,66	1126,48	1139,18	1070,30	1015,13	1161,57	1161,61	1160,68	1113,16	1143,90
7:00	1163,57	1250,81	1290,22	1140,29	1073,01	1326,48	1319,17	1270,15	1177,93	1327,03
8:00	1230,29	1308,04	1355,77	1184,10	1131,40	1341,14	1301,27	1291,23	1291,00	1390,37
9:00	1229,85	1329,26	1438,89	1285,63	1180,20	1354,51	1394,77	1316,56	1332,70	1468,66
10:00	1210,47	1322,31	1425,42	1279,46	1207,37	1356,16	1389,51	1311,44	1312,92	1457,11
11:00	1189,93	1288,07	1363,83	1272,59	1201,42	1325,34	1382,06	1314,50	1284,28	1411,32
12:00	1177,70	1268,54	1314,07	1272,35	1196,35	1328,68	1353,70	1303,01	1272,03	1351,35
Время	11.09.14	12.09.14	13.09.14	14.09.14	15.09.14	16.09.14	17.09.14	18.09.14	19.09.14	20.09.14
13:00	1170,99	1266,62	1306,39	1240,53	1184,42	1338,89	1358,96	1302,48	1261,93	1350,56
14:00	1166,70	1268,89	1242,70	1199,77	1176,00	1315,36	1336,82	1274,39	1245,34	1323,96
15:00	1167,04	1270,57	1246,12	1200,77	1172,74	1313,47	1356,99	1267,45	1246,03	1323,81
16:00	1175,56	1294,17	1247,20	1204,87	1185,54	1310,01	1376,99	1282,63	1249,59	1341,23
17:00	1194,83	1300,12	1279,94	1248,65	1219,82	1321,64	1398,40	1319,79	1280,66	1362,64
18:00	1221,04	1308,81	1299,41	1312,93	1289,10	1336,41	1427,14	1350,84	1314,48	1389,17
19:00	1215,51	1290,73	1280,98	1312,43	1301,03	1303,16	1352,76	1298,01	1350,62	1372,14
20:00	1194,37	1265,30	1285,69	1320,08	1264,43	1294,59	1349,01	1265,28	1311,01	1396,48
21:00	1159,21	1196,04	1256,50	1242,67	1200,65	1195,69	1243,63	1219,29	1236,36	1318,85
22:00	1053,13	1098,83	1181,60	1143,73	1111,96	1112,17	1127,81	1098,96	1127,20	1160,83
23:00	1002,22	995,10	1100,92	1113,35	1055,14	1034,94	1060,82	1031,71	1097,51	1067,18
Время	21.09.14	22.09.14	23.09.14	24.09.14	25.09.14	26.09.14	27.09.14	28.09.14	29.09.14	30.09.14
0:00	1118,43	1044,71	992,22	940,51	939,10	922,58	859,08	966,83	1004,45	865,03
1:00	1070,45	1001,02	889,74	855,68	854,13	845,02	747,58	929,55	932,05	822,15
2:00	1071,69	919,21	826,46	689,85	688,02	728,44	693,23	872,14	848,47	689,61
3:00	1062,22	895,25	706,90	733,32	731,57	718,66	691,66	863,20	793,11	738,27
4:00	1081,99	858,86	889,56	806,52	804,88	820,46	777,69	874,37	846,79	842,25
5:00	1083,42	903,28	984,60	962,38	961,01	957,64	942,91	925,64	857,73	947,39
6:00	1112,70	986,94	1090,02	1078,16	1076,99	1080,61	1024,45	996,09	911,21	1093,96
7:00	1139,75	1048,50	1181,85	1160,44	1159,41	1111,85	1144,54	1073,32	990,85	1185,56
8:00	1263,79	1108,80	1249,90	1274,01	1273,17	1214,83	1188,66	1149,10	1099,30	1237,84
9:00	1299,64	1173,87	1281,61	1320,10	1319,34	1233,20	1235,40	1163,84	1149,81	1236,12
10:00	1289,56	1246,10	1242,55	1308,15	1307,37	1212,30	1208,74	1159,22	1145,87	1235,11
11:00	1279,33	1251,60	1229,59	1274,58	1273,74	1207,67	1196,50	1164,39	1145,42	1218,07
12:00	1276,28	1237,77	1220,20	1245,82	1244,94	1202,71	1195,53	1176,78	1143,57	1216,99
13:00	1269,00	1233,59	1214,55	1241,55	1240,65	1204,95	1199,13	1166,16	1143,22	1212,36
14:00	1271,01	1241,16	1214,30	1223,17	1222,24	1198,19	1169,47	1157,44	1125,43	1186,67

Окончание таблицы 4.39

Время	21.09.14	22.09.14	23.09.14	24.09.14	25.09.14	26.09.14	27.09.14	28.09.14	29.09.14	30.09.14
15:00	1285,91	1260,21	1217,46	1225,55	1224,63	1186,32	1164,79	1159,61	1141,13	1191,50
16:00	1307,73	1290,79	1234,43	1272,08	1271,24	1206,23	1182,58	1177,72	1160,88	1220,50
17:00	1334,57	1316,20	1249,37	1285,55	1284,73	1203,97	1195,51	1190,21	1177,07	1238,66
18:00	1373,90	1378,15	1249,60	1287,50	1286,68	1234,35	1203,98	1221,69	1258,85	1244,22
19:00	1406,07	1443,06	1248,87	1296,94	1296,14	1255,21	1202,79	1186,79	1248,43	1225,35
20:00	1396,96	1450,26	1205,68	1238,23	1237,33	1190,49	1190,41	1147,08	1191,83	1167,46
21:00	1275,47	1312,35	1181,39	1179,19	1178,19	1135,94	1124,37	1107,42	1146,57	1150,97
22:00	1199,24	1188,08	1101,46	1069,01	1067,83	1026,24	1034,95	1074,91	1090,62	1067,26
23:00	1133,79	1141,46	1054,38	1019,74	1018,47	1029,54	1043,08	1094,78	1013,35	1064,83

В таблице 4.40 представлены данные по переменной части индекса равновесных цен на продажу электроэнергии.

Таблица 4.40

Переменная часть индекса
равновесных цен на продажу электроэнергии, руб./МВт·ч

Время	01.09.14	02.09.14	03.09.14	04.09.14	05.09.14	06.09.14	07.09.14	08.09.14	09.09.14	10.09.14
0:00	36,17	144,77	415,40	108,29	254,51	49,81	21,71	24,79	6,84	122,43
1:00	7,97	85,83	329,65	34,84	214,28	81,82	25,30	17,61	28,47	204,93
2:00	79,58	171,25	96,05	65,01	294,85	136,21	6,74	86,16	37,48	13,21
3:00	67,67	141,38	42,44	223,66	314,05	69,85	8,34	99,30	87,45	18,91
4:00	163,89	387,15	208,91	90,61	258,12	41,73	17,87	85,04	100,19	14,02
5:00	150,73	181,62	21,51	6,97	210,46	32,76	18,25	138,04	35,51	31,87
6:00	148,23	34,57	44,44	14,35	56,24	95,83	71,73	108,13	106,46	106,35
7:00	96,07	113,66	63,37	116,58	136,79	120,74	83,71	137,03	163,07	114,13
8:00	30,21	60,70	295,13	40,20	95,49	54,66	120,64	151,30	151,85	59,98
9:00	48,73	154,25	469,30	21,01	45,06	229,86	69,49	115,96	99,23	10,03
10:00	68,91	121,49	564,08	71,86	23,57	249,61	96,08	83,84	70,85	42,01
11:00	96,14	172,66	502,04	138,79	84,34	241,62	89,31	69,85	54,05	13,00
12:00	110,55	109,57	546,22	136,88	35,23	286,03	57,10	59,12	50,13	22,75
13:00	88,68	286,23	633,51	139,28	69,14	395,14	65,80	55,86	42,99	19,40
14:00	123,98	378,94	661,61	163,25	43,53	499,92	77,80	60,71	11,30	40,46
15:00	139,20	343,71	623,64	125,20	60,77	399,60	72,02	58,82	21,94	37,16
16:00	183,10	370,95	683,89	206,37	118,11	402,49	81,09	54,00	55,98	110,37
17:00	86,79	125,23	501,76	149,16	52,97	241,30	126,94	82,56	11,98	34,96
18:00	7,26	129,04	143,74	54,96	122,25	124,62	101,72	96,52	10,10	48,45
19:00	21,50	257,92	128,98	25,32	166,11	96,62	154,18	108,12	52,25	81,81
20:00	75,59	427,72	142,98	87,19	127,48	206,23	99,67	54,93	101,84	18,58
21:00	144,58	534,95	636,13	174,29	81,19	380,28	29,47	19,05	1136,21	100,57
22:00	239,45	403,34	281,48	154,35	240,76	358,77	15,66	19,42	43,54	82,35
23:00	136,62	324,53	186,51	78,97	65,27	103,67	33,73	9,82	76,77	65,30
Время	11.09.14	12.09.14	13.09.14	14.09.14	15.09.14	16.09.14	17.09.14	18.09.14	19.09.14	20.09.14
0:00	24,92	50,74	19,26	75,28	42,19	5,71	38,10	45,75	74,47	15,24
1:00	61,95	154,74	41,69	12,30	27,49	15,41	35,33	109,09	55,27	18,37
2:00	10,44	59,38	27,76	28,62	35,27	24,65	40,87	73,14	7,69	8,72
3:00	25,66	27,56	73,54	26,16	20,69	46,20	56,65	29,40	18,37	30,95

