

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

На правах рукописи

Барбасова

Барбасова Татьяна Александровна

**Методы и модели автоматизированного ресурсосберегающего управления
энергометаллургическим технологическим комплексом**

Специальность 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (промышленность)»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

доктора технических наук

Научный консультант –

доктор технических наук, профессор

Казаринов Лев Сергеевич

Челябинск – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ЭФФЕКТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ В ЭНЕРГОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ	15
1.1. Актуальные проблемы и задачи управления ресурсами в энергометаллургических технологических комплексах	15
1.2. Обзор литературы.....	21
1.3. Постановка цели и задач исследования	40
ГЛАВА 2. МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ИНТЕГРИРОВАННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ В ЭНЕРГОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ	44
2.1. Постановка задачи интегрированного планирования и управления ресурсами	44
2.2. Задачи управления энергетической эффективностью энергометаллургических технологических комплексов с использованием концепции энергосберегающей станции	45
2.3. Системный анализ задач управления энергетической эффективностью энергометаллургических технологических комплексов с использованием концепции энергосберегающей станции	54
2.4 Системный анализ потоков энергетических ресурсов	57
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 2	71
ГЛАВА 3. АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ СТАНЦИИ В СИСТЕМЕ ИНТЕГРИРОВАННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ.....	73

3.1 Функциональные задачи ресурсосберегающей станции в системе интегрированного планирования и управления ресурсами.....	73
3.2. Оптимальное регулирование режимов ресурсосберегающей станции при утилизации доменного газа с нестабильными характеристиками и нестабильной нагрузкой.....	74
3.2.1. Задача снижения потребления природного газа на ресурсосберегающей станции за счет утилизации вторичных энергетических ресурсов.....	74
3.2.2. Задача снижения нагрузки котлов за счет рационального распределения нагрузок энергетических агрегатов энергетической станции	86
3.2.3. Задача оптимизации распределения потребления природного и доменного газа котлоагрегатами.....	89
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 3	99
ГЛАВА 4. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПАРОВОЙ СЕТИ ПРИ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ НЕСТАБИЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПАРА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА	101
4.1 Постановка задачи управления режимами паровых сетей	101
4.2 Общая схема оперативного управления потоками в сетях.....	105
4.3 Построение обратных моделей динамики сетей для парирования возмущений в сетях.....	108
4.4 Построение обратных моделей динамики на основе экспоненциальной фильтрации	110
4.5. Расчет парового аккумулятора	114
4.6. Выбор оптимального варианта функционирования систем паро- и теплоснабжения.....	120
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 4	127

ГЛАВА 5. АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ АНАЛИЗА ДАННЫХ.....	129
5.1 Общая структура системы интегрированной системы управления ресурсами на промышленной площадке ПАО «ММК»	129
5.2. Анализ характеристик доменных процессов с использованием нейронных сетей Кохонена	136
5.3. Метод принятия решений по управлению технологическими процессами на основе выделения целевых областей значений режимных параметров.....	157
5.4. Эффективное управление доменным процессом на основе методов модельно-упреждающего управления	163
5.4.1. Общая схема управления тепловым состоянием доменной печи	163
5.4.2. Примеры реализации модельно-упреждающего управления тепловым состоянием доменной печи	187
5.5. Анализ данных по эффективности доменных процессов при использовании в режиме советчика АСУ «ПолиТЭР»	193
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 5	208
ГЛАВА 6. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПЛАНИРОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ ЭНЕРГОЁМКОСТИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА	210
6.1. Автоматизированная система планирования и контроля энергоёмкости производственных процессов на основе комплексного анализа данных энергетических обследований и данных эксплуатации	210
6.2. Результаты прогнозирования электропотребления станций ПАО «ММК»	213
6.3. Заключительная диаграмма потоков сэкономленных ресурсов.....	230

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 6	233
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ	235
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	238
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Акты внедрения результатов диссертационной работы .	256
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Исходные данные для проведения расчетов энергоёмкости.....	271

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

Государственная политика энергосбережения во всех сферах хозяйства России утверждена Федеральным Законом от 23 ноября 2009 г. N 261-ФЗ "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации". В техническом плане в Законе особое внимание уделяется проведению энергосберегающих мероприятий в энергоемких отраслях промышленности, к которым относится и металлургическая отрасль.

В Российской Федерации в настоящее время на крупных металлургических предприятиях, таких как ПАО «ММК», созданы автоматизированные системы энергетического менеджмента. Характерной особенностью российских металлургических предприятий является наличие мощной электроэнергетической подсистемы. Электроэнергетическая подсистема и металлургическое производство образуют единый энергометаллургический технологический комплекс, взаимодействие компонент которого существенно определяет энергетическую эффективность всего металлургического предприятия в целом. Здесь наряду с локальными технологическими проблемами в областях промышленной энергетики и металлургии существуют проблемы интегрированного планирования и управления энергетическими ресурсами в энергометаллургическом технологическом комплексе.

В области электроэнергетики проблема интегрированного планирования и управления энергоресурсами в комплексе «электроэнергетическая система – инфраструктура потребителей» возникла первоначально для систем электроснабжения крупных городов. Одной из передовых разработок в этой области следует указать опыт энергетической комиссии г. Сакраменто штата Калифорния (США) по интегрированному планированию и управлению энергетическими ресурсами (ИПЭР) города в комплексе с электростанцией. Здесь для повышения энергетической эффективности энергетического комплекса наряду с генерирующими мощностями была создана параллельная

инфраструктура, так называемая *«энергосберегающая станция»*, под которой понимается комплекс энергосберегающих мер по автоматизации контроля и управления энергетической эффективностью города на стороне потребителей. Концепция *«энергосберегающей станции»*, на основе рассмотрения условных *«потоков сбереженных энергетических ресурсов – негаватт энергии»* была предложена американским исследователем Эмори Ловинсом. Аналогичный подход рассматривался на базе города Ганновера в работах Wüppertal Öko-Institut'а ФРГ и других городов. В России идеи интегрированного планирования и управления энергетическими ресурсами развиваются в работах И.А. Башмакова.

Применительно к энергетической подсистеме металлургического производства проблема интегрированного планирования и управления энергоресурсами по аналогии с системами электроснабжения крупных городов в литературе в целом не рассматривалась. Внимание в основном было обращено на решение отдельных безусловно важных, но все-таки относительно частных задач энергосбережения. При таком подходе может быть потерян системный эффект энергосбережения, когда положительный эффект решения отдельных задач нивелируется низкой энергетической эффективностью других подсистем металлургического комплекса. По этой причине системный эффект энергосбережения в целом может быть снижен.

В настоящее время решению задач энергосбережения в металлургическом производстве посвящена обширная литература. В этой связи необходимо обратить на значительные успехи в решении данной проблемы в ПАО «ММК», который является одним из наиболее крупных металлургических предприятий в Российской Федерации. В ПАО «ММК» разработана и внедрена уникальная Платформа энергоменеджмента предприятия, которая заняла 1 место на конкурсе проектов в области энергосбережения и повышения эффективности Министерства энергетики РФ; была отмечена в 2018 году премией Energy Management Leadership Awards (Clean Energy Ministerial, Париж), а в 2019 г.

организацией UNIDO награждена дипломом за вклад в устойчивое развитие и экологические инициативы.

Результаты по энергосбережению ПАО «ММК» освещены в работах сотрудников предприятия. Здесь необходимо отметить публикации по энергетической подсистеме: Журавлева Ю.П., Кинаша А.В., Копцева Л.А., Никифорова Г.В., Япрынцева И.А. и др.; по металлургической подсистеме: Денисова С.В., Павлова А.В., Полинова А.А., Прохорова И.Е., Казакова А.С., Целиканова Д.Ф. и др.

Следует отметить работы ученых ФГБОУ ВО «МГТУ», г. Магнитогорск Агапитова Е.Б., Андреева С.М., Карандаева А.С., Логуновой О.С., Парсункина Б.Н. и др.

Большой вклад в решение проблем энергосбережения внесли следующие ученые: Данилов Н.И., Лавров В.В., Ладыгичев М.Г., Лисиенко В.Г., Спирин Н.А., Щелоков Я.М., (ФГБОУ ВО «УрФУ», г. Екатеринбург); Казаринов Л.С., Колесникова О.В., Шнайдер Д.А., (ФГБОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»); Паршаков В.М. (ООО «АККОМ», г. Москва) и др.

Необходимо отметить работы зарубежных ученых по рассматриваемой тематике: Chengkang Gao, Wen'gang Gao, R.Q. Wang, L. Jiang, Y.D. Wang, A.P. Roskilly, E. Gregory McPherson, Sanjib Kumar Panda, S. Ashok, B.W. Bequette, Matsuda K. и др.

Большой вклад в развитие автоматизированных систем управления технологическими процессами в металлургии внесли предприятия SMS Group, Siemens, Paul Würth, Primetals, ООО НПП «Политех-Автоматика» и др.

При разработках по рассматриваемой тематике были также использованы результаты исследований, приведенные в работах Арутюняна А.А., Затонского А.В., Карапетяна Э.Г., Мирзоева Р.Г., Плетнева Г.П., Тягунова Л.И., Циркина А.М., и др.

По проблеме интегрированного планирования ресурсов металлургического предприятия необходимо отметить работы кафедры Промышленных теплоэнергетических систем МЭИ (НИУ «МЭИ», г. Москва),

где была предложена концепция оптимального управления ресурсами и стратегического планирования производства металлургического предприятия. Исходя из данной концепции, была разработана программа ENERMK (энергетика металлургического комбината). На основе данной программы в настоящее время И.А. Султангузиным для металлургических предприятий развивается программно-информационная система «ОптиМет».

В области оптимизации теплотехнических процессов следует отметить работы Лившица М.Ю., Рапопорта Э.Я., Плешивцевой Ю.Э. (ФГБОУ ВО «СамГТУ», г. Самара).

Несмотря на достигнутые успехи, проблема интегрированного планирования и управления энергетическими ресурсами в энергометаллургическом технологическом комплексе в настоящее время решена недостаточно. Дело в том, что эффективность энергометаллургического комплекса в целом определяется не только эффективностью функционирования отдельных металлургических и энергетических подсистем металлургического предприятия, но и системной их увязкой в единый технологический комплекс. С точки зрения энергосбережения, составляющие технологического комплекса также связаны между собой в единую большую систему. Анализ и управление указанной большой системой представляет собой сложную проблему.

Предлагаемая диссертационная работа посвящена решению данной проблемы, что и определяет ее актуальность.

Целью работы является повышение энергетической эффективности энергометаллургических технологических комплексов путем снижения потребления покупных ресурсов – природного газа и коксующихся углей на основе внедрения систем интегрированного планирования и автоматизированного управления процессами энергосбережения.

Для достижения указанной цели в работе решаются следующие комплексные задачи.

1. Провести системный анализ целей и задач энергосбережения в энергометаллургическом технологическом комплексе с использованием концепции потоков сэкономленных ресурсов.

2. В рамках предложенной структуры целей и задач разработать следующие автоматизированные системы поддержки интегрированного планирования и управления процессами энергосбережения:

2.1. Автоматизированная система оптимизации эффективности потребления вторичных энергетических ресурсов металлургического производства на тепловых электростанциях технологического комплекса.

2.2. Автоматизированная система управления режимами паровых аккумуляторов технологической паровой сети по критерию максимальной утилизации вторичных паровых ресурсов в сети.

2.3. Интеллектуальная система принятия решений по управлению режимами доменных процессов по критерию стабилизации режимных параметров в эффективных областях их значений при нестабильности параметров исходных материалов.

2.4. Интеллектуальная система планирования и управления показателями энергетической эффективности подразделений энергометаллургического комплекса предприятия.

3. Внедрить разработанные автоматизированные системы управления технологическими процессами в рамках интегрированного планирования и управления процессами энергосбережения на промышленной площадке ПАО «ММК».

Объект исследования: технологические процессы в составе энергометаллургического комплекса предприятия, рассматриваемые с точки зрения повышения эффективности потребления энергетических ресурсов.

Предметом исследования являются АСУ потреблением энергетических ресурсов в том числе топливных газов и коксующих углей, а также

автоматизированные системы контроля энергетической эффективности технологических процессов энергометаллургического комплекса предприятия.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались: методы теории автоматического управления, модельно-прогнозирующего управления, многоуровневых иерархических систем управления, математического моделирования, математической статистики.

Научная новизна диссертационной работы

1. Проведен системный анализ целей и задач интегрированного планирования и управления процессами энергосбережения в энергометаллургических технологических комплексах с использованием концепции потоков сбереженных ресурсов.

2. Предложен новый подход к повышению энергетической эффективности энергометаллургического технологического комплекса на основе сведения всех его локальных эффектов энергосбережения в ресурсосберегающую станцию, минимизации потребления природного газа на станции за счет повышения текущего КПД, повышения эффективности потребления вторичных энергетических ресурсов, а также оптимизации нагрузки теплоэнергетических агрегатов.

3. Разработаны новые процедуры и алгоритмы, реализующие оптимизацию эффективности ресурсосберегающей станции в рамках автоматизированной системы управления режимами станции.

4. Разработаны новые сигнально-ориентированные модели паро- и теплоэнергетических процессов, представляющие системные балансовые связи с использованием моделей динамики путей передачи входных управляющих потоков к входным узлам потоковых возмущений в сети, позволяющие осуществлять оперативное макро моделирование динамики сложных паро- и теплоэнергетических систем в задачах управления.