Окончание таблицы 4.40

Время	11.09.14	12.09.14	13.09.14	14.09.14	15.09.14	16.09.14	17.09.14	18.09.14	19.09.14	20.09.14
4:00	35,09	70,50	64,64	57,81	95,56	24,22	88,64	52,85	103,67	31,51
5:00	34,20	20,63	13,12	25,96	112,24	35,72	87,35	60,78	138,57	80,53
6:00	160,21	50,19	144,72	17,03	80,32	127,90	179,20	100,77	104,37	120,76
7:00	90,14	16,11	71,65	118,17	92,78	74,56	79,35	138,47	162,19	133,35
8:00	131,21	43,50	64,76	58,04	120,42	137,62	127,92	124,09	71,16	85,98
9:00	76,52	113,77	54,56	5,84	88,86	57,94	92,23	99,74	6,77	19,90
10:00	211,17	148,63	175,19	18,26	38,58	60,72	30,55	91,07	22,37	9,63
11:00	350,87	132,00	178,88	94,92	33,59	64,44	88,46	15,04	6,37	12,60
12:00	18,28	114,86	228,18	107,06	17,00	62,05	44,54	23,29	28,62	109,28
13:00	19,99	125,06	229,59	95,03	29,10	23,89	21,86	10,76	17,05	98,52
14:00	68,71	182,58	119,17	65,20	12,63	6,67	148,89	13,28	50,54	69,63
15:00	96,96	171,47	103,64	64,87	17,10	22,71	194,55	11,59	56,83	91,81
16:00	26,40	114,97	158,52	87,49	29,62	81,95	249,88	89,68	185,75	88,63
17:00	56,87	47,50	86,04	82,78	42,77	130,93	102,98	5,76	250,81	83,47
18:00	180,80	74,53	8,08	96,87	76,27	220,35	85,82	46,64	386,23	139,92
Время	11.09.14	12.09.14	13.09.14	14.09.14	15.09.14	16.09.14	17.09.14	18.09.14	19.09.14	20.09.14
19:00	221,97	47,09	74,38	80,83	158,94	263,43	56,99	107,81	406,77	123,49
20:00	20,44	72,36	237,85	33,26	10,53	95,34	167,21	36,26	224,37	37,40
21:00	66,86	366,81	98,71	120,96	96,57	65,51	82,72	92,26	34,12	113,20
22:00	13,72	90,05	246,87	95,07	23,33	39,74	104,88	78,41	409,52	53,74
23:00	36,49	7,68	189,14	81,62	38,66	57,73	39,83	62,88	145,89	14,13
Время	21.09.14	22.09.14	23.09.14	24.09.14	25.09.14	26.09.14	27.09.14	28.09.14	29.09.14	30.09.14
0:00	16,59	51,63	169,33	72,68	14,74	29,11	122,00	68,16	61,19	29,99
1:00	9,98	206,53	120,16	11,16	16,02	9,93	29,79	98,50	98,11	16,50
2:00	18,86	47,04	59,35	141,30	57,33	112,33	48,80	40,31	22,99	107,14
3:00	47,21	131,63	230,75	135,56	67,06	157,59	150,23	8,18	82,06	103,64
4:00	62,95	13,95	88,55	167,56	106,51	117,92	153,04	78,54	78,75	16,55
5:00	95,47	19,81	113,24	118,66	59,78	56,86	124,62	90,48	50,84	108,70
6:00	90,83	6,22	213,53	142,11	22,54	69,56	112,34	82,02	92,47	19,05
7:00	84,89	7,75	192,01	201,14	15,80	74,39	55,16	64,82	107,60	24,61
8:00	94,37	87,70	158,41	173,89	65,80	36,66	128,27	40,92	19,90	24,65
9:00	51,75	109,48	130,20	91,32	70,69	130,48	11,23	54,14	42,61	63,03
10:00	56,28	158,93	70,31	112,75	59,08	523,77	485,74	60,91	53,81	34,08
11:00	34,12	185,29	60,03	68,90	68,38	522,25	506,94	22,15	66,25	17,29
12:00	26,19	201,66	56,68	94,93	118,08	85,05	25,25	27,18	57,70	34,41
13:00	23,11	198,96	51,74	79,21	324,29	111,29	36,15	31,29	48,61	214,57
14:00	39,32	129,58	27,19	9,50	61,62	90,38	484,03	37,03	42,37	228,06
15:00	53,24	137,58	29,07	52,19	52,11	95,37	265,33	30,96	29,77	199,68
16:00	150,97	43,12	72,93	39,07	35,74	58,95	13,62	12,99	42,07	28,09
17:00	221,63	9,79	96,77	126,09	65,51	5,92	25,71	19,33	47,59	26,82
18:00	202,16	63,37	189,27	169,38	125,29	49,48	32,23	41,42	38,30	92,34
19:00	199,22	8,58	182,07	144,84	153,35	115,44	28,51	1590,59	14,81	26,83
20:00	275,42	131,55	75,33	49,24	100,01	79,42	19,28	1548,19	150,99	154,42
21:00	49,55	186,46	92,15	69,97	519,31	156,11	14,72	47,01	149,01	156,93
22:00	272,57	188,28	111,16	78,21	139,64	347,07	20,08	44,60	343,69	77,17
23:00	183,19	105,92	44,40	72,27	76,10	141,33	54,34	89,45	261,80	173,30

В качестве базовых графиков потребления электроэнергии $\{P_o(t_k)\}$ для агрегатов электросталеплавильного цеха на сентябрь 2014 года примем 3 графика электропотребления, полученные в соответствии с исходными почасовыми графиками загрузки соответствующего оборудования цеха.

На рис. 4.9-4.11 представлены почасовые графики загрузки оборудования электросталеплавильного цеха (ЭСПЦ) металлургического предприятия 1-й ценовой зоны на сентябрь 2014 года по трем различным вариантам.

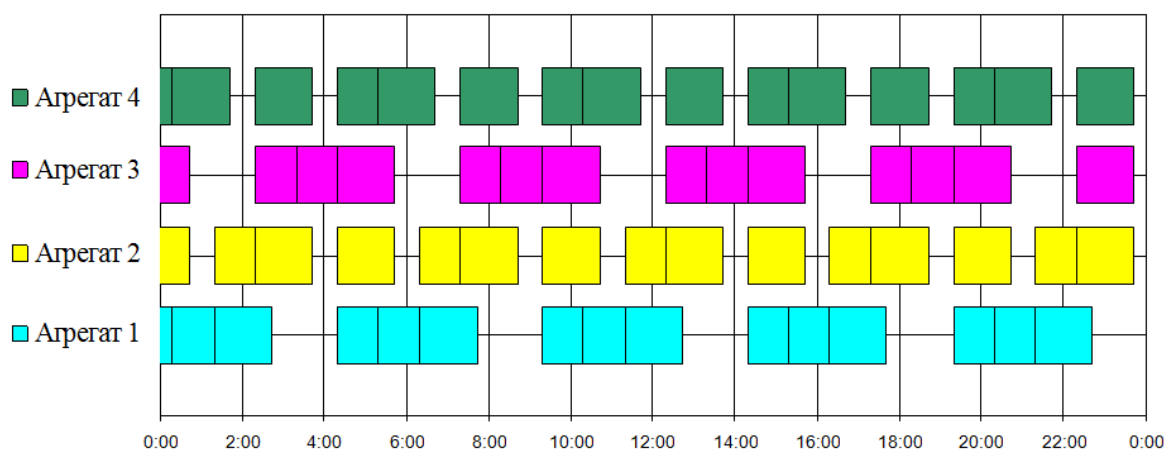


Рис.4.9. Почасовой график загрузки оборудования ЭСПЦ металлургического предприятия 1-й ценовой зоны для первого базового графика

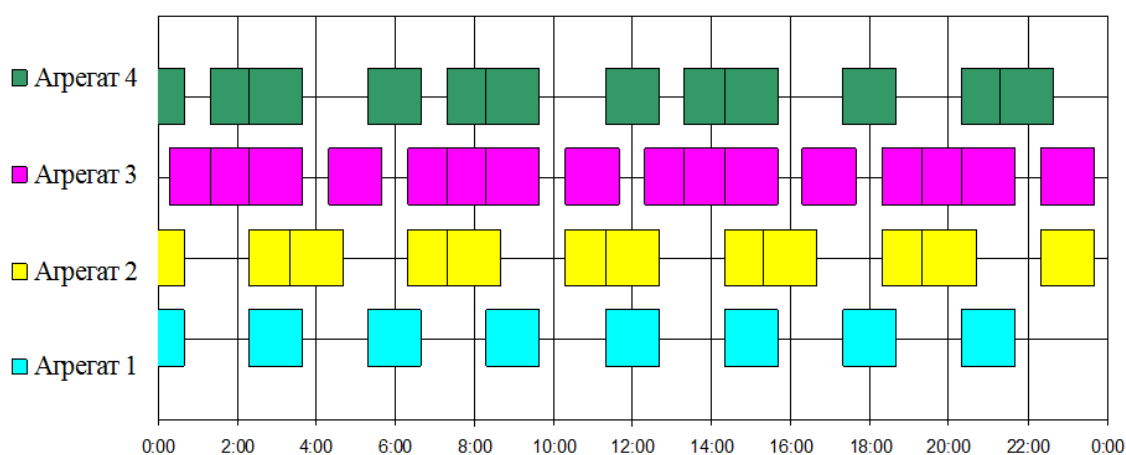


Рис.4.10. Почасовой график загрузки оборудования ЭСПЦ металлургического предприятия 1-й ценовой зоны для второго базового графика

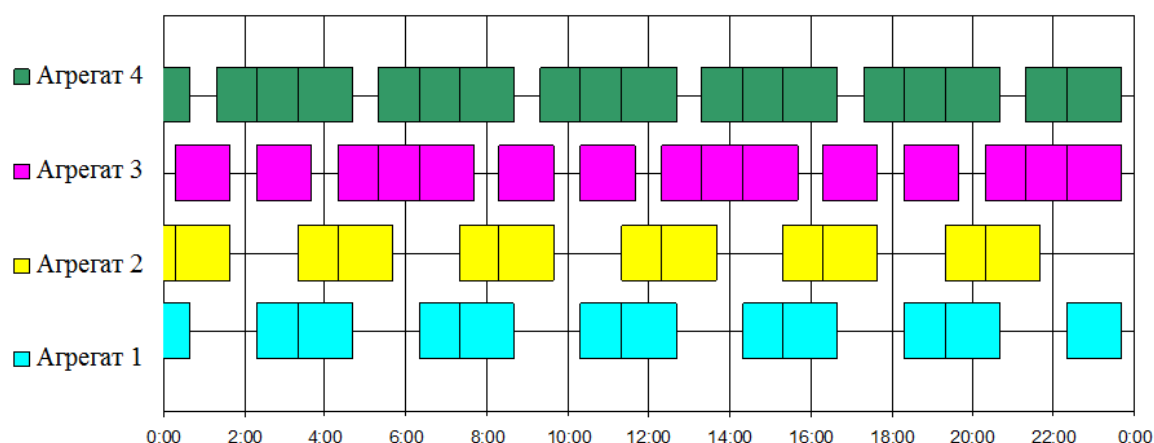


Рис.4.11. Почасовой график загрузки оборудования ЭСПЦ металлургического предприятия 1-й ценовой зоны для третьего базового графика

По соотношению (2.4) на основе данных по текущему электропотреблению и переменной части индекса равновесных цен на продажу электроэнергии на оптовом рынке, приведенной в таблице 4.40, можно рассчитать переменную часть стоимости покупки электроэнергии $\Delta C_{\varphi}(t_k)$. Далее по соотношению (2.7) можно рассчитать индекс снижения стоимости потребления электроэнергии $I_{сн}$.