5. Предложено для доменного производства новое методическое, алгоритмическое и программное обеспечение экспертной системы, реализующей поддержку принятия решений по управлению доменным процессом на основе выделения целевых областей значений режимных параметров, предложены стратегии управления, позволяющие повысить эффективность доменного процесса: производительность и снизить потребление кокса в рамках технологического регламента.

6. Предложено для осуществления контроля энергоемкости технологических процессов металлургического комплекса использовать новое математическое, алгоритмическое и программное обеспечение для оценки и нормирования энергоемкости технологических процессов на основе интеллектуального анализа данных текущей эксплуатации и технологических испытаний.

Практическая ценность. Разработанное методическое, алгоритмическое и программное обеспечение для конкретных металлургических производств может быть использовано при построении АСУ ТП энергометаллургических технологических комплексов, с целью реализации интегрированного планирования и управления процессами энергосбережения по критерию снижения энергетических издержек.

Разработанный подход к интегрированному планированию и управлению энергоемкостью технологических процессов металлургического комплекса внедрен в практику управления эффективностью технологических процессов ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

Технический эффект, полученный на экономии природного газа составляет 0,5 м³/ час, что при цене природного газа 3,9 тыс. руб. за 1 куб м газа составляет 17 млн. руб. в год согласно приведенным актам внедрения. Технический эффект, полученный за счет экономии удельного расхода кокса на 0.4 кг/т, оценивается до 19 млн. руб. в год.

Проведен расчет оптимального диапазона значений показателя холодной прочности кокса по показателю M10 по критерию минимума себестоимости

стали, который составил 7,7-7,8%. В соответствии с актом внедрения, приведенным в приложении к диссертации, оценка экономического эффекта за счет снижения себестоимости стали на предприятии за период 10 месяцев 2019 года потенциально составляет до 196 млн. рублей.

Апробация работы. Основные научные положения и результаты диссертационной работы докладывались на 14 научно-технических конференциях, в том числе 12 Международных и 2 Всероссийских конференциях:

Conference on Information Technologies in Business and Industry 2018, ITBI 2018 Tomsk Polytechnic University Tomsk; Russian Federation (г. Томск, 2018);

International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017 (г. Челябинск, 2017);

8 International Conference on Sustainability in Energy and Buildings, SEB 2016; Turin (г. Турин, Италия, 2016);

Intelligent Systems Conference 2017, 2017, London, UK (Лондон, Великобритания);

VI International Conference for young scientists High Technology: Research and Applications 2016 (HTRA 2016) (г. Томск, 2016);

2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016, (г. Челябинск, 2016);

V International Conference for young scientists High Technology: Research and Applications 2016 (HTRA 2016) (г. Томск, 2016);

VIII Международный конгресс доменщиков «Металлургия чугуна – вызовы XXI века» (г. Москва, 2016 г.);

International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2015, (г. Челябинск, 2015);

1st Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems (MICNON-2015), Saint Petersburg (г. Санкт-Петербург, 2015);

7th International Conference on Sustainability in Energy and Buildings, SEB 2015 Lisbon, Portugal (г. Лиссабон, Португалия, 2015);

International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS) Tomsk, Russia 2015 (г. Томск, 2015);

Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах (ПУТС-2015) (г. Санкт-Петербург, 2015 г.);

Всероссийская научная конференция «Актуальные проблемы автоматизации и управления», Южно-Уральский государственный университет (НИУ) (Челябинск, 2013).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 56 работ, в том числе 19 статей в изданиях по списку ВАК, 19 статей – в базах Scopus и WoS, 2 патента на изобретения и полезные модели, 3 свидетельства на программы ЭВМ, а также в соавторстве изданы учебное пособие «Автоматизированные информационно-управляющие системы» в 2-х частях (294 стр.) и две монографии «Автоматизированные системы управления в энергосбережении» (228 стр.) и «Автоматизированные системы управления энергоэффективным освещением» (208 стр.).

Автор выражает свою глубокую признательность за консультации и поддержку при написании работы доктору технических наук, профессору, заслуженному работнику высшей школы РФ Казаринову Льву Сергеевичу.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ЭФФЕКТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ В ЭНЕРГОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ

1.1. Актуальные проблемы и задачи управления ресурсами в энергометаллургических технологических комплексах

Одной из базовых проблем развития энергосберегающих работ является обеспечение системного подхода при реализации энергосберегающих мероприятий.

В области электроэнергетики проблема интегрированного планирования и управления энергоресурсами в комплексе «электроэнергетическая система – инфраструктура потребителей» возникла первоначально для систем электроснабжения крупных городов. Так передовыми разработками в этой области следует указать опыт энергетической комиссии г. Сакраменто штата Калифорния (США) по интегрированному планированию и управлению энергетическими ресурсами города в комплексе с электростанцией, снабжающей город электроэнергией. Здесь для повышения энергетической эффективности энергетического комплекса наряду с генерирующими мощностями была создана параллельная инфраструктура, так называемая «*энергосберегающая станция*», под которой понимается комплекс энергосберегающих мер по автоматизации контроля и управления энергетической эффективностью города на стороне потребителей. Концепция «энергосберегающей станции», на основе рассмотрения условных «*потоков сбереженных энергетических ресурсов – негаватт энергии*» была предложена американским исследователем Эмори Ловинсом [12]. Аналогичный подход рассматривался на базе города Ганновера в работах Wuppertal Öko-Institut'a ФРГ и других городов. В России идеи интегрированного планирования и управления энергетическими ресурсами развиваются в работах И.А. Башмакова [9, 10].

Применительно к энергетической подсистеме металлургического производства проблема интегрированного планирования и управления

энергоресурсами по аналогии с системами электроснабжения крупных городов в литературе в целом не рассматривалась. Внимание в основном было обращено на решение отдельных безусловно важных, но все-таки относительно частных задач энергосбережения. При таком подходе может быть потерян системный эффект энергосбережения, когда положительный эффект решения отдельных задач нивелируется низкой энергетической эффективностью других подсистем металлургического комплекса. По этой причине системный эффект энергосбережения в целом может быть снижен.

В этой связи данная работа направлена на решение комплексной проблемы металлургического производства – снижение потребления первичных энергетических ресурсов таких как природный газ и коксующиеся угли в энергометаллургическом технологическом комплексе.

Общая структура рассматриваемого в данной работе энергометаллургического технологического комплекса представлена на рисунке 1.1.

С точки зрения энергосбережения базовыми источниками тепловой энергии здесь является центральная электростанция (ЦЭС) и паровоздуховная электростанция (ПВЭС). Электрическая энергия в рассматриваемом энергометаллургическом комплексе генерируется центральной электростанцией.

С целью утилизации вторичных энергетических ресурсов ЦЭС и ПВЭС используют вторичные энергетические ресурсы доменный газ (ДГ) и коксовый газ (КГ). Данные газы являются вторичными коксохимического производства (КХП) и доменного производства (ДП).

Технологический пар генерируется на ПВЭС и ЦЭС. Излишки технологического пара используются на буферной электростанции (БЭСТ) для генерации электрической энергии (Е). Стабилизация режимов технологической поровой сети осуществляется паровыми аккумуляторами (ПА).

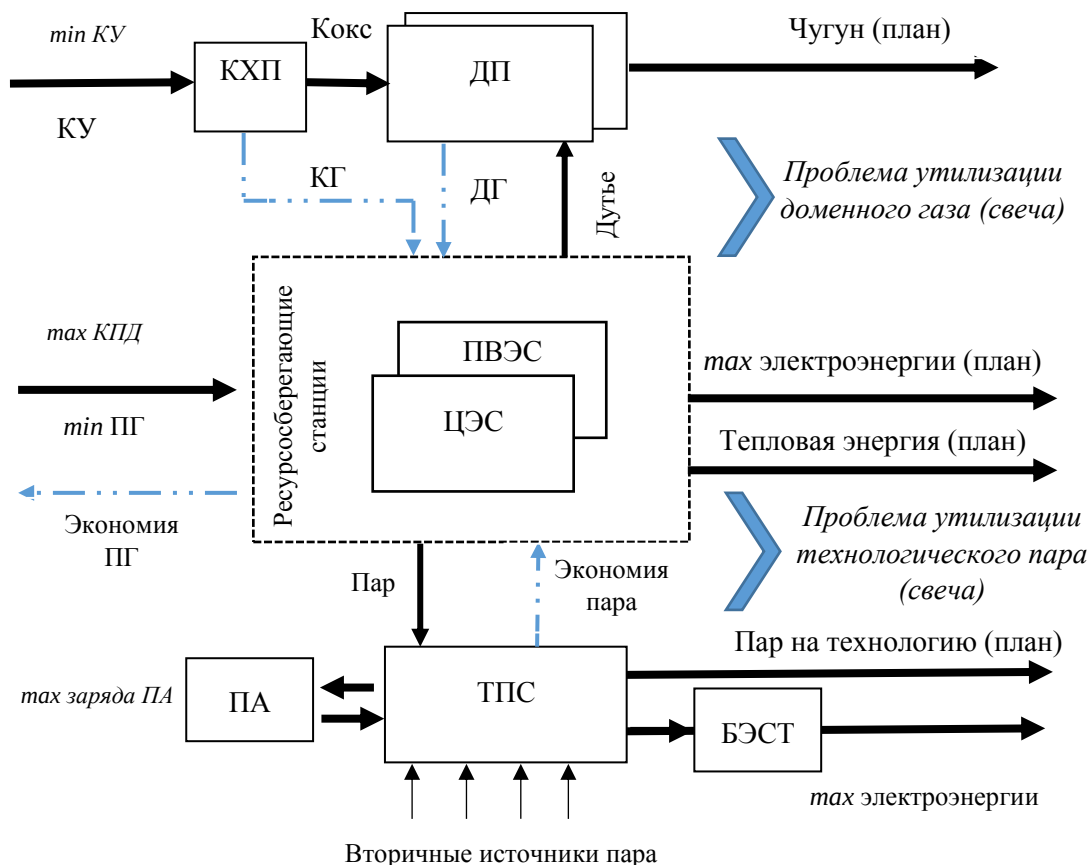


Рис. 1.1. Технологическая структура управления ресурсосбережением в энергометаллургическом комплексе

Здесь ДП – доменная печь, КУ – коксующиеся угли, КГ – коксовый газ, ДГ – доменный газ, ПГ – природный газ, ПВЭС – паровоздуховная электростанция, ЦЭС – центральная электростанция, БЭСТ – буферная электростанция, КХП – коксохимическое производство, ТПС – технологическая паровая сеть, УРТ – удельный расход топлива. Обратим внимание на «свечи», которые используются для сжигания избытков доменного газа и выпуска избыточного технологического пара, поэтому являются источниками прямых потерь энергетических ресурсов.

Интегрированное планирование энергетических ресурсов в данном энергометаллургическом комплексе осуществляется следующей стратегией. Так как критическим моментом эффективности функционирования

технологического комплекса металлургического производства является себестоимость производства проката, при этом себестоимость проката существенно зависит от себестоимости потребляемой электрической энергии прокатным производством, то перед металлургическим предприятием генеральной целью энергосбережения, как правило, является снижение себестоимости электрической энергии за счет использования вторичных энергетических ресурсов при максимальной выработке электрической энергии собственными станциями. Данная генеральная цель достигается за счет утилизации коксового газа (КГ), как вторичного энергетического ресурса коксохимического производства (КХП) и доменного газа (ДГ), как вторичного энергетического ресурса доменного производства (ДП). Указанные вторичные энергетические ресурсы реализуются на центральной электростанции и паровоздуховной электростанции. Излишки доменного и коксового газа утилизируются на свечах.

Утилизация доменного газа на ЦЭС при максимальной выработке электрической энергии приводит к повышенным объемам выработки острого пара. Плановая часть острого пара идет на теплофикацию, оставшаяся часть поступает через редуционно-охлаждающее устройство (РОУ) в технологическую паровую сеть. Наполнение технологической паровой сети (ТПС) осуществляется от ПВЭС, кроме того в технологическую паровую сеть поступают вторичные паровые ресурсы металлургического производства.

Стабилизация режимов технологической паровой сети осуществляется на основе стабилизации работы ПА. Излишки пара в технологической паровой сети утилизируются буферной электростанцией, которая работает в режиме максимальной выработки электрической энергии. Неутилизированные объемы пара поступают на паровую свечу и определяют прямые потери паровых энергетических ресурсов.

Экономия первичного энергетического ресурса природного газа, излишек тепла, который вырабатывает ЦЭС за счет снижения КПД ЦЭС от использования доменного газа и использования режима максимальной

выработки электрической энергии компенсируется повышением КПД ЦЭС за счет использования средств автоматизированной оптимизации режимов ЦЭС по КПД и подачи излишков выработанной тепловой энергии в паре в технологическую паровую сеть для утилизации в буферной электростанции (БЭСТ) при максимальной выработке электрической энергии.

Оптимизация доменного процесса (ДП) по критерию минимизации потребления кокса влечет за собой также снижение потребляемого дутья на ПВЭС и оптимизации дутья на ПВЭС приводит к снижению потребления первичного энергетического ресурса природного газа.

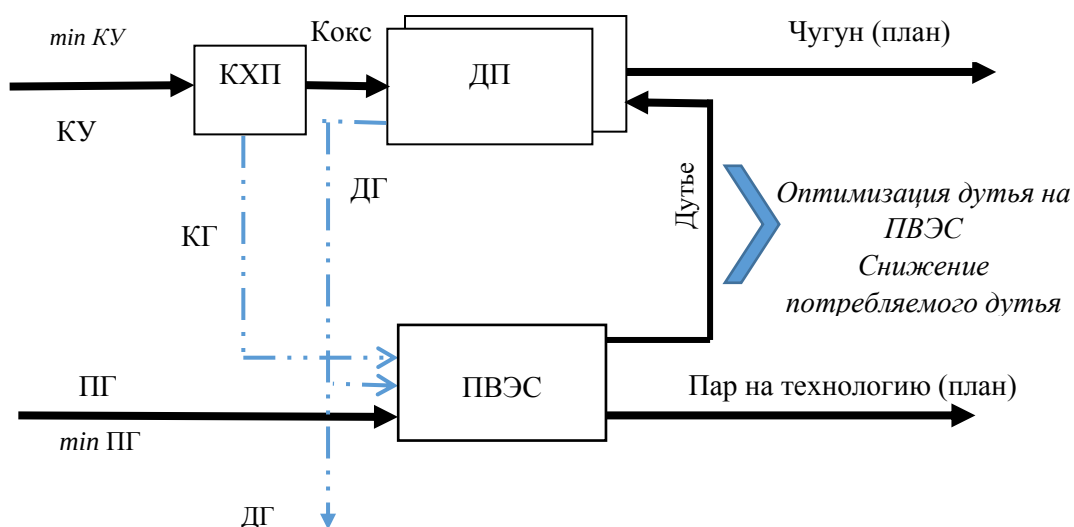


Рис. 1.2. Технологическая структура управления потреблением дутья в энергометаллургическом комплексе

В итоге в рассмотренной структуре энергометаллургического комплекса перечисленные выше энергосберегающие мероприятия служат в качестве факторов снижения покупных энергетических ресурсов: природного газа (ПГ) и коксующихся углей (КУ). Конечным эффектом выполнения указанных энергосберегающих мероприятий является снижение себестоимости металлургической продукции.

Проблемы, возникающие при реализации приведенной схемы следующие:

1. Построение автоматизированной системы оптимизации КПД энергетических котлов электрических станций в реальном времени в условиях быстропеременных изменений параметров доменного и коксового газа, а также в условиях резкопеременных нагрузок металлургического технологического комплекса.

2. Построение автоматизированной системы управления режимами технологической паровой сети металлургического технологического комплекса при стабилизации режимов на основе паровых аккумуляторов и резкопеременной нагрузки буферной электростанции.

3. Построение автоматизированной системы оптимизации режимов буферной электростанции по критерию максимальной эффективности функционирования градири.

4. Интеллектуальная автоматизированная система минимизации потребления кокса и стабилизация параметров теплового режима доменного процесса.

Построение указанных автоматизированных систем управления позволяет придать рассматриваемому энергометаллургическому комплексу качество *ресурсосберегающего*. В данном качестве указанный комплекс с точки зрения интегрированного планирования и управления энергосбережением приобретает роль терминального узла, куда сходятся условные потоки сбереженных ресурсов со всего металлургического комбината.

Действительно, последующие технологические стадии металлургического производства получают ресурсы из этого технологического комплекса. Поэтому значительная часть мероприятий по энергосбережению на последующих технологических стадиях в конечном итоге выливаются в снижение потребления природного и коксующих углей, как основных покупных энергетических ресурсов предприятия.

1.2. Обзор литературы

Потери энергетических ресурсов в энергетических паровых котлах в значительной мере зависят от эффективности топочных процессов горения, качество которых обеспечивается функционированием систем автоматического регулирования подачи топливных ресурсов и воздуха в топку парового котла.

В работах Полякова А.А [74] и Плетнева Г.П. [80] описаны широко применяемые варианты подключения входных сигналов к регуляторам подачи топлива и воздуха. При этом для оценки уровня тепловой нагрузки барабанных котлов в качестве типового на электрических станциях РАО ЕЭС был принят предложенный в 1953 году МО ЦКТИ сигнал по теплоте [2]. При этом в работе [74] отмечается, что использование автоматических регуляторов подачи топливных ресурсов и воздуха с обратным сигналом по теплоте обладает недостаточной эффективностью.

Для обеспечения процессов парообразования энергии с наименьшими экономическими затратами в практике известно два основных направления оптимизации технико-экономических показателей (ТЭП) энергоблока или его оборудования [111]. При разомкнутом оптимальном управлении зависимости оптимальных значений параметров от различных видов воздействий определяются аналитически или же опытным путем по результатам испытаний на действующем оборудовании. На основе этих зависимостей и выбираются статические настройки автоматических регуляторов технологических соотношений параметров или составляются рекомендации по управлению для операторов (режимные карты). Примерами указанного разомкнутого управления служит оптимизация соотношений «топливо-воздух» и «вода-воздух» при изменениях нагрузки, оптимизация вакуума в конденсаторе турбины [80, 111] и др. Несмотря на высокое быстроедействие, разомкнутые системы оптимального управления могут иметь значительную статическую ошибку.

При замкнутом экстремальном управлении с обратной связью по тому или иному показателю качества работы системы отыскание точки положения

экстремума осуществляется с помощью поисковых движений. Поиск – характерная черта экстремальных систем с обратной связью. В процессе поиска определяется знак и абсолютное отклонение (либо только знак) рабочей точки от точки экстремума и инициируется движение в сторону экстремума [72]. Примеры, связанные с применением автоматических поисковых регуляторов, приведены в [82, 22, 52]. Обладая меньшим быстродействием и необходимостью пробных возмущений, эти системы, тем не менее, позволяют осуществлять контроль непосредственно за текущим положением экстремума, характеризующим качество работы автоматической системы. При этом большую роль играет выбор входного сигнала экстремальной системы автоматического регулирования.

Известно, что формирование сигнала по КПД в темпе с процессом горения в настоящее время не практикуется в силу невысокой точности его измерения [82.]. Тем не менее, экстремальное управление достаточно вероятно по косвенному показателю (сигналу), отвечающему поставленным требованиям.

Одним из таких способов регулирования является регулирование оптимального избытка воздуха за пароперегревателем на основе изменения количества воздуха, подаваемого в топку котла с помощью дутьевых вентиляторов. Существует несколько вариантов схем автоматического управления подачей воздуха в зависимости от способов косвенной оценки экономичности процесса горения [80].

Вопросы повышения энергетической эффективности электрических станций, оптимизации и идентификации параметров математических моделей представлены в работах Клера А.М., Декановой Н.П., Максимова А.С. [45]; Пшеничникова С., Сумского И. [84]; Щинникова П.А. [108, 109, 110], Ноздренко Г.В. [71], Мерцалова А., Киселевой О., Рогова В. [61], Максимова В., Ларина В. [59], Карманова В.С., Мошкина Б.Н., Секретарева Ю.А., Чекалиной Т.В., Яковченко К.Н. [44], Мовчана В.А., Ильина Р.А. [63], Салова А.Г., Гавриловой А.А. [87, 88].

Вопросами распределения тепловых и электрических нагрузок между энергетическими агрегатами рассмотрены следующими авторами Горнштейн В.М. [15]; Низамеев Б.М., Ильин В.К. [64]; Литвак В.В., Матвеев А.С., Шевелев С.А. [57]; Житаренко В.М. [19]; Мелентьев Л.А., Попырин Л.С., Наумов Ю.В., Левенталь Г.Б. [51]; Герман М.Л., Щербич В.И., Пекарчик С.Л., Словик В.В. [14].

Сотрудниками Северо-Китайского Электроэнергетического университета Wang Yinsong, Li Shizhe, Tian Jingyu, Zhao Zheng [148] предложен алгоритм определения качества функционирования системы управления энергетической нагрузкой тепловой электростанции на базе анализа ковариационных связей технологических параметров.

Все указанные работы так или иначе базируются на предпосылке, что параметры доменного газа являются статическими либо изменяются достаточно медленно, что позволяет использовать адаптивное управление. Однако практика управления режимов котельных агрегатов показывает, что изменение давления доменного газа может быть достаточно быстрым. В этих условиях оценки текущей экономичности процессов горения, например, по текущему КПД, вследствие своей инерционности, могут быть не синхронизированы с динамикой подачи топлива и воздуха. Вследствие этого эффективность регулирования экономичности процессов горения в энергетических котлах может быть понижена.

Вопрос синхронизации процессов подачи топлива и воздуха в топку котла с текущими оценками эффективности горения в литературе не рассматривался. Решение этой проблемы является одной из задач, которая ставится в данной работе. С этой целью в работе ставится задача использования современных информационно-технических средств автоматизированного управления для регулирования эффективности работы котла по максимуму КПД в реальном времени.

Другой проблемой в комплексе задач интегрированного планирования и управления в рассматриваемой работе является повышение эффективности системы пароснабжения металлургического предприятия. Проблемой здесь является то, что энергометаллургического технологического комплекса характерно наличие большого количества источников вторичного тепла с изменяющейся паропроизводительностью. При этом паровые нагрузки технологических потребителей являются резко переменными и могут изменяться до десятков тонн за короткий промежуток времени. Все это накладывает серьезные требования на систему стабилизации динамики паровой сети. С точки зрения энергосбережения переменные источники вторичного пара и переменные потребители паровой нагрузки создают критические ситуации паровой сети, которые разрешаются путем выпуска избыточного пара в атмосферу через паровую свечу. Естественно, для демпфирования таких ситуаций, как правило используются аккумуляторы пара. Практика использования аккумуляторов пара показывает, что для их расчета недостаточно учитывается динамика сети, что приводит к снижению их эффективности. Для повышения эффективности аккумуляторов пара необходимы специальные системы, которые используются на основе современных информационных технологий. Данные системы позволяют отслеживать ситуации паровой сети в целом. Сложность данной задачи заключается в том, что технологические паровые сети для крупных металлургических предприятий являются разветвленными с большим количеством потребителей и большой протяжённостью. Для эффективного регулирования такой сети необходимо строить с использованием современных информационных технологий масштабные модели с учетом динамики аккумуляирования пара.

Рассмотрим основные методы расчета инженерных сетей.

Меренков А.П., Хасилев В.Я. в работе [60] рассматривают основные группы методов расчета инженерных сетей, такие как методы линеаризации зависимостей с использованием метода Ньютона и его модификаций, градиентные методы и методы нелинейного программирования.

Авторы работы [60] делают заключение, что предпочтительным в использовании методов расчета распределения потоков в инженерных сетях, являются методы, которые реализуют итерационный процесс Ньютона или его модификаций, которые наиболее эффективно используют сетевой характер и вытекающие из этого специальные свойства системы уравнений Кирхгофа. Вместе с тем экстремальные подходы сохраняют, несомненно, свое не только теоретическое, но и прикладное значение, например, при постановке и решении задач схемно-структурной и схемно-параметрической оптимизации многоконтурных систем.

В работе [42] авторы Карасев Н.И., Томилова Н.И. рассматривают метод узловых давлений, который обобщает метод узловых потенциалов из теории электрических цепей, сочетая преобразования Максвелла к узловым напорам с методом Ньютона, и базируется на процедуре линеаризации системы уравнений материального баланса в узлах с замыкающими соотношениями, описывающими стационарное изотермическое течение жидкости на пассивных и активных ветвях гидравлических цепей теплоснабжающих систем. Автор отмечает, что на основе исследований, выполненных в [60], сделан вывод о большем быстродействии и лучшей сходимости метода контурных расходов по сравнению с методом узловых давлений, что на многие годы исключило попытки привлечения метода узловых давлений для конструирования автоматизированных решателей задач потокораспределения для информационных технологий, обеспечивающих разработку теплогидравлических режимов теплоснабжающих систем.

Однако, в задачах машинного анализа сложных электрических цепей метод узловых потенциалов получил преимущественное развитие из-за большей

вычислительной эффективности. Именно это обстоятельство побудило авторов [42] обратиться к другому подходу к формированию системы уравнений узловых напоров для сложных гидравлических цепей, который опирается на инверсные характеристики пассивных и активных элементов трубопроводных сетей, замыкающих системы уравнений стационарного изотермического режима теплоснабжающих систем. Вычислительная эффективность этого подхода, как показали последующие исследования его программной реализации на реальных гидравлических цепях большой размерности [43], превосходят показатели эффективности метода узловых давлений, описанного в [60].

В работе [4] автор Ахметзянов А.В. дает описание многоуровневых методов моделирования нестационарных потоков в системах транспортировки газа произвольной конфигурации. В работе решается начально-краевая задача для нелинейных уравнений в частных производных, которые описывают нестационарные распределения расходов и давлений в системах транспортировки газа. Структура системы распределения газа определяет количество уровней вычислений.

В работе [104] авторов Шашкова О.К., Шашкова В.О. приводится адаптация метода теплогидравлических цепей к расчету переменных режимов схем паротурбинных установок, описываются вычислительные особенности метода. Кроме того, оценивается эффективность приведенного метода при практических расчетах.

В работе [53] автором Липовка Ю.Л. ставится цель – разработка эффективных методов анализа тепловых потоков в трубопроводных гидравлических системах.

Автором [53] построен вычислительный алгоритм поведения потоков в многоконтурных пространственных теплогидравлических цепях, учитывающий влияние внешних и внутренних факторов, и позволяющий

управлять необходимыми качественными показателями потребителей. Кроме того, разработаны алгоритмы и программное обеспечение для прогнозирования тепловых и гидравлических режимов конкретных теплогидравлических систем, позволяющие получать оперативную информацию о необходимой и возможной переброске потоков теплоты при авариях и срочных ремонтах. Получены зависимости, определяющие закономерности влияния функциональных параметров теплообменных аппаратов, локальных расходов тепловой энергии, теплоаккумулирующей способности потребителей при неравновесном состоянии потоков и давлений теплоносителя на эксплуатационные режимы работы гидравлической цепи в целом, что позволило предложить способы и методы регулирования, компенсирующие факторы внешних возмущающих воздействий.