В таблице 4.41 приведены численные посуточные значения индекса снижения стоимости потребления электроэнергии $I_{сн}$ и потребления электроэнергии W_{φ} для трех базовых графиков за сентябрь 2014 года.

Таблица 4.41

№ п/п	Дата	Индекс снижения стоимости потребления электроэнергии $I_{сн}$	Потребление электроэнергии W_{φ}
Базовый график 1			
1	01.09.2014	1	427,53
2	02.09.2014	1,230005	413,69
3	08.09.2014	1,10099	454,97
4	09.09.2014	0,953571	430,18
5	15.09.2014	1,01747	436,25
6	16.09.2014	1,089341	431,56
7	22.09.2014	1,169866	422,33
8	23.09.2014	1,1831297	443,62
9	29.09.2014	1,356048	491,51
10	30.09.2014	1,1686137	464,35
Базовый график 2			
1	03.09.2014	1	367,01
2	04.09.2014	1,285262	361,82
3	05.09.2014	1,225116	290,21

Окончание таблицы 4.41

4	06.09.2014	1,207616	341,06
5	07.09.2014	1,290131	347,66
6	10.09.2014	1,15672	345,29
7	11.09.2014	1,146881	326,44
8	12.09.2014	1,130504	358,66
9	13.09.2014	1,18298	373,48
10	14.09.2014	1,276945	353,64
Базовый график 3			
1	17.09.2014	1	404,48
2	18.09.2014	1,136167	382,58
3	19.09.2014	1,52311	367,52
4	20.09.2014	1,585515	359,30
5	21.09.2014	1,553175	335,08
6	24.09.2014	1,730026	349,42
7	25.09.2014	1,576223	363,09
8	26.09.2014	1,523178	359,31
9	27.09.2014	1,355737	383,80
10	28.09.2014	1,373004	387,91

После того, как получены статистические данные – численные значения индекса снижения стоимости потребления электроэнергии $I_{сн}$ и потребления электроэнергии $W_э$ за сентябрь 2014 года, можно определить нелинейную эмпирическую зависимость $F_{сн}(W_э)$ на основе того же программного обеспечения, которое используется для определения удельного потребления электроэнергии.

Зависимость $F_{сн}(W_э)$ имеет следующий вид:

$$I_{сн} = \exp(a_0 + a_1 W_э), \quad (4.6)$$

где a_0 , a_1 – коэффициенты.

Численные значения коэффициентов a_0 , a_1 зависимости (4.6) для различных базовых графиков приведены в таблице 4.42.

Таблица 4.42

№ п/п	Базовый график	Коэффициенты	
		a_0	a_1
1	1	-2,11036	0,004896
2	2	5,521678	-0,01489
3	3	4,335333	-0,01068

Согласно таблице 4.42, значение индекса снижения стоимости электропотребления $I_{сн}$ для заданных базовых графиков превышает 1.

В целях регулирования графика нагрузки потребитель может перемещать часы работы технологического оборудования в пределах суточного графика. На основе значений индексов снижения стоимости потребления электроэнергии и технологических требований к процессу для каждого базового графика был осуществлен сдвиг в расписании работ оборудования электросталеплавильного цеха. Полученные варианты почасового расписания работы оборудования представлены на рис. 4.12-4.14.

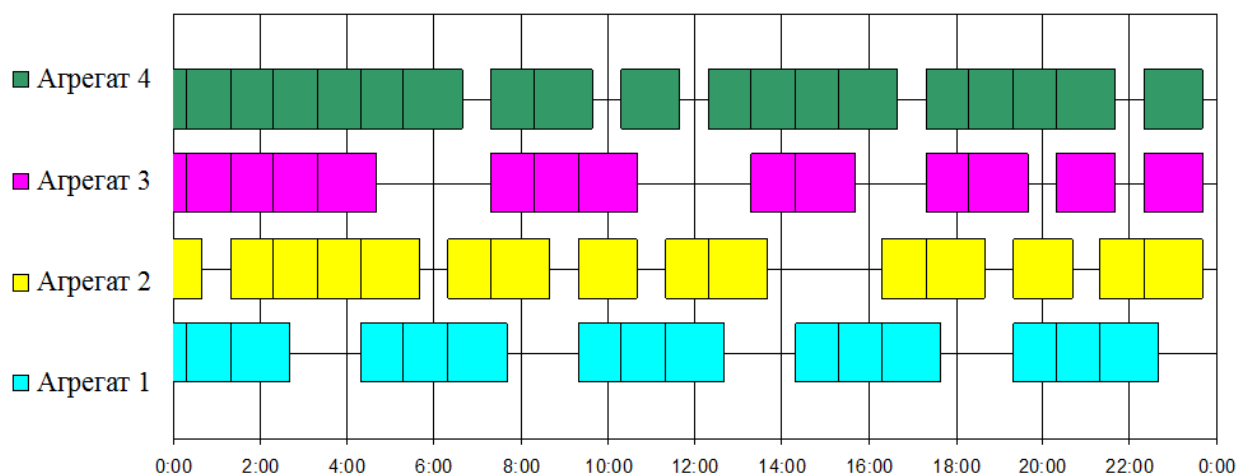


Рис.4.12. Почасовой график загрузки оборудования ЭСПЦ металлургического предприятия 1-й ценовой зоны по третьему варианту

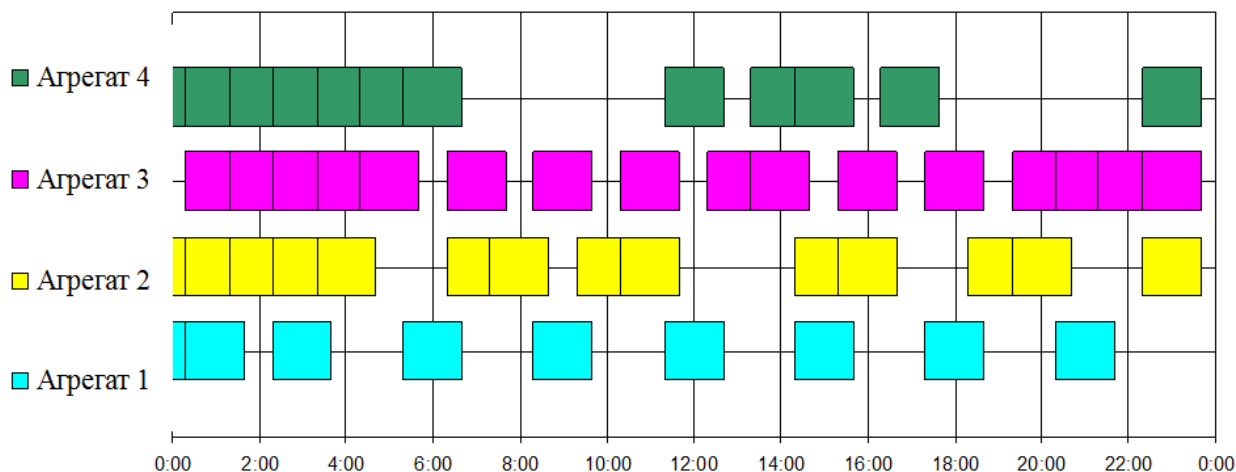


Рис. 4.13. Почасовой график загрузки оборудования ЭСПЦ металлургического предприятия 1-й ценовой зоны по второму варианту

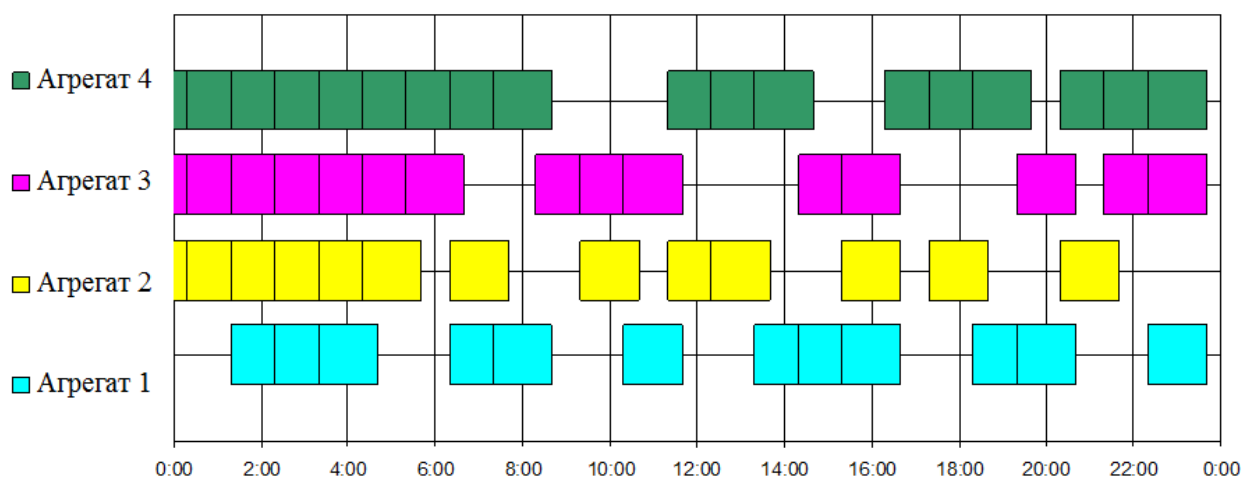


Рис.4.14. Почасовой график загрузки оборудования ЭСПЦ
металлургического предприятия 1-й ценовой зоны по третьему варианту

В таблице 4.43 приведены численные посуточные значения индекса снижения стоимости потребления электроэнергии $I_{сн}$ и потребления электроэнергии W_z за сентябрь 2014 года.

Таблица 4.43

№ п/п	Дата	Индекс снижения стоимости потребления электроэнергии $I_{сн}$	Потребление электроэнергии W_z
Базовый график 1 (со смещением)			
1	17.09.2014	1	427,53
2	18.09.2014	1,110526	413,69
3	19.09.2014	0,929852	454,97
4	20.09.2014	0,864449	430,18
5	21.09.2014	0,915259	436,25
6	24.09.2014	0,989391	431,56
7	25.09.2014	1,017887	422,33
8	26.09.2014	0,895994	443,62
9	27.09.2014	0,874955	491,51
10	28.09.2014	0,957751	464,35
Базовый график 2 (со смещением)			
1	17.09.2014	1	367,01
2	18.09.2014	0,956446	361,82
3	19.09.2014	0,99815	290,21
4	20.09.2014	1,542657	341,06
5	21.09.2014	1,211106	347,66
6	24.09.2014	1,144817	345,29
7	25.09.2014	1,191881	326,44
8	26.09.2014	1,18078	358,66
9	27.09.2014	1,007665	373,48
10	28.09.2014	0,982339	353,64
Базовый график 3 (со смещением)			
1	17.09.2014	1	404,48
2	18.09.2014	0,961633423	382,58
3	19.09.2014	0,964143529	367,52

4	20.09.2014	0,992479256	359,30
5	21.09.2014	0,9616988	335,08
6	24.09.2014	0,954484271	349,42
7	25.09.2014	0,947080795	363,09
8	26.09.2014	0,992846779	359,31
9	27.09.2014	0,988835865	383,80
10	28.09.2014	0,97486372	387,91

На рис.4.15-4.17 представлено сравнение динамики изменения индекса снижения стоимости потребления электроэнергии во времени для рассматриваемых вариантов базового графика и базового графика со смещением.

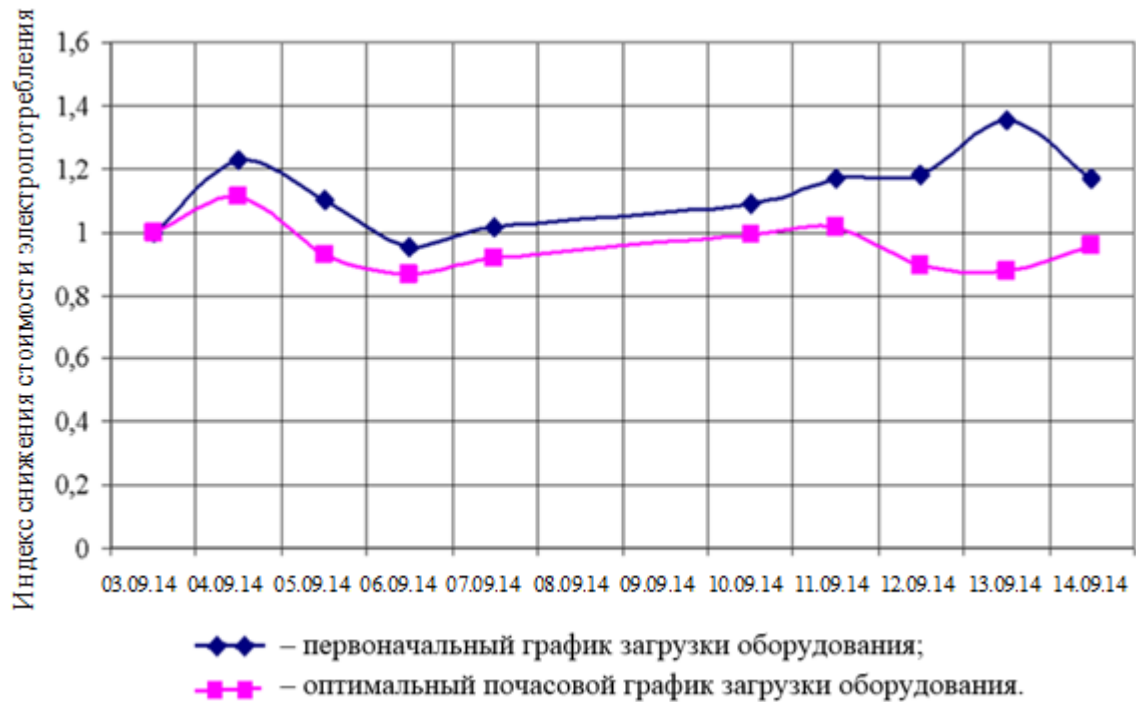


Рис. 4.15. Сравнение динамики изменения $I_{сн}$ во времени для первого базового графика и для первого базового графика со смещением

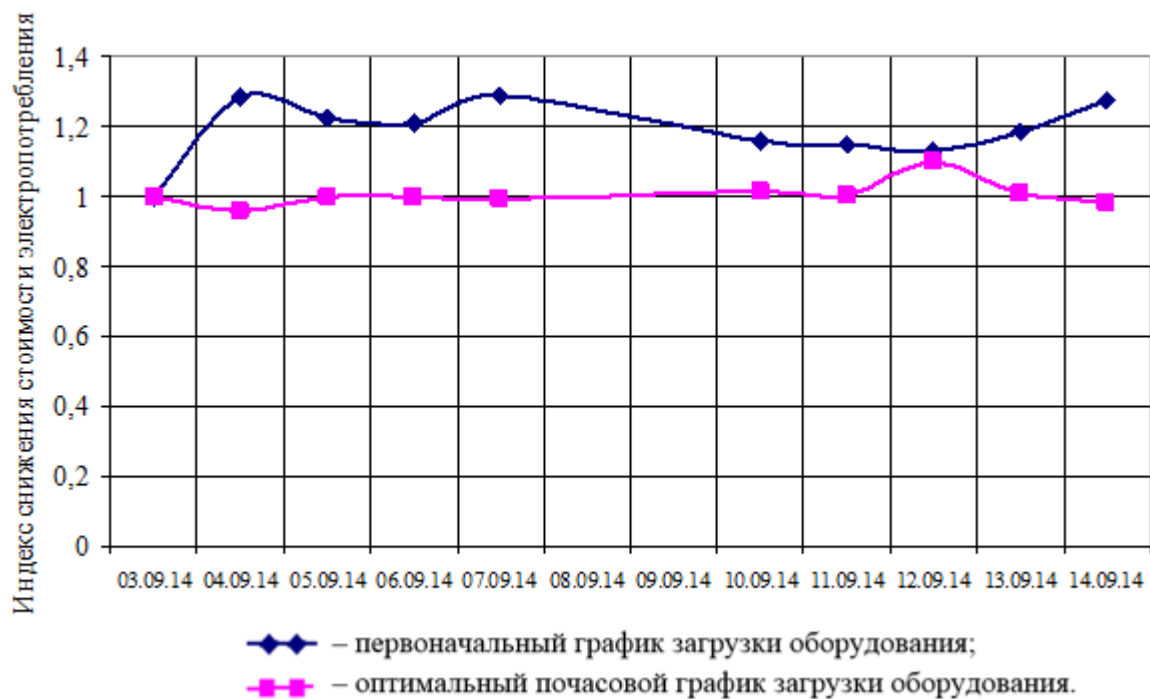


Рис. 4.16. Сравнение динамики изменения I_{cn} для второго базового графика и для второго базового графика со смещением

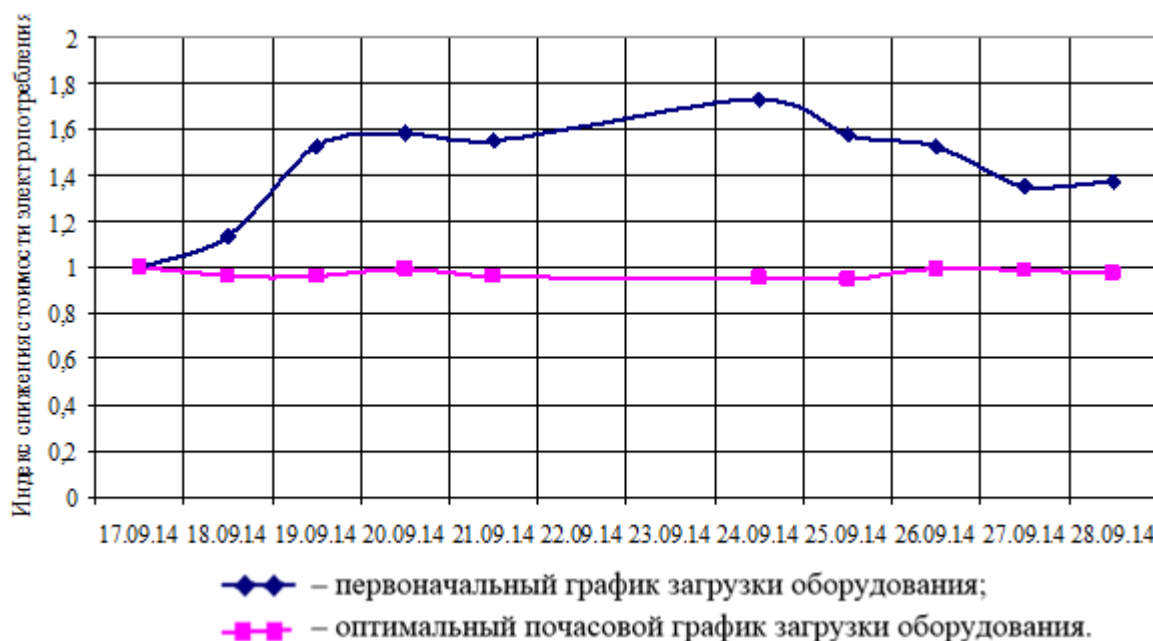


Рис.4.17. Сравнение динамики изменения I_{cn} для третьего базового графика и для третьего базового графика со смещением

Как видно из таблиц 4.41, 4.43 и рис.4.15-4.17, значение индекса снижения стоимости электропотребления I_{cn} для базовых графиков со смещением уменьшилось по сравнению с первоначальным вариантом. Таким

образом, изменение расписания работ оборудования электросталеплавильного цеха позволило повысить оптимальность графиков электропотребления.