Направление работ, указанное в [53], получило дальнейшее развитие в работе автора Липовка А.Ю. [54]. В работе проводятся исследования по совершенствованию методов расчета тепловых сетей для экономии энергетических ресурсов и стабилизации гидравлических режимов в тепловых сетях с иерархическим построением путем развития методов и средств компьютерного анализа гидравлической устойчивости инженерных трубопроводных систем.

Автором создана компьютерная модель для исследования трубопроводных систем, отличающаяся применением экспресс-анализа и позволяющая уже на стадии предварительного расчета тепловых сетей с иерархическим принципом построения оценивать возможность возникновения нештатных режимов и оперативно изменять конфигурацию, либо параметры их регулирования. Разработанный компьютерно-математический комплекс выводит на экран монитора основные параметры всех элементов тепловой сети и одновременно графически анализирует их гидродинамические режимы, что позволяет быстро проводить многовариантные расчеты без необходимости многократного обращения к анализу табличных данных.

Кроме того, автором [54] обоснована методика эквивалентирования активных элементов тепловой сети соответствующей системой узловых расходов, позволяющая значительно сократить время поверочного расчета тепловой сети с иерархическим построением.

В статье [18] авторы Ексаев А.Р., Вайсфельд В.А. делают акцент на том, что результатом любого гидравлического расчета всегда является потокораспределение - по каждому участку сети находится расход транспортируемого продукта, а по каждому узлу сети - давление. В то же время способы задания исходных данных могут довольно сильно отличаться между собой. Если сеть не содержит регуляторов (давления, расхода или температуры), то задача гидравлического расчета сводится к системе нелинейных уравнений большой размерности. В свою очередь, линеаризация этой системы приводит к разреженной системе линейных уравнений со специфической структурой. Регуляторы значительно усложняют задачу, поскольку в этом случае к системе уравнений добавляются еще и неравенства.

Как отмечают авторы [18], методов решения задач гидравлического расчета счетное количество, и они также хорошо известны. Поэтому на первый план выступает качество и алгоритмов, и программной реализации гидравлического расчета.

Далее авторы [18] приводят историю развития программ гидравлического расчета. Так, первые программы гидравлического расчета появились до появления и массового распространения геоинформационных систем. Как только были созданы надежные и эффективные процедуры гидравлического расчета, на первый план стали выходить проблемы создания удобных пользовательских оболочек.

Почти одновременно с внедрением систем гидравлического расчета с графическим представлением расчетной схемы появляются возможности создания и использования систем паспортизации инженерных коммуникаций на основе электронных планов. Поскольку любая из этих систем связана с

большими трудозатратами на создание и актуализацию базы данных, сразу же возникли проблемы взаимодействия этих систем. Авторы убеждены, что система паспортизации сети и система расчета гидравлических режимов представляют собой единую информационно-графическую систему, в основе которой лежит база данных. Планы инженерных коммуникаций, выполненные на основе стандартных городских планшетов, могут использоваться либо непосредственно как расчетные схемы, либо с помощью автоматизированных процедур преобразовываться в расчетные схемы. Для того, чтобы это было возможно, должны быть продуманы методы идентификации и систематизации узлов и участков сети на плане. Особенно важным вопросом является четкое определение потребителей сети.

Опыт авторов [18] показал, что реальные тепловые, газовые сети даже крупных городов не порождают подсетей с более чем 10 тысяч участков, для которых необходим гидравлический расчет. Расчет таких сетей на современных компьютерах производится за считанные секунды, хотя процессы чтения исходной информации и записи результатов в базу данных могут занимать несколько минут. Это еще один довод в пользу непосредственного использования эксплуатационных планов в качестве расчетных схем. Водопроводные сети крупных городов могут порождать сети, содержащие уже десятки тысяч участков. Такие сети уже сложно рассчитать даже на суперкомпьютерах. Самое главное, при такой размерности практически невозможно корректно ввести исходную информацию, а потом проанализировать результаты расчета. В этом случае приходится применять полуэвристические методы составления упрощенных (эквивалентированных) расчетных схем. Тем не менее, информационно-графические системы паспортизации водопроводных сетей должны содержать в себе специальные процедуры формирования исходной графической и текстовой информации для построения расчетных схем.

Так, инженерно-внедренческим центром «Поток» разработана информационно-графическая система (ИГС) «CityCom» для предприятий, эксплуатирующих инженерные коммуникации. Данная система, в частности, включает в себя ИГС «CityCom-ТеплоГраф» и ИГС «CityCom-ГидроГраф», предназначенные для паспортизации, диспетчеризации, гидравлического расчета и моделирования тепловых и водяных сетей соответственно. С использованием ИГС «CityCom», как утверждают авторы [18], даже на 386 компьютере за 1-2 секунды можно получить полное потокораспределение для сетей, содержащих тысячи участков, при любой степени их закольцованности.

В работе Крицкого Г.Г. и Аширова А.А. [49] приведено описание программно-расчетного комплекса «Армтест-Zulu». Указанная система позволяет рассчитывать сложные тепловые сети сложности. Как отмечают авторы, с использованием данного комплекса могут осуществляться следующие виды расчетов системы теплоснабжения: 1) поверочный; 2) конструкторский; 3) пьезометрического графика; 4) температуры на источниках.

Фирмой «Сириус» разработана информационно-графическая система (ИГС) ТГИД-05, назначением которой является имитационное моделирование и пространственно-технологический анализ статических теплогидравлических режимов системы централизованного теплоснабжения, с целью поддержки принятия решений по проведению наладочных и перспективных мероприятий для оптимизации работы режимов системы.

Однако программные комплексы, описание которых приведено выше, позволяют рассчитывать параметры сетей только для установившихся режимов.

Статья [3] авторов Асенчика О.Д., Стародубцева Е.Г., Токочакова В.И. посвящена описанию структуры и алгоритмов работы специализированных составных блоков для построения визуальных моделей электрических сетей с помощью пакетов VisSim и Simulink. Как отмечают авторы, отличительной

особенностью полученной библиотеки блоков является расчет действующих значений комплексных токов и напряжений в стационарном режиме. Используется итерационный алгоритм расчета в «направлении» от нагрузки к источнику. Практическая значимость рассматриваемой задачи моделирования обусловлена тем, что для организаций, обслуживающих разветвленные электрические сети, типичной является ситуация переключения распределительных линий электропередачи с одного источника питания на другой (при авариях, плановых ремонтных работах и т. д.). При этом выбирается вариант переключения (из нескольких возможных), оптимальный по ряду критериев: обеспечение значений напряжений у потребителей и токов в элементах сети в заданных диапазонах, минимизация потерь электроэнергии в линиях и др. Принятие такого решения требует оперативных расчетов параметров распределительных электрических систем, которые могут быть выполнены и представлены в удобной для восприятия форме с помощью пакетов программ визуального моделирования. Также возможно использование данных пакетов программ для разработки компьютерных тренажеров диспетчеров электросетей и при проектировании новых электрических сетей.

Особенностью данной работы является то, что в рамках концепции интегрированного планирования и управления процессами энергосбережения совместно рассматриваются не только источники энергетических ресурсов, но и их потребители, технологические объекты основного производства. В рамках данной работы в качестве объекта основного производства рассмотрен доменный процесс. Доменный процесс является исходной стадией металлургического производства, которая определяет последующие стадии и является самым энергозатратным процессом и является весьма сложным объектом для реализации энергосберегающих мероприятий. Эффективность доменного процесса непосредственно влияет на объем закупок каменноугольного сырья, которое вместе с потреблением природного газа

существенно определяет себестоимость металлургической продукции предприятия. Кроме того, доменный процесс вместе коксохимическим производством тесно связан с энергетической подсистемой, в которую поставляются вторичные энергетические ресурсы в виде доменного и коксового газов.

Современные методики анализа процессов доменной плавки базируются на достижениях многих отраслей науки и техники. Модели доменного процесса изучались на протяжении многих лет. Среди отечественных исследователей существенный вклад в развитие изучения доменного процесса внесли Товаровский И.Г. [94-96], Готлиб А.Д. [16, 17], Спирин Н.А., Лавров В.В., [89, 90], Рамм А.Н. [85, 86], Паршаков В.М. [77-79] и др.

Среди зарубежных исследователей в этой сфере известны Kule J. [127], Sasaki M., Ono K., Suzuki A. [139]; Burgess J.M., Jenkins D.R., Hockings K.L. [1142]; Kumar S.A. [128], Yagi J. [147], Gobetto M. [122] и др.

Доменная печь является сложным объектом для управления, так как в ней протекают процессы горения топлива, плавления металла, восстановление и науглероживание железа и др. На сегодняшний момент существует множество подходов к ведению доменного производства. Например, на металлургических предприятиях России, Украины и Казахстана широко распространено использование таблицы факторов, влияющих на расход кокса и производительность доменной печи [94]. Методика была составлена на основе обобщения закономерностей доменной плавки и общих принципов доменного процесса. Она включает в себя характеристики состава шихты (содержание железа, руды), качества кокса (прочность M_{25} , истираемость M_{10} , фракция +80 мм, зола), химический состав чугуна (Si, Mn, P, S), дутьевые параметры (температура дутья, концентрация кислорода, влажность) и др. При использовании этого метода для анализа влияния факторов на удельный расход кокса и производительность предполагается их линейность и автономность,

однако, на практике влияние факторов на удельный расход кокса и производительность нелинейно и необходимо учитывать их взаимосвязи. Так же нельзя рассматривать какой-либо параметр доменной плавки отдельно, так как процесс происходит под влиянием взаимосвязанных параметров. Следует отметить, что работа каждой отдельно взятой печи уникальна и значения указанных в таблице коэффициентов необходимо уточнять для конкретной доменной печи. Это вызвано тем, что сырьевые и технологические условия доменных цехов на металлургических заводах существенно отличаются. Кроме того, таблицы могут быть неполными, например, не включать такие важные характеристики доменного процесса, такие как CRI (реакционная способность) и CSR (послереакционная прочность) кокса, содержание агломерата в шихте и его химический состав, содержание окатышей в шихте.

В общем случае контроль процессом доменного производства и управление им требует учета большого количества параметров, то здесь перспективно использование методов искусственного интеллекта [135]. Данные методы уже активно применяются в таких областях как медицина, социология, маркетинг и др. В доменном производстве это направление еще недостаточно развито, но работы в этом направлении уже ведутся. Так, Angela X. G. (1999) [112] использовала многослойную нейронную сеть, которая по одиннадцати входным параметрам предсказывала точное значение температуры чугуна на выходе доменной печи. Dharendra Kumar (2015) [128] разработал искусственную нейронную сеть для прогнозирования температуры горения. В работе Sayd Farage David, Felipe Farage David, M.L.P. Machado (2016) [115] для оценки изменения параметров доменного процесса при изменении содержания кремния в чугуне была создана модель, основанная на искусственной нейронной сети, которая позволила исследователям добиться того, что модель позволяла предсказать содержание кремния через параметры доменной плавки. Необходимо также отметить работы по сравнению множественной линейной регрессии, авторегрессионной интегрированной модели скользящего среднего и искусственной нейронной сети в задаче

прогнозирования температуры доменной печи. Наилучший по точности результат был получен при использовании искусственной нейронной сети [138].

Также в работе предлагается использование искусственной нейронной сети для решения задач кластеризации. Это позволяет извлекать данные о доменном процессе путем обобщения данных статистики работы печи с наименьшими потерями информации и исследовать характеристики, полученные на этих данных. Данная задача может быть решена с помощью однослойной нейронной сети с обучением без учителя, предложенной финским ученым Т. Кохоненом, так же имеющая название самоорганизующаяся карта Кохонена. В работе исследователей José Manuel Mesa Fernández, Vleriano Álvarez Cabal, Vicente Rodríguez Montequin, Joaquín Villanueva Balsera [117] была построена модель с использованием такой нейронной сети, которая выступала в качестве классификатора для прогнозирования температуры электродуговой печи.

Основные положения теории доменной плавки были выдвинуты советскими учеными, среди которых особый вклад внесли И.П. Бардин, Е.Ф. Вегман, В.Г. Воскобойников, А.Д. Готлиб, В.К. Грузинов, Б.Н. Жеребин, Б.И. Китаев, Н.И. Красавцев, З.И. Некрасов, М.А. Павлов, А.Н. Похвиснев, А.Н. Рамм, И.А. Соколов, В.А. Сорокин, М.А. Стефанович, С.В. Шаврин, Ю.С. Юсфин, Ю.Г. Ярошенко и другие [73].

Эти положения активно развивали В.П. Авдеев, В.Н. Андронов, Н.Н. Бабарыкин, И.Д. Балон, Б.А. Боковиков, В.И. Большаков, А.В. Бородулин, О.П. Онорин, Н.А. Спирин, В.Л. Терентьев, В.Ю. Рыболовлев и многие другие исследователи на основе математического, физического моделирования, а также экспериментальных исследований.

На текущий момент разработано и внедрено много информационных систем доменного процесса, однако основная роль в управлении печью отводится

эксперту-технологу, так как все тонкости доменного процесса еще не изучены до конца. Основная проблема существующих моделей доменного процесса заключается в том, что их точность недостаточно высока.

На доменный процесс оказывают влияние множество факторов, как контролируемых, так и неконтролируемых, вызывающих нарушение хода плавки и требующих высокой квалификации персонала [20].

В истории науки и техники первые системы автоматического управления технологическими процессами были созданы отечественными учеными доменщиками еще в 1939г. Профессор А.Н. Похвиснев предложил метод расчета «скоростного» теплового баланса для оперативного управления доменной печью.