Численные значения коэффициентов a_0 , a_1 зависимости (4.6) для различных базовых графиков приведены в таблице 4.44.

Таблица 4.44

№ п/п	Базовый график	Коэффициенты	
		a_0	a_1
1	1 (со смещением)	3,000695	-0,00717
2	2 (со смещением)	0,393743	-0,00083
3	3 (со смещением)	2,374222	-0,00594

Удельное потребление электроэнергии рассчитывается на основе полученных коэффициентов a_0 и a_1 .

4.3 Экономический эффект от применения результатов работы

В ходе работы разработаны методическое, алгоритмическое и программное обеспечение планирования и управления электропотреблением металлургического предприятия, с использованием которого на основе реальных данных по выработке продукции и электропотреблению производственными подразделениями ОАО «ММК» проведены экспериментальные исследования.

Экономический эффект от выполнения данной работы образуется за счет снижения общей ошибки прогнозирования потребления электроэнергии.

Расчет экономического эффекта от применения разработанных методов многоуровневого планирования и управления электропотреблением ОАО «ММК» приведен в таблице 4.45.

Таблица 4.45

Наименование	Ед. изм.	Базовый период 2013 год	Отчетный период 2014 год
Плановое суммарное почасовое потребление электроэнергии от ООО "МЭК"	тыс. кВтч	2385600,5	2688475,5
Фактическое суммарное почасовое потребление электроэнергии от ООО "МЭК"	тыс. кВтч	2323309,7	2643724,3
Отклонение почасового потребления	тыс. кВтч	62290,8	44751,2
Снижение отклонений потребления электроэнергии от заявки.	%		28,2
Заявленное снижение отклонений от заявки в рамках выполняемой работы	%	20	
Увеличение точности прогноза за счет выполненной работы	%		8,2
Экономия от почасового планирования в часы максимальной загрузки за 2014 год	тыс. руб.		22011,8

Экономия от почасового планирования в часы максимальной загрузки за 2014 год составила 22,011 млн. рублей. Повышение точности прогноза при почасовом планировании на уровне отдельных подразделений за 2014 год за счет применения разработанных методов многоуровневого планирования и управления электропотреблением составило 8,2%.

Выводы к разделу 4

1. Проведены экспериментальные исследования метода среднесрочного планирования на основе реальных данных по выработке продукции и электропотреблению производственными подразделениями ОАО «ММК» для следующих блоков данных:

- основные виды продукции;
- виды продукции, выпускаемые цехами металлургического производства: доменным цехом, кислородно-конвертерным цехом, электросталеплавильным цехом;
- виды продукции, выпускаемые электрическими станциями ОАО «ММК»: ТЭЦ, ЦЭС, ПВЭС.

Для подразделений ОАО «ММК» на основе предоставленной информации построены базовые модели электропотребления с учетом анализа их использования в многоуровневой методике почасового планирования.

2. Экспериментальные исследования метода среднесрочного планирования на основе реальных данных по выработке продукции и электропотреблению производственными подразделениями ОАО «ММК» показали, что использование разработанных алгоритмов приводит к снижению общей ошибки прогнозирования электропотребления. На уровне комбината в целом решение задачи минимизации общей ошибки прогноза потребления электроэнергии основано на корректировке значений фактического общего потребления электроэнергии комбинатом, определяемого по показаниям прибора учета, и расчетного суммарного расхода электроэнергии отдельных производственных подразделений ОАО «ММК». Технологический эффект внедрения на ОАО «ММК» состоит в снижении общей ошибки прогнозирования потребления электроэнергии предприятием в целом на величину не менее 0,5%.

3. Проведена апробация методики почасового планирования электропотребления на реальных данных почасового потребления электрической энергии листопрокатными цехами ОАО «ММК» (ЛПЦ-4,

ЛПЦ-5, ЛПЦ-9) и данных почасового электропотребления агрегатами электросталеплавильного цеха металлургического предприятия 1-й ценовой зоны. Результаты проведения экспериментальных исследований методики краткосрочного планирования электропотребления показали, что повышение точности прогноза при почасовом планировании на уровне отдельных подразделений за 2014 год составило 8,2%.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

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

- несогласованность агрегированных представлений динамики потребления электроэнергии на верхнем уровне и высокой степенью 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.

2. В работе в целях разрешения межуровневых противоречий при принятии решений введен агрегированный показатель динамики потребления ресурсов – индекс снижения стоимости, позволяющий согласовать детализованные представления динамики процессов потребления ресурсов на локальных уровнях отдельных технологических процессов и обобщенные представления на верхнем технико-экономическом 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 в Технологическом управлении ОАО «ММК» при решении задач нормирования и управления электропотреблением промплощадки 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%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Andersen, F.M. Forecasting hourly electricity load: identification of consumption profiles and segmentation of customers [Text] / F.M. Andersen, H.V. Larsen, T.K. Boomsma // *Energy Conversion and Management*. – 2013. – Vol 68. – P. 244-252.
2. Andersen, F.M. Long term forecasting of hourly electricity consumption in local areas (Denmark) [Text] / F.M. Andersen, H.V. Larsen, R.B. Gaardestrup // *Applied Energy*. – 2013. – № 110. – P. 147-162
3. Ashok, S. Peak-load management in steel plants [Text] / S. Ashok // *Applied Energy*. – 2006. – №83. – P. 413-424
4. Barbasova T.A. Automated system for equipment energy efficiency monitoring in heat energy facility [Text] / T.A. Barbasova, O.V. Kolesnikova, A.A. Filimonova // *Energy Procedia*. – 2015. – №83. – P. 69-78.
5. Barbasova, T.A. Energy consumption forecast procedure for an industrial facility [Text] / T.A. Barbasova, L.S. Kazarinov, A.A. Filimonova // *International Journal of Social, Behavioral, Educational, Economic, Business and Industrial Engineering*. – 2015. – Vol. 9, No.12. – P. 3864-3867.
6. Bianco, V. Electricity consumption forecasting in Italy using linear regression models [Text] / V. Bianco, O. Manca, S. Nardini // *Energy*. – 2009. – № 34. – P. 1413-1421
7. Cancelo, J. R. Forecasting the electricity load from one day to one week ahead for the Spanish system operator [Text] / J.R. Cancelo, A. Espasa, R. Grafe // *International Journal of Forecasting*. – 2008. – №24 (4). – P. 588–602.
8. De Livera, A.M. Forecasting time series with complex seasonal patterns using exponential smoothing [Text] / A.M. De Livera, R.J. Hyndman, R.D. Snyder // *Journal of the American Statistical Association*. – 2011. – Vol. 106(496). – P. 1513-1527.
9. Dordonnat, V. Dynamic factors in periodic time-varying regressions with an application to hourly electricity load modeling [Text] / V. Dordonnat, S.J.

Koopman, M. Ooms // Computational Statistics and Data Analysis. – 2012. – № 56. – P. 3134-3152.

10. Fan, S. Short-Term Load Forecasting Based on a Semi-Parametric Additive Model [Text] / S. Fan, R.J. Hyndman // IEEE Transactions on Power Systems. – 2012. – 27(1). – P. 134–141.

11. Filimonova, A.A. Dispatching control of industrial facility power consumption [Text] / A.A. Filimonova, L.S. Kazarinov, T.A. Barbasova. // Energy Procedia. – №83. – P. 111-120.

12. Filimonova, A.A. A method of effective planning and control of industrial facility energy consumption [Text] / A.A. Filimonova, L.S. Kazarinov, T.A. Barbasova // International Journal of Social, Behavioral, Educational, Economic, Business and Industrial Engineering. – 2015. – Vol. 9, No.12. – 2070-2074.

13. Gould, P.G. Forecasting time series with multiple seasonal patterns [Text] / P.G. Gould, A.B. Koehler, J.K. Ord, R.D. Snyder, R.J. Hyndman, F. Vahid-Araghi // European Journal of Operational Research. – 2008. – 191(1). – P. 207-222.

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

15. Lin, C.W. Hierarchical production planning for a modern steel manufacturing system [Text] / C.W. Lin, C.L. Moodie // International Journal of Production Research. – 1989. – Vol. 27(4). – P. 613-628.

16. Pielow, A. Modeling short-run electricity demand with long-term growth rates and consumer price elasticity in commercial and industrial sectors [Text] / A. Pielow, R. Sioshansi, M.C. Roberts // Energy. – 2012. – №46. – P. 533-540.

17. Soares, L.J. Modeling and forecasting short-term electricity load: A comparison of methods with an application to Brazilian data [Text] / L.J. Soares, M.C. Medeiros // International Journal of Forecasting. – 2008. – № 24. P. 630-644.

18. Taylor, J.W. An Evaluation of Methods for Very Short-Term Load Forecasting Using Minute-by-Minute British Data [Text] / J.W. Taylor // International Journal of Forecasting. – 2008. – Vol. 24. – P. 645-658.
19. Taylor, J.W. Short-Term Load Forecasting Methods: An Evaluation Based on European Data [Text] / J.W. Taylor, P.E. McSharry // IEEE Transactions on Power Systems. – 2008. – № 22. – P. 2213-2219.
20. Taylor, J.W. Short-Term Load Forecasting with Exponentially Weighted Methods [Text] / J.W. Taylor // IEEE Transactions on Power Systems. – 2012. – № 27(1). – P. 458-464.
21. Weron, R., Modeling and Forecasting Electricity Loads and Prices: A Statistical Approach / R. Weron. – New York: Wiley Finance, 2006. – 178 p.
22. Анчарова, Т.В. Анализ и нормирование электропотребления предприятий средней и малой мощности с многономенклатурным производством [Текст] / Т. В. Анчарова, А.П. Пищур // Вестник МЭИ. – 2003. – № 2. – С. 35-40.
23. Анчарова, Т. В. Определение значимых факторов, влияющих на электропотребление в электротехнической промышленности [Текст] / Т.В. Анчарова, З.К. Хабдуллина // Промышленная энергетика. 1993. – № 4. – С. 21-24.
24. Анчарова, Т.В. Развитие электропотребления на промышленных предприятиях в условиях неопределенности исходной информации [Текст] / Т.В. Анчарова, С.С. Бодрухина, Ю.В. Матюнина // Промышленная энергетика. –1995. – № 9. – С. 21-22.
25. Барбасова, Т.А. Автоматизированная система энергетического менеджмента промышленного предприятия [Текст] / Т.А. Барбасова, А.А. Захарова // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2014. – том 2, №3. – С. 23-27.
26. Барбасова, Т.А. Внедрение системы энергетического менеджмента на металлургических предприятиях Челябинской области в целях повышения

энергетической эффективности региона [Текст] / Т.А. Барбасова, А.А. Захарова // Экономика в промышленности. – 2012. – №3. – С. 42-46.

27. Барбасова, Т.А. Пути повышения энергетической эффективности Челябинской области [Текст] / Т.А. Барбасова, А.А. Захарова // Инновационный Вестник Регион. – 2012 – № 2. – С. 69–74.

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

29. Барбасова, Т.А. Повышение энергетической эффективности промышленных предприятий [Текст] / Т.А. Барбасова, А.А. Захарова // Материалы за 7-а международна научна практична конференция, «Бъдещето въпроси от света на науката», - 2011. – Том 30. Технологии. Здание и архитектура. София. «БялГРАД-БГ» ООД. – С. 61-63.

30. Белан, А.В. Пути и результаты совершенствования методов прогнозирования электропотребления [Текст] / А.В. Белан, В.И. Гордеев, А.В. Демура, И.И. Надтока // Промышленная энергетика. – 1993. - № 9-10. - С. 23-26.

31. Белан, А.В. Прогнозирование электропотребления на основе многофакторного регрессионного и корреляционного анализов [Текст] / А.В. Белан, В.И. Гордеев // Проблемы энергосбережения. – К.: Наукова думка, 1991. – Вып.7.

32. Боос, Г.О. Современные автоматизированные системы управления технологическим процессом [Текст] / А.А. Филимонова, Г.О. Боос // Инновации в науке. – 2014. - № 38. - с. 39-42.

33. Борисов, Б.П. Нормирование и экономия электрической энергии в электротехнологических установках. / Б.П. Борисов, Г.Я. Вагин, А.Б. Лоскутов, А.И. Гардин. – ИЭД АН УССР. Препринт-528, Киев, 1987г. – 43 с.

34. Бэнн, Д.В. Сравнительные модели прогнозирования электрической нагрузки: Пер. с англ. / Д.В. Бэнн, Е.Д. Фармер. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 200 с.
35. Бэнн, Д.В. Обзор методов краткосрочного прогнозирования в электроэнергетике. Сравнительные модели прогнозирования электрической нагрузки энергосистем / Д.В. Бэнн, Е.Д. Фармер. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 260 с.
36. Вагин, Г.Я. Основные направления экономии энергии на металлургических предприятиях [Текст] / Г.Я. Вагин, А.Б. Лоскутов, С.А. Шалаев // Промышленная энергетика. – 1995. – №9. – С. 12-15.
37. Вагин, Г.Я. К вопросу о повышении энергетической эффективности промышленных предприятий [Текст] / Г.Я. Вагин // Промышленная энергетика. – 2013. – № 5. – С. 2-6.
38. Вагин, Г.Я. Методы нормирования расходов электроэнергии на машиностроительных предприятиях [Текст] / Г.Я. Вагин, С.А. Петрицкий // Промышленная энергетика. – 2007. – № 12. – С. 1-7.
39. Вагин Г.Я. Нормирование и прогнозирование расходов электрической энергии металлургическими заводами / Г.Я. Вагин, А.Б. Лоскутов, Е.В. Редькин // Сборник докладов Всесоюз. сем. Совершенствование нормирования и регулирования энергопотребления в промышленности. – М.; МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1987. – С. 27-32.
40. Воронин, А.А. Алгоритмы поиска оптимальной структуры организационной системы [Текст] / А.А. Воронин, С.П. Мишин // Автоматика и Телемеханика. – 2002. – № 5. – С. 120-132.
41. Воронин А.А. Модель оптимального управления структурными изменениями организационной системы [Текст] / А.А. Воронин, С.П. Мишин // Автоматика и телемеханика. – 2002. – № 8. – С. 136-151.
42. Воронин А.А. Оптимальные иерархические структуры / А.А. Воронин, С.П. Мишин. – М.: ИПУ РАН, 2003. – 214 с.

43. Воронов, И. В. Использование нейронной сети для краткосрочного прогнозирования электропотребления промышленного предприятия [Текст] / И. В. Воронов, Е. А. Политов, В. М. Ефременко // Вестник КузГТУ. – 2006. - № 6. – С. 71-73.
44. Воронов, И.В. Краткосрочное прогнозирование электропотребления энергосистем с помощью искусственных нейронных сетей [Текст] / И.В. Воронов, Е.А. Политов // Электрические станции. – 2009. - № 12. - С. 15-18.
45. Гнатюк, В.И. Оценка адекватности работы динамической адаптивной модели электропотребления [Текст] / В.И. Гнатюк, С.Н. Гринкевич, Д. В. Луценко // Электрика. – 2006. – № 12. - С. 36-39.
46. Гнатюк, В.И. Прогнозирование электропотребления методами GZ-анализа [Текст] / В.И. Гнатюк, Д.В. Луценко, А.М. Линев, П.С. Ермоленко // Электрика. – 2008. – № 8. - С. 24-30.
47. Гнатюк, В.И. Прогнозирование электропотребления техноценоза классическим методом [Текст] / В.И. Гнатюк, С.Н. Гринкевич // Электрика. 2006. – № 1. - С. 30-33.
48. Гнатюк, В.И. Моделирование процесса электропотребления объектов техноценоза [Текст] / В. И. Гнатюк // Электрика. – 2004. – № 4. - С. 36-41.
49. Гнатюк В.И. Программный комплекс «Электропотребление объекта техноценологического типа» [Текст] / В.И. Гнатюк, А.Е. Северин, С.Н. Гринкевич // Электрика. – 2004. - № 6.- С. 31-34.
50. Гнатюк, В.И. Классификация объектов техноценоза по электропотреблению (Опыт применения пакета Mathcad-2001) [Текст] / В. И. Гнатюк, Д. В. Луценко // Электрика. – 2007. – № 8. – С. 37-41.
51. Гнатюк, В.И. Тонкие процедуры рангового анализа по электропотреблению [Текст] / В.И. Гнатюк // Электрика. – 2007. - № 12. – С. 13-16.
52. Головкин, Б.Н. Прогноз электропотребления промышленного предприятия в условиях нестабильной экономики [Текст] / Б.Н. Головкин,

В.Н. Пирогов, А.П. Старцев // Промышленная энергетика. – 1996. – № 2. – С. 8-12.

53. Гофман, И.В. Нормирование потребления энергии и энергобалансы промышленных предприятий / И.В. Гофман. М. – Л.: Энергия, 1966. – 319 с.

54. Гофман, И.В. Организация и планирование энергохозяйства промышленных предприятий / И.В. Гофман, Г.Л. Госпитальник. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1954. – 440 с.

55. Гросс, Дж. Краткосрочное прогнозирование нагрузки [Текст] / Дж. Гросс, Ф.Д. Гальяны // ТИИЭР. – 1987. – Т.75, №12. – С. 6-21.

56. Губко М.В. Оптимальная структура системы управления технологическими связями / М.В. Губко, С.П. Мишин // Материалы международной научной конференции «Современные сложные системы управления». – Старый Оскол: СТИ, 2002. С. 50-54.

57. Гунин, В.М. Опыт нормирования и прогнозирования электропотребления предприятия на основе математической обработки статистической отчетности [Текст] / В.М. Гунин, Л.А. Копцев, Г.В. Никифоров // Промышленная энергетика. – 2000. -№ 2. С. 2 - 5.

58. Грачева, Е.И. Определение расхода электроэнергии на основе математической модели [Текст] / Е.И. Грачева, Р.С. Саитбаталова // Промышленная энергетика. – 1999. - № 4. - С. 24-25.

59. Демура, А.В. Краткосрочное прогнозирование суточных графиков нагрузки на основе искусственных нейронных сетей [Текст] / А.В. Демура // Известия вузов. Электромеханика. –1998. – № 2/3. – С. 69-71.

60. Демура, А.В. Моделирование и прогнозирование на основе искусственных нейронных сетей [Текст] / А.В. Демура // Известия вузов. Электромеханика. – 2005. – № 5. – С. 29-32.

61. Дзевенцкий, А.Я. Метод нормирования электроэнергии на предприятиях с изменяющимися режимами потребления мощности [Текст] / А.Я. Дзевенцкий, Ф. А. Хашимов, А. З. Шукуров // Промышленная энергетика. – 1996. – № 5. – С. 4-6.

62. Ершов, М.С. Вероятностные алгоритмы оценки электрических нагрузок [Текст] / М.С. Ершов, А.В. Егоров, Д.П. Сорокотягин, И.В. Ивановский // Промышленная энергетика. – 1998. – № 2. – С. 17-21.
63. Ершов М.С. Моделирование электропотребления в системах промышленного электроснабжения [Текст] / М.С. Ершов, С.А. Головатов, Г.Я. Григорьев // Промышленная энергетика. – 1999. – № 5. – С. 22-25.
64. Жичкин, С.В. Модели электропотребления на основе нейронных сетей [Текст] / С.В. Жичкин // Электрика. – 2003. – № 2. – С. 37-39.
65. Журавлев, Ю.П. Решения проблем энергосбережения на металлургических предприятиях [Текст] / Ю.П. Журавлев, Г.В. Никифоров, Б.И. Заславец, В.К. Олейников // Главный энергетик. – 2012. – № 4. – С. 43-49.
66. Заславец, Б.И. Снижение тарифов на передачу электроэнергии за счет компенсации реактивной мощности [Текст] / Б.И. Заславец, А.В. Малафеев, Е.Б. Ягольников // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2013. – № 2 (42). – С. 75-80.
67. Захарова, А.А. Минимизация электропотребления дуговой сталеплавильной печи [Текст] / А.А. Захарова // Роль технических наук в развитии общества. – Сборник статей Международной научно- практической конференции. – Уфа: Аэтерна, 2014. – С. 22-25.
68. Казаринов, Л.С. Системные исследования и управление /когнитивный подход/: научно-методическое пособие / Л.С. Казаринов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ: Издатель Т. Лурье, 2011. – 524 с.
69. Казаринов, Л.С. Метод многоуровневого нормирования и оптимального прогноза объемов потребления электрической энергии промышленным предприятием [Текст] / Л.С. Казаринов, Т.А. Барбасова, О.В. Колесникова, А.А. Захарова // Автоматика и вычислительная техника. – 2014. – №6 . – С. 20-32.
70. Казаринов, Л.С. Метод прогнозирования электропотребления промышленного предприятия [Текст] / 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.