Автор описывает подходы к математическому моделированию доменной плавки, основанные на методическом подходе «черного ящика» без детального анализа физических и химических процессов в доменной печи. Достатком метода «черного ящика» является, то что полученные зависимости описывают только конкретные режимы эксплуатации, в которых были проведены исследования.

Рассматриваются модели, исходные данные для которых представляют собой установившиеся нормальные режимы работы доменных печей. Данные модели согласно [93-96] применяются для определения статических характеристик конкретных режимов работы доменных печей. Коэффициент корреляции полученных Товаровским И.Г. моделей составляет 0,6-0,8.

Также применяется метод определения натурных данных в результате целенаправленного изменения входных воздействий [95]. Недостатком данного метода является, то что не учитываются сложные взаимосвязи технологических параметров доменной печи.

В Сибирском государственном индустриальном университете активно развивается идеология данного подхода описания металлургических процессов,

включая доменный [1]. В основе направления по созданию многовариантных алгоритмов лежат различные методы математической статистики, предлагаемые способы и алгоритмы обработки технологической информации с использованием линеаризации.

В настоящее время широко используется метод факторного счета влияния зависимостей технологических параметров на эффективность доменной плавки. Данный метод используется для решения задач нормирования и управления доменной плавкой на металлургическом производстве.

Недостатком факторного счета влияния зависимостей технологических параметров на эффективность доменной плавки является низкая точность методов.

Основным подходом к моделированию процессов в доменных печах является применение фундаментальных физико-химических законов.

Детальный обзор существующих математических методов описания доменного процесса, особенностей конструирования математических моделей и их применения выполнен в работах [93-95].

Зависимости, установленные в результате аналитического описания явлений доменной плавки, отражают общие закономерности процесса и, вследствие этого, обладают большими прогнозными возможностями. В зависимости от степени детализации явлений при аналитическом описании процесса различают балансовые и кинетические модели доменного процесса.

Комплекс математических моделей включает совместно работающие на основе единой базы данных модель агломерации, двумерные модели газодинамики, теплообмена, восстановления, зоны когезии, а также балансовые модели доменной плавки, позволяющие определить расход кокса, расход дутья, выход газа, температуру фурменного очага, используемые как входные параметры двумерных моделей.

Балансовая математическая модель доменного процесса

Проблема совместного решения системы материального и теплового балансов была решена А.М. Раммом [86]. Также, балансовая модель получила развитие в Институте металлургии УрО РАН [92].

Балансовые модели доменного процесса описывают закономерности тепло- и массообмена в самом общем виде. В основе их лежат материальные и тепловые балансы, устанавливающие взаимосвязи между режимными параметрами процесса, показателями работы печи и показателями ее теплового состояния.

Кинетическая математическая модель доменного процесса

Кинетические модели являются более полными, но отличаются низким быстродействием из-за наличия сложных систем уравнений, что делает затруднительным их использование для задач текущего управления процессом. Наличие в кинетических моделях сложных эвристических алгоритмов, большого количества эмпирических данных и коэффициентов делает их использование затруднительным [75].

Модель МГТУ

Коллективом ФБОУ ВПО «МГТУ» проведены исследования по теме повышение производительности доменной печи при оптимизации автоматического управления подачей природного газа и технического кислорода в дутье [76].

Авторы показали, что при всех равных условиях зависимости удельного количества кокса и производительности доменной печи от величины удельного количества природного газа имеют экстремальный вид. Положение экстремумов этих зависимостей определяется соотношением удельных количеств природного газа и технологического кислорода, используемого для обогащения дутья.

При построении модели производительности доменной печи рассматриваются факторы: обогащения дутья кислородом и удельного количества природного газа для нахождения оптимальной производительности, и минимального расхода кокса.

В настоящее время весомым фактором, влияющим на эффективность управления доменной печью, является низкая точность расчетов, которая приводит к колебательным процессам режимов печи, что снижает эффективность ДП. Поэтому актуальной задачей управления динамикой материального и энергетического балансов является разработка моделей прогнозирования динамики материального и теплового состояния печи при воздействии указанных факторов.

Кроме того, расчет работы печи при случайных разбросах параметров материалов является сложной проблемой, особенно касательно выбора номинального режима работы печи. Данная проблема рассмотрена в фундаментальной работе Товаровского И.Г. [93], где указано, что вследствие сложности учета случайного характера параметров материалов и режимов печи многие авторы рекомендуют в качестве номинального режима выбирать эталонный режим работы, определяемый статистически на основе усреднения множества эффективных режимов по данным эксплуатации. Такой подход обладает тем недостатком, что при больших вариациях параметров печи весьма сложно стабилизировать работу печи в одном номинальном режиме.

Вследствие сложности доменного процесса и неполной наблюдаемости параметров задача формирования математических моделей для изучения доменных процессов еще решена недостаточно и на сегодняшний день является актуальной, ведутся исследования в данной области. В настоящее время процесс доменной плавки изучен не во всех деталях и требует проведения дальнейших исследований. Достаточное развитие в данной отрасли получили информационные системы доменного процесса, но главную роль в управлении

доменной печью играет эксперт технолог. Проблемой всех существующих моделей доменного процесса является недостаточно высокая точность и отсутствие учета динамики процессов. Вследствие этого в работе ставится задача применения современных интеллектуальных технологий для решения задач минимизации потребления кокса и стабилизации динамики доменной плавки.

Работы Г.В. Никифорова, В.К. Олейникова, Б.И. Заславца являются основными по энергосбережению и прогнозированию в сфере металлургического производства.

В работе [69] основное внимание уделено повышению эффективности использования электрической энергии, оптимизации режимов потребления электрической энергии энергетических агрегатов металлургического предприятия, а также рассмотрены вопросы нормирования и прогнозирования потребления электрической энергии для формирования технико-экономических показателей металлургического комбината в целом. Данная работы послужила основой построения системы энергетического менеджмента металлургического комбината в целом.

Иванов В.И. в работе [21] на основе сведения топливно-энергетического баланса при учете технологических и технико-экономических ограничений описывает способ оптимизации потребления топливно-энергетических ресурсов для всей тепловой электростанции.

Несмотря на то, что в настоящее время задача идентификации и прогнозирования потребления топливно-энергетических ресурсов хорошо описана в литературе Л.А. Копцевым, И.А. Япрынцевой, А.В. Павловым и др. [46-48], необходимо вести работы по повышению точности моделей потребления энергетических ресурсов ив частности топливных газов для энергометаллургического комплекса ПАО «ММК».

Указанные модели могут быть эффективно использованы для нормирования и прогнозирования потребления энергетических ресурсов в энергометаллургическом комплексе. Однако процедуры расчета по данным моделям решают только оценки энергоемкости отдельных технологических объектов.

Поэтому ставится задача оценки в комплексе энергоемкости [55-56] для задач планирования энергопотребления с учетом энергосберегающих мероприятий требуется более гибкая методика, концепцию которой дает концепция потоков сбереженных ресурсов, предложенная Э.Ловинсом [12]. Она позволяет выявить системные эффекты энергосбережения и на этой основе более эффективно с точки зрения энергосбережения планировать энергопотребление потребителей. Указанная методика была апробирована в данной работе, которая показала ее наглядность и эффективность.

1.3. Постановка цели и задач исследования

Как следует из приведенного обзора литературы в последнее время ведутся работы по повышению энергетической эффективности в энергометаллургических технологических комплексах. В настоящее время управление сложными технологическими комплексами осуществляется на базе внедрения локальных автоматизированных систем управления технологическими процессами. Однако, в области автоматизированных систем управления сложными энергометаллургическими технологическими комплексами передовой концепцией в настоящее время является концепция интегрированного планирования и управления энергетическими ресурсами.

В целом проблема интегрированного планирования и управления энергетическими ресурсами в промышленности в настоящее время решена недостаточно. Постановка данной задачи применительно к металлургическому предприятию имеет существенные отличия от соответствующей постановки задачи энергоснабжения крупных городов. Так металлургическое предприятие

наряду с потреблением электрической энергии, природного газа и водных ресурсов, потребляет каменноугольное топливо, вторичные энергетические ресурсы в виде пара, доменного газа, кислорода и др. Комплексное рассмотрение эффективного потребления указанных ресурсов металлургическим предприятием является весьма сложной недостаточно решённой проблемой, что определяет актуальность данной работы.

Несмотря на обширную литературу, посвященную современным проблемам повышения энергетической эффективности в технологических комплексах, имеется недостаточно решенные проблемы, среди которых следует отметить:

- проблемы интегрированного планирования и управления процессами энергосбережения в масштабах крупного промышленного предприятия;
- проблемы системной оптимизации технологических процессов в масштабах предприятия, реализующих резервы повышения энергетической эффективности;
- проблемы практической реализации интегрированного планирования и управления энергетическими ресурсами для конкретных производств.

Для металлургического предприятия реализация концепции интегрированного управления эффективностью теплоэнергетического комплекса с целью получения системного эффекта является в настоящее время недостаточно решенной проблемой, что и определяет актуальность данной работы.

Предлагаемая работа посвящена решению данных проблем применительно к задачам повышения энергетической эффективности в энергометаллургических технологических комплексах – снижения потребления первичных энергетических ресурсов таких как природный газ и коксующиеся угли.

Целью работы является повышение энергетической эффективности энергометаллургических технологических комплексов путем снижения потребления покупных ресурсов – природного газа и коксующихся углей на

основе внедрения систем интегрированного планирования и автоматизированного управления процессами энергосбережения.

Для достижения указанной цели в работе решаются следующие комплексные задачи.

4. Провести системный анализ целей и задач энергосбережения в энергометаллургическом технологическом комплексе с использованием концепции потоков сэкономленных ресурсов.

5. В рамках предложенной структуры целей и задач разработать следующие автоматизированные системы поддержки интегрированного планирования и управления процессами энергосбережения:

5.1. Автоматизированная система оптимизации эффективности потребления вторичных энергетических ресурсов металлургического производства на тепловых электростанциях технологического комплекса.

5.2. Автоматизированная система управления режимами паровых аккумуляторов технологической паровой сети по критерию максимальной утилизации вторичных паровых ресурсов в сети.

5.3. Интеллектуальная система принятия решений по управлению режимами доменных процессов по критерию стабилизации режимных параметров в эффективных областях их значений при нестабильности параметров исходных материалов.

5.4. Интеллектуальная система планирования и управления показателями энергетической эффективности подразделений энергометаллургического комплекса предприятия.

6. Внедрить разработанные автоматизированные системы управления технологическими процессами в рамках интегрированного планирования и управления процессами энергосбережения на промышленной площадке ПАО «ММК».

Решение поставленной комплексной проблемы выполнялось коллективом Центра энергосберегающих технологий ПАО «ММК», Цифрового

офиса ПАО «ММК» (группа математического моделирования и продвинутой аналитики), соисполнители: УНИД ЮУрГУ(НИУ) и ООО НПП «Политех-Автоматика» при непосредственном участии автора в плане научного обеспечения и руководства работ.

ГЛАВА 2. МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ИНТЕГРИРОВАННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ В ЭНЕРГОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ

2.1. Постановка задачи интегрированного планирования и управления ресурсами

Как уже отмечалось, одним из основных направлений технической политики энергосбережения в промышленно развитых странах, проводимой на уровне крупномасштабных хозяйственных комплексов, в настоящее время является методология интегрированного планирования энергетических ресурсов [10, 113, 116, 124, 125, 132, 138].

Основная идея интегрированного планирования энергетических ресурсов (ИПЭР) состоит в том, что в сложных технико-экономических комплексах с общехозяйственной точки зрения при решении задач обеспечения потребителей энергоресурсами необходимо рассмотреть необходимые мероприятия как на стороне энергоснабжения, так и на стороне потребителей, взвесить все «за» и «против» и принять оптимальные решения – распределить имеющиеся финансовые средства в рациональной пропорции либо на мероприятия, связанные с расширением объема поставок ресурсов, либо на энергосбережение на стороне потребителей. При этом основное внимание должно уделяться обеспечению потребителей заданным уровнем качества конечных услуг при минимизации объемов потребления энергетических ресурсов.

Интегрированное планирование энергетических ресурсов исходит из системного понимания задачи снабжения потребителей энергетическими ресурсами. При этом поставка энергетических ресурсов понимается не как конечная цель, а как средство обеспечения конечных целей потребителей, например – выпуска заданного объема продукции, заданного уровня комфортности в помещениях и др. Конечные цели потребления выступают как

жесткие ограничения в постановке рассматриваемой задачи. Необходимые для осуществления указанных конечных целей объемы энергетических ресурсов выступают как показатели, которые должны быть минимизированы.

Конечные цели потребления и объемы энергетических ресурсов связаны между собой функциональными зависимостями. Коэффициенты этих зависимостей, определяющие пропорции объемов потребления энергоресурсов и объемов конечных услуг, являются показателями энергоемкости предоставляемых услуг. Энергосбережение основано на минимизации показателей энергоемкости. В итоге в общей задаче снабжения потребителей энергоресурсами можно выделить *дуальные друг другу процессы: процесс собственно снабжения ресурсами и процесс энергосбережения.*

2.2. Задачи управления энергетической эффективностью энергометаллургических технологических комплексов с использованием концепции энергосберегающей станции

В работе для достижения интегрального эффекта энергосбережения рассматриваются совместно двойственные потоки потребления энергетических ресурсов и потоки сэкономленных энергетических ресурсов. Технологическая структура управления энергосбережением при рассмотрении дуальных потоков реальных и сэкономленных ресурсов представляет собой структуру распределённой энергосберегающей станции, вырабатывающую «негаватты». Данный подход позволяет достичь системного эффекта от интегрированного управления процессами энергосбережения в сложных технологических комплексах металлургических производств. В рассматриваемой технологической структуре интегральный эффект энергосбережения формируется на источниках выработки энергетических ресурсов, т.к. именно они являются условными «потребителями» сбереженных энергетических ресурсов.