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

72. Казаринов, Л.С. Оптимальное прогнозирование потребления энергетических ресурсов по стоимостному критерию [Текст] / Л.С. Казаринов, Т.А. Барбасова, А.А. Захарова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2013. – том 13, №1. – С. 90-93.

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

74. Казаринов Л.С. Алгоритм оптимизации для задач проектирования при противоречивом техническом задании [Текст] / Л.С. Казаринов, А.Б. Бордецкий // В сб. Информационные и управляющие элементы и системы. Труды ЧПИ. – 1979. – № 231. – С. 27-31.

75. Казаринов, Л.С. Об определении комитета системы взвешенных неравенств [Текст] / Л.С. Казаринов, А.Б. Бордецкий // Кибернетика. – 1981. – №5. – С. 44-48.

76. Казаринов, Л.С. Оптимальное прогнозирование потребления топливных газов на металлургическом производстве [Текст] / Л.С. Казаринов, Л.А. Копцев, И.А. Япрынцева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2007. – Вып. 5. – № 7(79). С. 24-26.

77. Казаринов Л.С., Омельченко Н.В. Координация решений в многоуровневых системах проектирования. Вопросы кибернетики. Методы и модели оценки эффективности развивающихся систем. – М.: Наука, 1982.

78. Копцев, Л.А. Энергосбережение и повышение экономической эффективности предприятия путем управления загрузкой производственных агрегатов [Текст] / Л.А. Копцев // Промышленная энергетика. – 2011. – № 11. – С. 14-21.

79. Копцев, Л.А. Нормирование и прогнозирование потребления электроэнергии в зависимости от объемов производства [Текст] / Л.А. Копцев // Промышленная энергетика. – 1996. – № 3. – С. 5-7.

80. Копцев, Л.А. Моделирование потребления топлива в ОАО «ММК» [Текст] / Л.А. Копцев, И.А. Япрынцева // Промышленная энергетика. – 2004. – №5. – С. 2-6.

81. Кудрин, Б.И. Методика обеспечения почасового прогнозирования электропотребления предприятий с учетом погодных факторов [Текст] / Б.И. Кудрин, А.В. Мозгалин // Вестник МЭИ. – 2007. – № 2. – С. 105 - 108.

82. Кудрин, Б.И. Учет технологических факторов при нормировании расходов электроэнергии и прогнозировании электропотребления химических предприятий [Текст] / Б.И. Кудрин // Промышленная энергетика. – 2002. – №12. – С. 24-28.

83. Кудрин, Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий: Учебник для студентов высших учебных заведений / Б.И. Кудрин. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005. – 672 с.

84. Лисиенко, В.Г. Хрестоматия по энергосбережению. Справочное издание. В 2-х книгах / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков. – М.: «Теплоэнергетик», 2002. – 688 с.

85. Литвак, В.В. Повышение эффективности информационного обеспечения энергетических обследований [Текст] / В.В. Литвак // Промышленная энергетика. – 2006. – № 5. – С. 2-5.

86. Литвак В.В. Энергосбережение и качество электрической энергии в энергосистемах / В.В. Литвак, Г.П. Климова, Г.З. Маркман, Н.Н. Харлов. – Томск: Изд. ТПУ, 2006. – с. 168.

87. Макоклюев, Б.И. Взаимосвязь точности прогнозирования и неравномерности графиков электропотребления [Текст] / Б.И. Макоклюев, В.Ф. Еч // Электрические станции. – 2005. – № 5. – С. 64-67.

88. Макоклюев, Б.И. Влияние колебаний метеорологических факторов на электропотребление энергообъединений [Текст] / Б.И. Макоклюев, В.С. Павликов, А.И. Владимиров, Г.И. Фефелова // Энергетик. – 2003. – № 6. – С. 45-48.

89. Макоклюев, Б.И. Влияние метеорологических факторов на электропотребление [Текст] / Б.И. Макоклюев, В.С. Павликов, А.И. Владимиров, Г.И. Фефелова // Электрические станции. – 2002. – № 1. – С. 26-31.

90. Макоклюев, Б.И. Моделирование электрических нагрузок электроэнергетических систем [Текст] / Б.И. Макоклюев, В.Н. Костиков // Электричество. – 1994. – № 10. – С. 13-16.

91. Макоклюев, Б.И. Прогнозирование потребления электроэнергии в АО «Мосэнерго» [Текст] / Б.И. Макоклюев, А.И. Владимиров, Г.И. Фефелова // ТЭК. – 2001. – № 4. – С. 56-57.

92. Макоклюев, Б.И. Учет влияния метеорологических факторов при прогнозировании электропотребления энергообъединений [Текст] / Б.И. Макоклюев, В.Ф. Еч. // Энергетик. – 2004. – № 6. – С. 15-16.

93. Манусов, В.З. Сравнительный анализ двух моделей прогнозирования электрической нагрузки промышленных предприятий, построенных на основе регрессионного анализа и искусственных нейронных сетей [Текст] / В.З. Манусов, С.В. Хохлова // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2008. – № 1. – С. 147-159.

94. Манусов, В.З. Оценка и прогнозирование электропотребления в энергосистемах на основе нечеткого регрессионного анализа [Текст] /

В.З. Манусов, А.В. Могиленко, В.П. Костромин // Электрика. – 2003. – № 7. – С. 41-43.

95. Меламед, А.М. Применение принципов экспертных систем для прогнозирования электропотребления [Текст] / А. М. Меламед, О. А. Скрипко // Электричество. – 1994. – № 1. – С. 26-31.

96. Месарович, М.Д. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Д. Месарович, Д. Мако, И. Такахара. – Москва: Мир, 1973. – 344 с.

97. Мишин, С.П. Динамическая задача синтеза оптимальной иерархической структуры [Текст] / С.П. Мишин // Управление большими системами. – 2003. – Выпуск 3. М.: ИПУ РАН. – С.55-75.

98. Мишин, С.П. Оптимальное стимулирование в многоуровневых иерархических структурах [Текст] / С.П. Мишин // Автоматика и Телемеханика. – 2004. – № 5. – С. 96-119.

99. Надтока, И.И. Многофакторное моделирование электропотребления промышленного предприятия [Текст] / И.И. Надтока // Известия вузов. Электромеханика. – 1998. – № 2/3. – С. 72-74.

100. Некрасов, С.А. О подходах к решению проблемы неравномерности графика нагрузки [Текст] / С.А. Некрасов, Ю.В. Матюнина, С.А. Цырук // Промышленная энергетика. – 2015. – № 5. – С. 2-8.

101. Никифоров, Г.В. Энергосбережение и управление энергопотреблением в металлургическом производстве. / Г.В Никифоров, В.К. Олейников, Б.И. Заславец. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 480 с.

102. Никифоров, Г.В. Энергосберегающее управление электропотреблением металлургического предприятия [Текст] / Г.В. Никифоров, В.К. Олейников, Б.И. Заславец, А.Н. Шеметов // Главный энергетик. – 2014. – № 5. – С. 14-23.

103. Никифоров Г.В., Олейников В.К., Заславец Б.И., Шеметов А.Н. Управление режимами энергопотребления промышленного предприятия с использованием современных информационных технологий [Текст] / Г.В.

Никифоров, В.К. Олейников, Б.И. Заславец, А.Н. Шеметов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 2. – С. 12-21.

104. Нифонтов, И.Н. Ранговые оценки электропотребления промышленных предприятий [Текст] / И.Н. Нифонтов, М.Г. Ошурков, О.Е. Лагуткин // Электрика. 2003. – № 12. – С. 18-22.

105. Новиков, Д.А. Механизмы функционирования многоуровневых организационных систем / Д.А. Новиков. – М.: Фонд «Проблемы управления», 1999. – 161 с.

106. Новиков, Д.А. Типология задач управления организационными структурами / Д.А. Новиков // Материалы международной научной конференции «Современные сложные системы управления». – Старый Оскол: СТИ, 27-29 ноября 2002. – С. 110-115.

107. Новиков, С.С. Оперативное прогнозирование электропотребления металлургического предприятия как средство снижения рыночных рисков [Текст] / С.С. Новиков // Вестник МЭИ. – 2008. – № 1. – С. 91-97.

108. Олейников, В.К. Нормирование энергозатрат при многономенклатурном производстве [Текст] / В.К. Олейников, Г.В. Никифоров // Промышленная энергетика. – 2000. – № 6. – С. 30-32.

109. Поляхов, Н.Д. Оценка эффективности интеллектуальных и классических моделей краткосрочного прогнозирования электропотребления [Текст] / Н.Д. Поляхов, И.А. Приходько, Е.С. Анушина, В. Ефэн // Естественные и технические науки. – 2011. – №3. – С. 304-309.

110. Поляхов, Н.Д. Повышение точности прогнозирования на основе метода опорных векторов [Текст] / Н.Д. Поляхов, И.А. Приходько, В. Ефэн, Д.В. Ли. // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Сер. «Автоматизация и управление». – 2012. – № 7. – С. 64-68.

111. Праховник А.В., Находов В.Ф. Проблеми, методи і засоби управління використанням електричної енергії [Текст] / А.В. Праховник, В.Ф. Находов // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 1997. – С. 41-48.

112. Праховник А.В. Энергосберегающие режимы энергоснабжения горнодобывающих предприятий / А.В. Праховник, В.П. Розен, В.В. Дегтярев. – М.: Недра, 1985. – 230 с.

113. Родина, Л.С. Моделирование режимов электропотребления предприятий транспорта нефти [Текст] / Л.С. Родина, Н.В. Токочакова, Ю.Н. Колесник // Вестник МЭИ. – 2002. – № 3.1. С. 71-74.