Пример.

Рассмотрим технологическую структуру управления энергосбережением применительно к энергометаллургическому технологическому комплексу крупнейшего производителя металлургической продукции ПАО «ММК», которая приведена на рис.2.1. Здесь одним из базовых звеньев является центральная электростанция (ЦЭС). Данная станция состоит из блока энергетических котлов, работающих на смеси природного газа (ПГ) и доменного газа (ДГ), блока турбогенераторов и парового коллектора [7, 28, 29].

В технологической структуре управления энергосбережением металлургического предприятия себестоимость электроэнергии (ЭЭ), вырабатываемая на ЦЭС значительно ниже стоимости покупки ЭЭ с оптового рынка. Исходя из этого можно сделать вывод, что необходимо максимально вырабатывать ЭЭ на собственных станциях предприятия. Однако данный прямой вывод не является системно обоснованным вследствие того, что при рассмотрении нелинейных экстремальных характеристик потребления ДГ в зависимости от выработки пара энергетическими котлами видно то, что при максимизации нагрузки котлов происходит уменьшение потребления ДГ и снижается КПД.

При этом для повышения эффективности станции необходимо проводить мероприятия по увеличению объемов потребления ДГ и повышению КПД котлов. Например, решается задача перераспределения паровой нагрузки между котлами с целью снижения себестоимости выработанной ЭЭ за счет увеличения потребления ДГ.

Системный анализ связей задач повышения энергетической эффективности в составе рассматриваемой технологической структуре управления энергосбережением металлургического предприятия представлен на рис. 2.1.

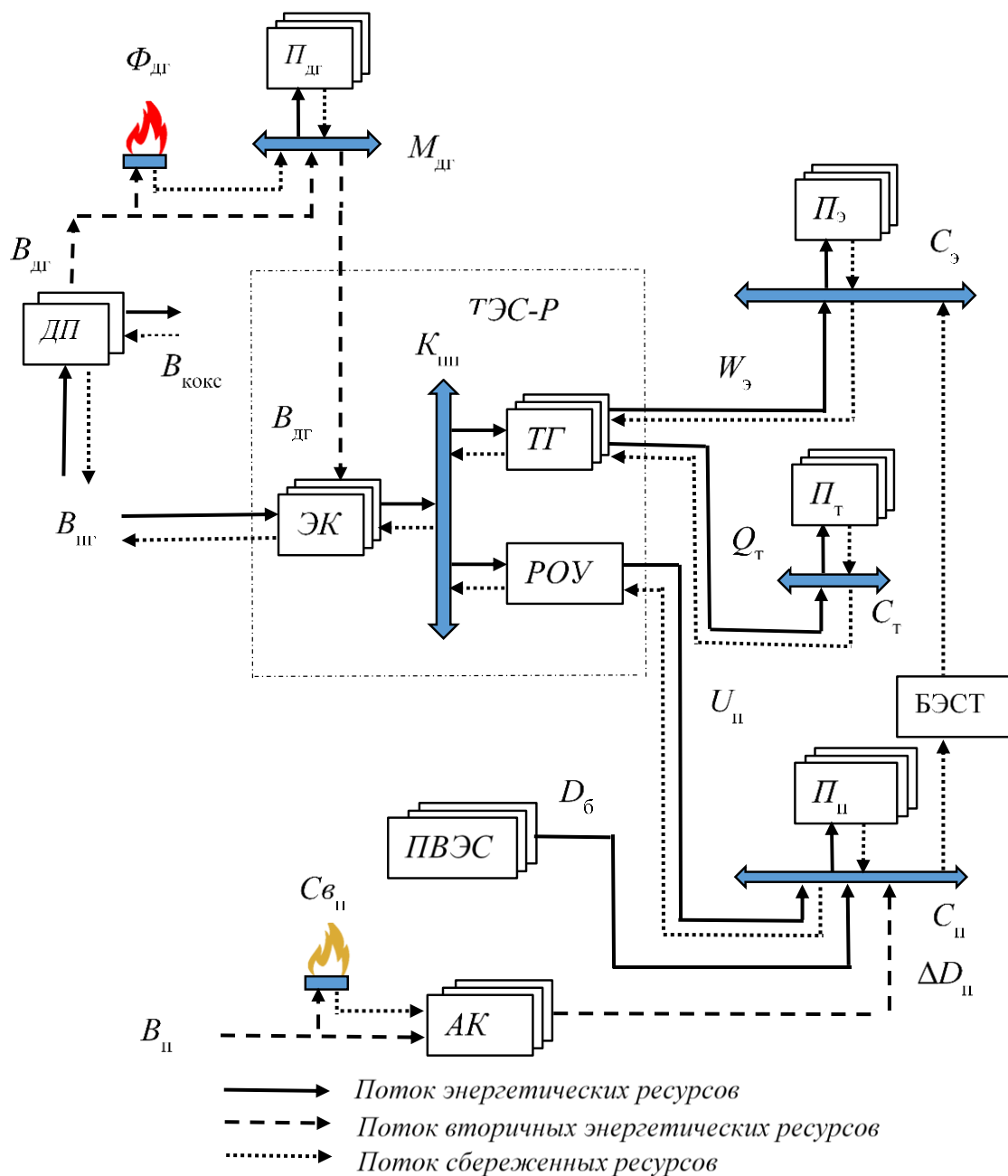


Рис. 2.1. Структура энергетического комплекса

$ЭК$ – блок энергетических котлов, $ТГ$ – блок турбогенераторов $K_{пп}$ – коллектор перегретого пара, $B_{пг}$ – расход природного газа, $B_{дг}$ – расход доменного газа, $B_{коксы}$ – расход кокса, $ДП$ – доменная печь W_3 – выработка электрической энергии, Q_T – тепловая энергия в теплофикационной воде, POY – редуционно-охлаждающее устройство, $U_{п.}$ – отбор пара на технологические нужды, $M_{дг}$ – магистраль доменного газа, $\Phi_{дг}$ – свеча доменного газа, $\Pi_{дг}$ – потребители доменного газа, C_3 – электрическая сеть, C_T – теплофикационная сеть, $C_{п}$ – паровая сеть предприятия, Π_3 , Π_T , $\Pi_{п}$ – соответствующие потребители электрической, тепловой энергии и пара, $АК$ – паровые аккумуляторы, $C_{вп}$ – сброса избыточного пара в атмосферу, основным источником пара на технологические нужды D_6 является энергетическая станция $ПВЭС$, работающая в базовом режиме. БЭСТ – буферная электростанция. С аккумуляторов $АК$ при необходимости в паровую сеть $C_{п}$ подается дополнительный пар $\Delta D_{п}$, который компенсирует резкие набросы паровой нагрузки потребителей. Дополнительные источники пара – $B_{п}$.

Основной задачей интегрированного управления энергосбережением в теплоэнергетическом комплексе металлургического производства является экономия потребления ПГ, как покупного ресурса. Потребление ПГ непосредственно зависит от объема выработки перегретого пара котлами на станциях, коэффициента полезного действия котлов и объема, потребляемого вторичного энергетического ресурса – ДГ. Потому следует решать задачу максимизации потребления ДГ для уменьшения потребления ПГ.

При увеличении выработки перегретого пара происходит увеличение потребления ПГ, эта зависимость обуславливает необходимость решения задачи уменьшения объема вырабатываемого пара котлами станции-регулятора перегретого пара. Примеры данных зависимостей приведены на рисунках 2.2-2.13.

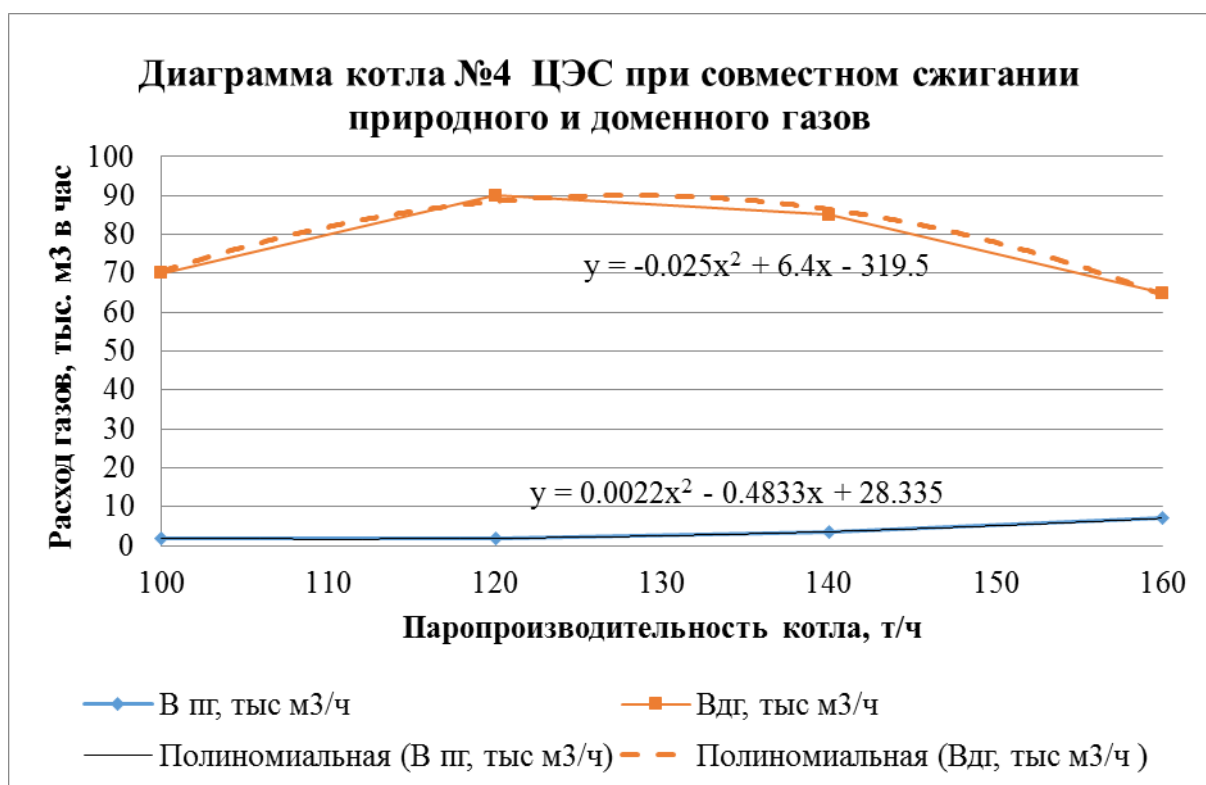


Рис. 2.2

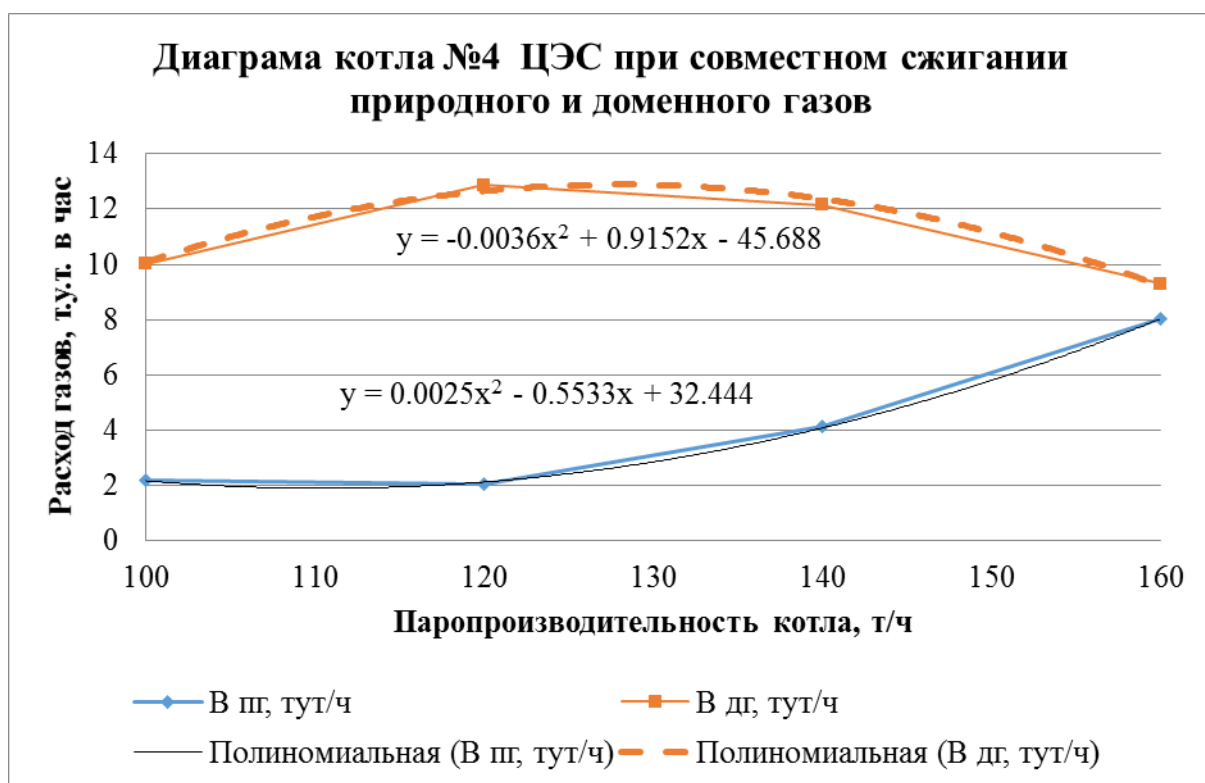


Рис. 2.3

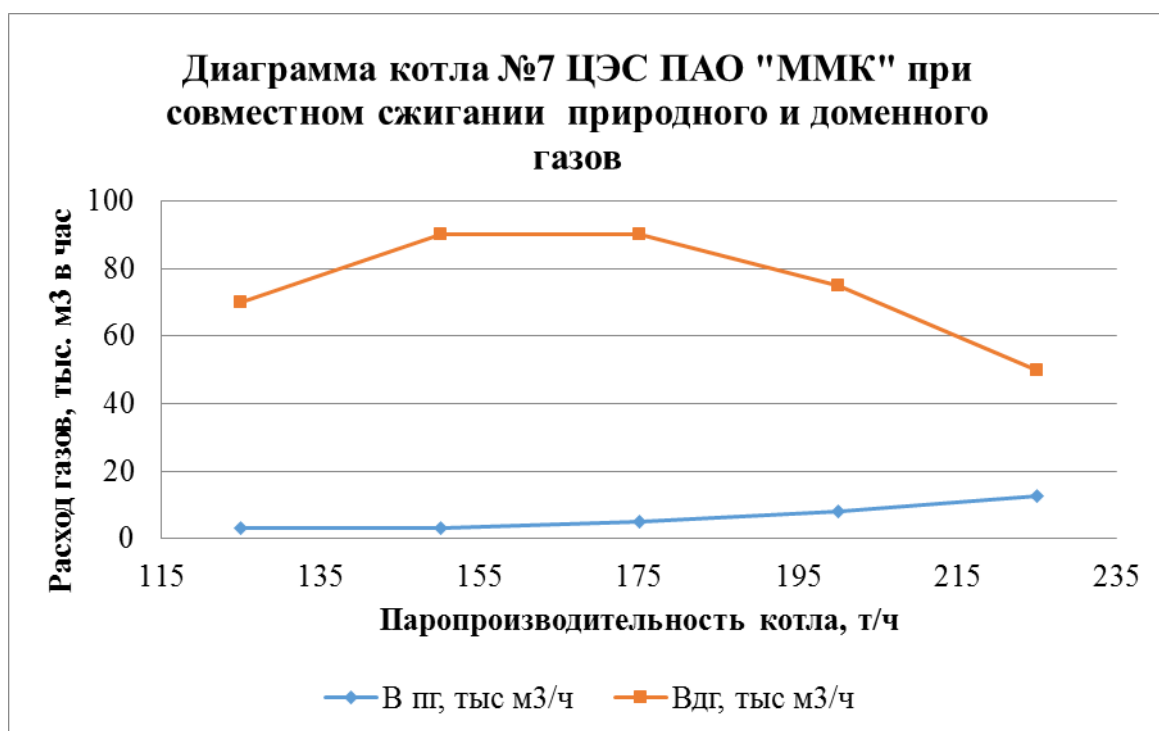


Рис. 2.4

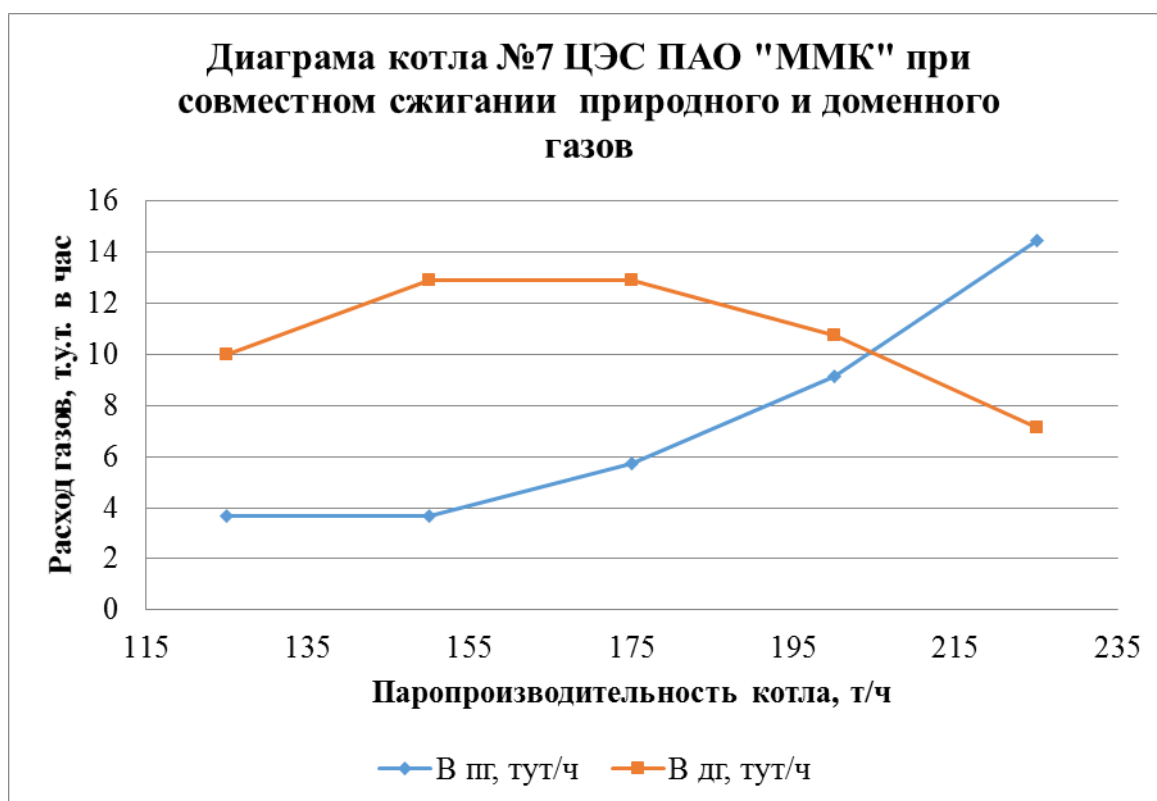


Рис. 2.5

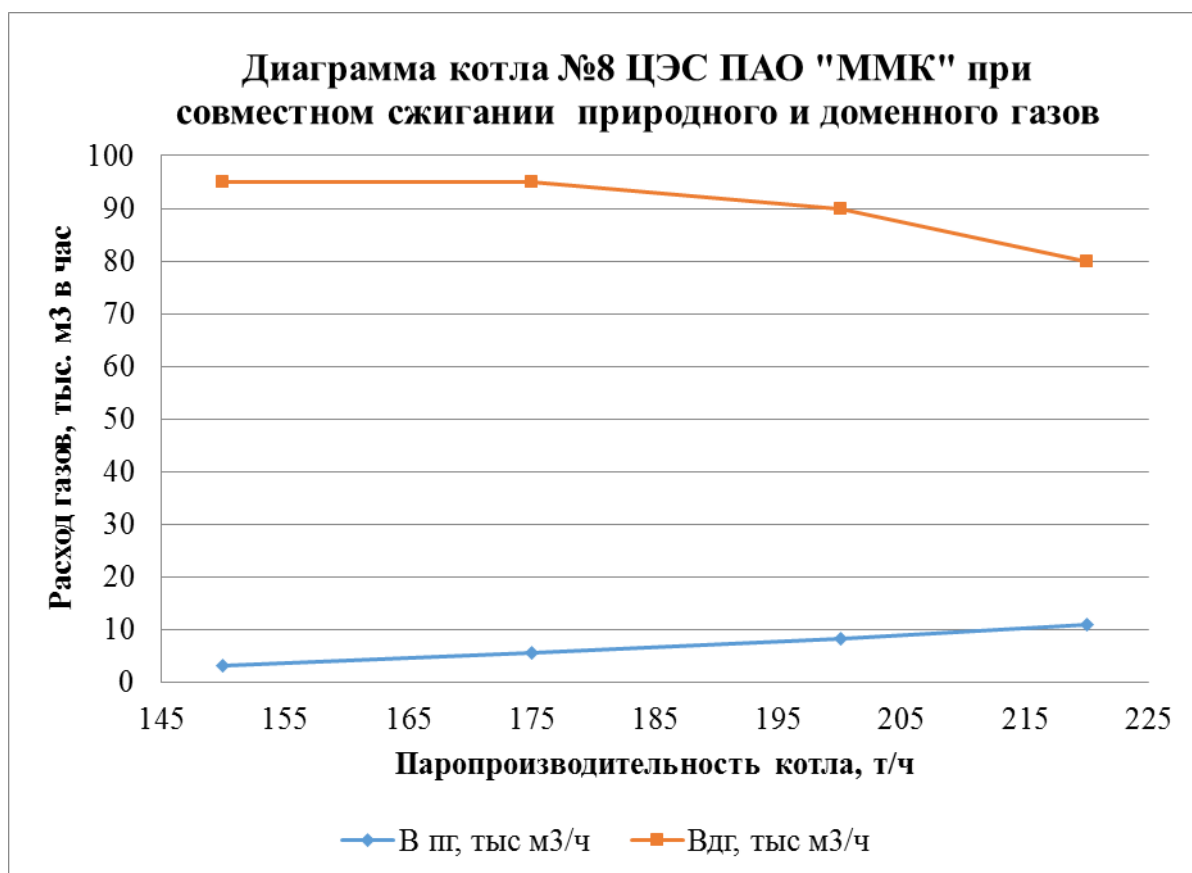


Рис. 2.6

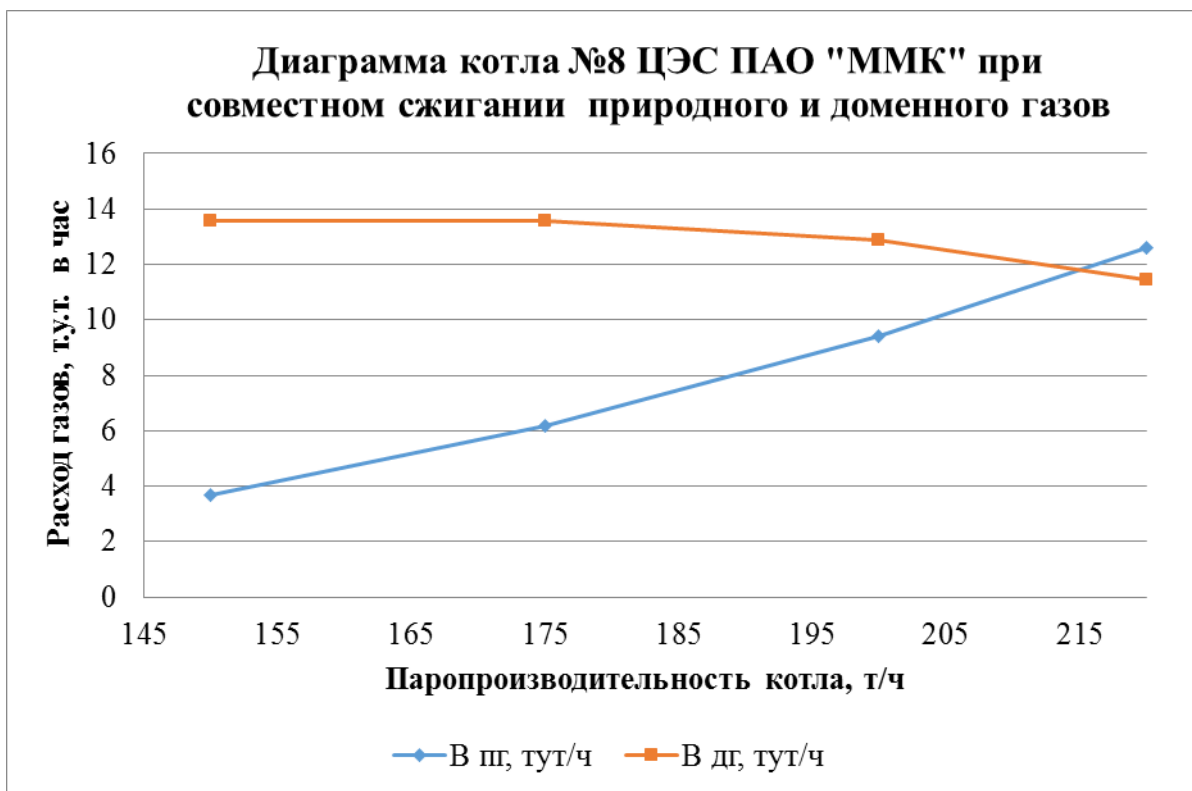