114. Родина, Л.С. Моделирование электропотребления участков нефтепровода с учетом состава насосных агрегатов [Текст] / Л. С. Родина, Н.В. Токочакова, Ю.Н. Колесник, С.И. Половинко // Вестник МЭИ. – 2005. – № 2. – С. 61-65.

115. Родина, Л.С. Структурные закономерности суточного электропотребления энергосистемы [Текст] / Л.С. Родина, Н.В. Токочакова, В.Н. Токочаков // Промышленная энергетика. –1996. – № 11. – С. 26-28.

116. Саитбаталова, Р.С. Некоторые вопросы проектирования электроснабжения производств с непрерывным технологическим процессом [Текст] / Р.С. Саитбаталова, С.Р. Ильдиряков // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2016. – № 4 (70). – С. 14-16

117. Саитбаталова, Р.С. Некоторые вопросы составления и анализа электробаланса на промышленных предприятиях [Текст] / Р.С. Саитбаталова, Р.У. Галеева // Промышленная энергетика. – 1996. – № 5. – С. 2-3.

118. Саитбаталова, Р.С. Оперативное прогнозирование режима электропотребления [Текст] / Р.С. Саитбаталова, Е.И. Грачева, В.А. Хатанов // Промышленная энергетика. – 2000. – № 6. – С. 27-29.

119. Саитбаталова, Р.С. Статистическая оценка фактического удельного расхода электроэнергии на выпуск продукции [Текст] / Р.С. Саитбаталова, Р.У. Галеева, Филиппов Н. А. // Промышленная энергетика. – 2002. – № 12. – С. 29-30.

120. Славгородский, В.Б. Влияние сезонного изменения температуры на электропотребление Магнитогорского металлургического комбината [Текст] /

В.Б. Славгородский, В.П. Прудаев, Ю.П. Коваленко // Промышленная энергетика. – 1998. – № 12. – С. 12-17.

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

122. Стоянов, С.Д. Участие быстроменяющихся электрических нагрузок в графиках нагрузок промышленных предприятий [Текст] / С.Д. Стоянов, Х.С. Богданов // Промышленная энергетика. – 1994. – № 3. – С. 42-46.

123. Суднова, В.В. Повышение качества планирования электропотребления на основе статистического анализа [Текст] / В.В. Суднова, А.Е. Якимов // Электричество. – 1992. – № 5.1. – С. 12-16.

124. Сушков, В.В. Оптимизация электропотребления нефтедобывающих предприятий [Текст] / В.В. Сушков, А.Д. Гельд // Промышленная энергетика. – 1998. – № 8. – С. 12-14.

125. Тихонов, Э.Е. Методы прогнозирования в условиях рынка: Учебное пособие / Э.Е. Тихонов. – Невинномысск, 2006. – 211 с.

126. Усихин, В.Н. О нормировании и планировании электропотребления на промышленных предприятиях [Текст] / В.Н. Усихин // Промышленная энергетика. – 1997. – № 4. – С. 30-37.

127. Федотов, А.И. Нормирование электропотребления на основе математического моделирования [Текст] / А.И. Федоров, Г.В. Вагапов // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2008. – № 9-10. – С. 130-133.

128. Филимонова, А.А. Многоуровневое планирование и управление электропотреблением металлургического предприятия [Текст] / 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.

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

130. Филиппов, С.Г. Ценологический подход к нормированию и прогнозированию электропотребления [Текст] / С.Г. Филиппов // Электрика. – 2004. – № 7. – С. 18-21.

131. Фокин, Ю.А. Вероятностно-статистические методы в расчетах систем электроснабжения / Ю.А. Фокин. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 240 с.

132. Фокин, Ю.А. Формальные приемы выбора метода прогнозирования режимов электропотребления объектов ЭЭС [Текст] / Ю.А. Фокин, С.В. Минаков // Вестник МЭИ. – 2001. – № 1. – С. 9-15.

133. Фокин, Ю.А. Экспериментальное исследование вероятностно-статистических характеристик нагрузок в электро-снабжающей системе [Текст] / Ю.А. Фокин, И.С. Пономаренко, В.С. Павликов // Электричество. – 1983. – № 9. – С. 9-15.

134. Федорова, М.Ю. Гибкие энергоэффективные компенсированные системы электроснабжения удаленных потребителей электрической энергии нефтегазодобывающего комплекса [Текст] / М.Ю. Федорова, Ю.И. Хохлов // Наука ЮУрГУ Материалы 63-й научной конференции. Сер. «Секции технических наук». – 2011. – С. 253-257.

135. Федорова, М.Ю. Повышение энергоэффективности и разработка дизайна систем электроснабжения удаленных буровых установок нефтегазодобывающего комплекса [Текст] / М.Ю. Федорова, Ю.И. Хохлов, А.В. Хлопова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2012. – № 16 (275). – С. 42-46.

136. Хохлов Ю.И. Энергосберегающая энергетическая электроника в системах электроснабжения: учебное пособие / Ю.И. Хохлов. – М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное агентство по

образованию, Южно-Уральский гос. ун-т, Каф. "Системы электроснабжения". Челябинск, 2006. – 249 с.

137. Хорьков, С.А. Методики составления баланса и расчета рангового распределения норм электропотребления многономенклатурного производства [Текст] / С.А. Хорьков // Промышленная энергетика. – 2007. – №10. – С. 23-27.

138. Цвиркун, А.Д. Основы синтеза структуры сложных систем / А.Д. Цвиркун. – М.: Наука, 1982. – 200 с.

139. Цвиркун, А.Д. Структура сложных систем / А.Д. Цвиркун. – М.: Радио и связь, 1975. – 200 с.

140. Цвиркун А.Д. Структура многоуровневых и крупномасштабных систем / А.Д. Цвиркун, В.К. Акинфиев. – М.: Наука, 1993. – 157 с.

141. Четыркин, Е.М. Статистические методы прогнозирования / Е.М. Четыркин. – М.: Финансы и статистика, 1979. – 199 с.

142. Шеметов, А.Н. Адаптивное управление режимами электропотребления промышленного объекта по комплексному критерию [Текст] / А.Н. Шеметов, В.К. Олейников // Главный энергетик. – 2014. – № 4. – С. 30-37.

143. Шумилова, Г.П. Краткосрочное прогнозирование электрических нагрузок с использованием искусственных нейронных сетей [Текст] / Г.П. Шумилова, Н.Э. Готман, Т.Б. Старцева // Электричество. – 1999. – № 10. – С. 6-12.

144. Шумилова, Г.П. Модель суточного прогнозирования нагрузок ЭЭС с использованием нечетких нейронных сетей [Текст] / Г.П. Шумилова, Н.Э. Готман, Т.Б. Старцева // Известия Академии наук. Энергетика. – 2001. – № 4. – С. 52-59.

145. Южанников, А.Ю. Ценологическое моделирование электропотребления предприятий АПК [Текст] / А.Ю. Южанников, Н.В. Цугленок // Вестник ЮУрГУ. Энергетика. – 2009. – № 34 (167). – С. 52-59.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Акт внедрения результатов диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ

Главный энергетик

ОАО «Магнитогорский металлургический

комбинат»



Ю.П. Журавлев

2016 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы
аспиранта кафедры автоматики и управления ФГБОУ ВПО ЮУрГУ (НИУ)
Филимоновой Александры Александровны:

«Методы многоуровневого планирования и управления электропотреблением металлургического предприятия»

представленной на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комиссия в составе представителей ОАО «ММК»: председателя – начальника Центра энергосберегающих технологий (ЦЭСТ) Целиканова Д.Ф., представителей ФГБОУ ВПО ЮУрГУ(НИУ) – профессора кафедры автоматики и управления, д.т.н. Казаринова Л.С., профессора кафедры автоматики и управления, д.т.н. Шнайдера Д.А., созданная распоряжением главного энергетика ОАО «ММК», к.т.н. Журавлева Ю.П., рассмотрела результаты диссертационной работы Филимоновой А.А. на тему: «Методы многоуровневого планирования и управления электропотреблением металлургического предприятия».

Комиссия отмечает, что основные результаты диссертационной работы были получены Филимоновой А.А. в рамках выполнения НИР по договору между ОАО «ММК» и ФГБОУ ВПО ЮУрГУ (НИУ) в качестве ведущего исполнителя НИР: «Разработка алгоритма «Нормирование удельного расхода и прогнозирование расхода электроэнергии ОАО «ММК», 2013 г.

Комиссия утвердила следующие выводы и результаты работы:

1. В рамках выполнения НИР разработано методическое, алгоритмическое и программное обеспечение многоуровневого нормирования и прогнозирования электропотребления ОАО «ММК», предназначенное для построения оптимальных сбалансированных оценок электропотребления по уровням производственных участков и комбинатом в целом. На уровне производственных подразделений прогноз объемов потребления электроэнергии осуществляется на основе полученных эмпирических зависимостей. На уровне комбината в целом решение задачи минимизации общей ошибки прогноза потребления электроэнергии основано на корректировке значений фактического общего потребления электроэнергии комбинатом, определяемого по показаниям прибора учета, и расчетного суммарного расхода электроэнергии отдельных производственных подразделений ОАО «ММК». Методические материалы и программное обеспечение

передано в лабораторию анализа и управления энергоресурсами ЦЭСТ и в отдел нормирования энергоресурсов ТУ.

2. Опытные расчеты на основе реальных данных по выработке продукции и электропотреблению производственными подразделениями ОАО «ММК» показали, что при использовании разработанных алгоритмов возможно снижение общей ошибки прогнозирования потребления электроэнергии на величину не менее 0,5%.

3. Разработано методическое обеспечение почасового планирования электропотребления, предназначенное для построения оптимальных графиков загрузки оборудования. Опытные расчеты на основе реальных данных по выработке продукции и электропотреблению производственными подразделениями ОАО «ММК» показали, что повышение точности прогноза при почасовом планировании за 2014 год составляет 8,2%.

Начальник ЦЭСТ ОАО «ММК»



Д.Ф. Целиканов

Менеджер технологического управления



И.К. Кучерова

Профессор кафедры автоматики
и управления ЮУрГУ, д.т.н.



Л.С. Казаринов

Профессор кафедры автоматики
и управления ЮУрГУ, д.т.н.



Д.А. Шнайдер