Рис. 2.7

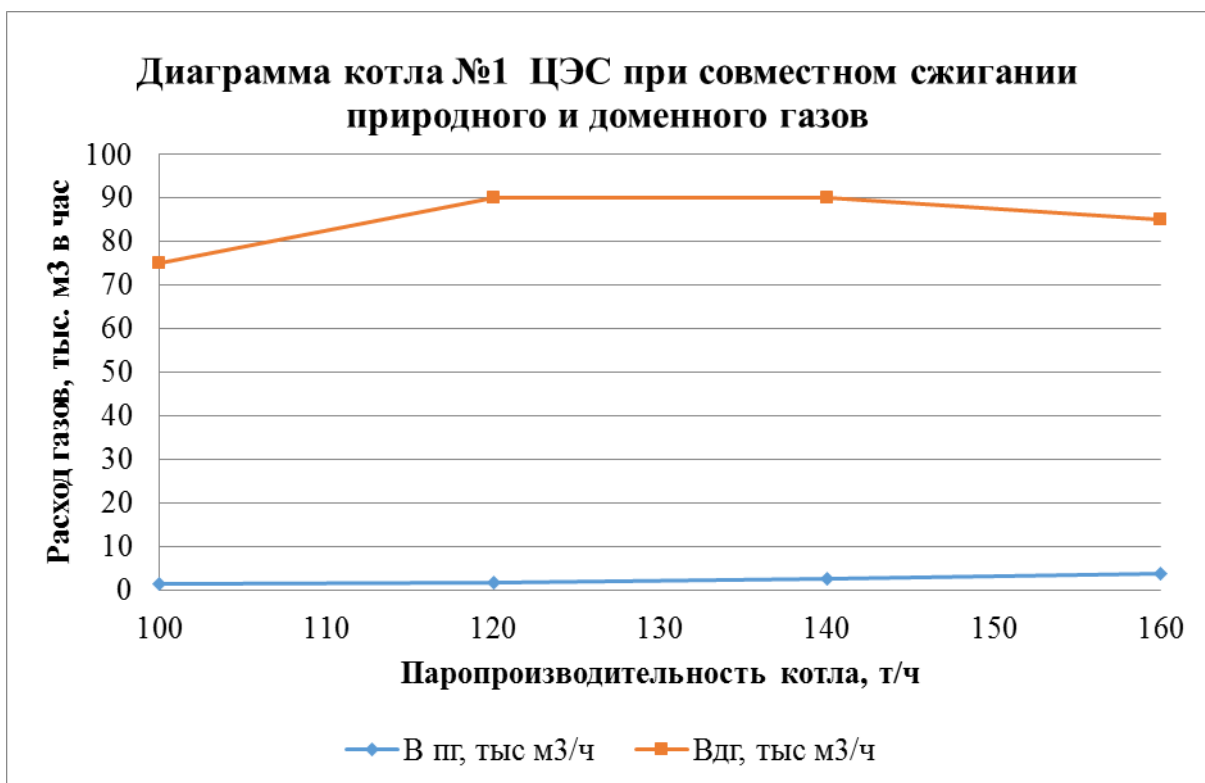


Рис. 2.8

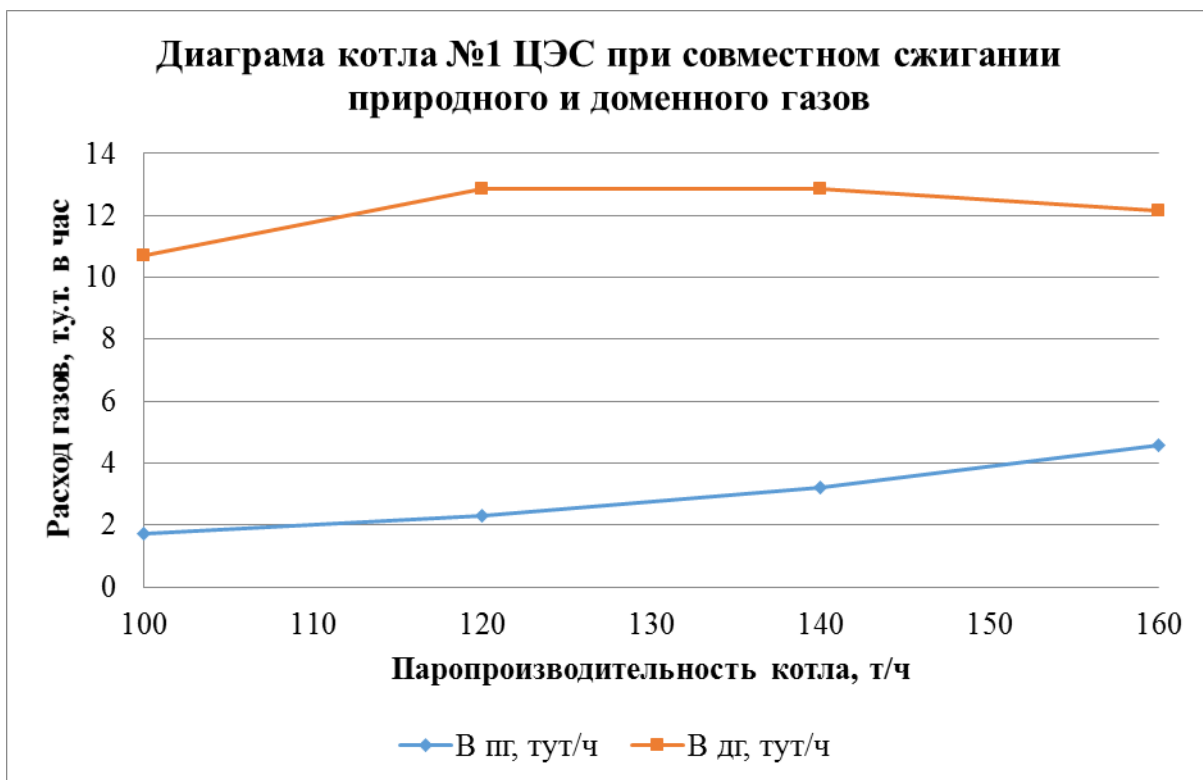


Рис. 2.9

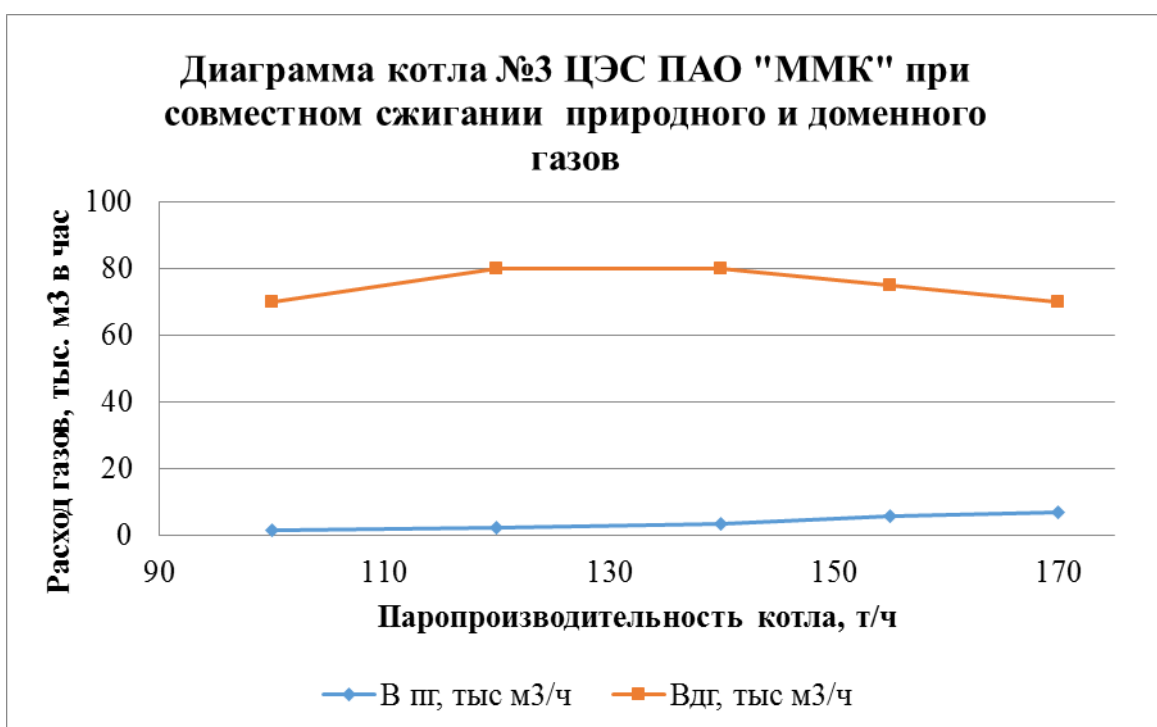


Рис. 2.10

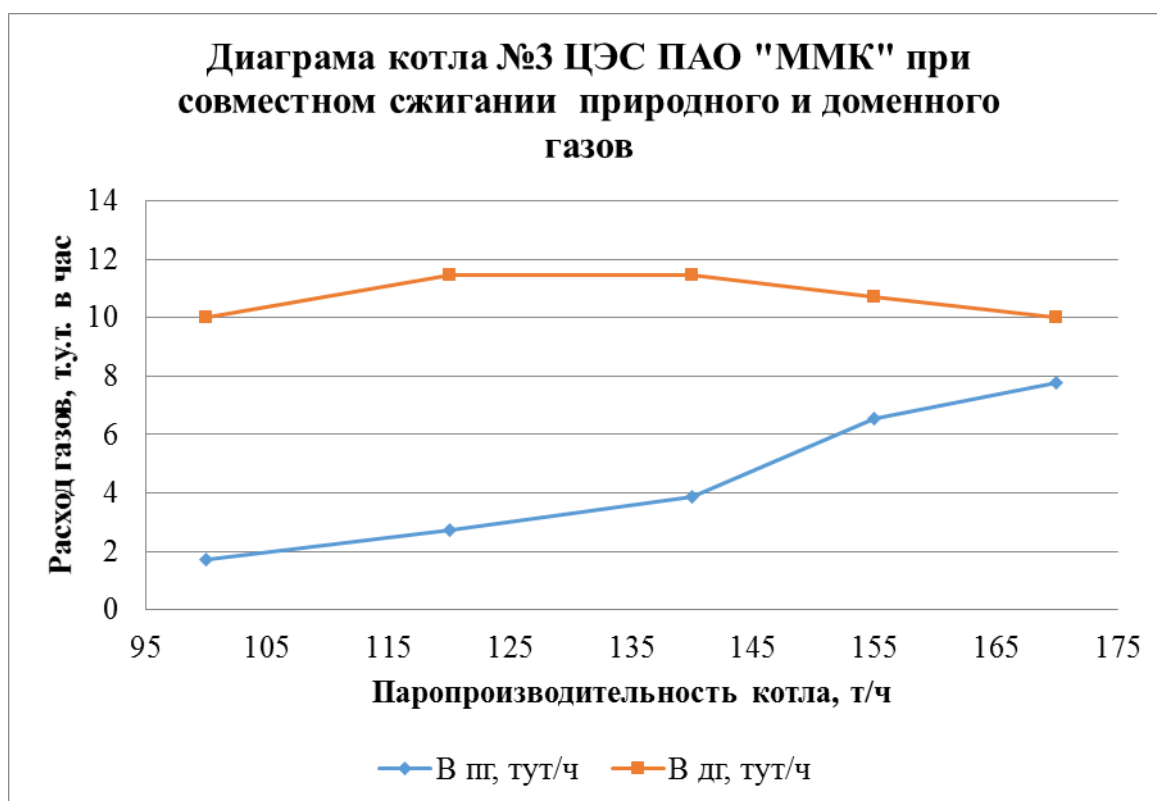


Рис. 2.11

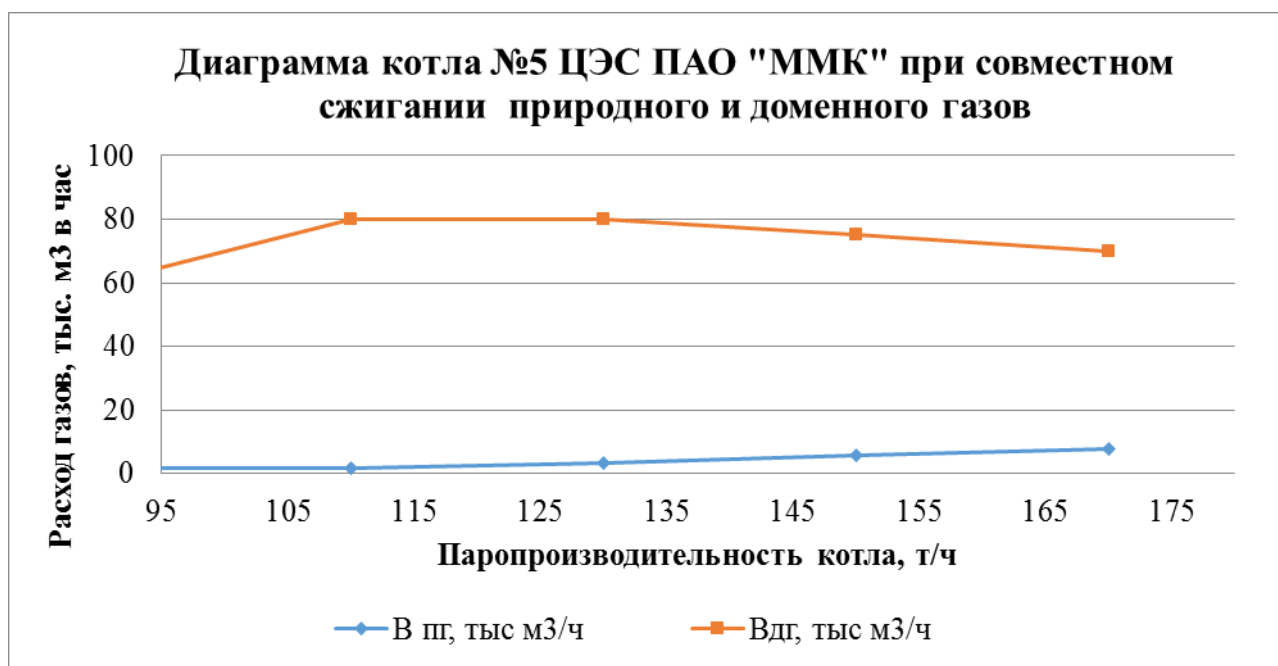


Рис. 2.12

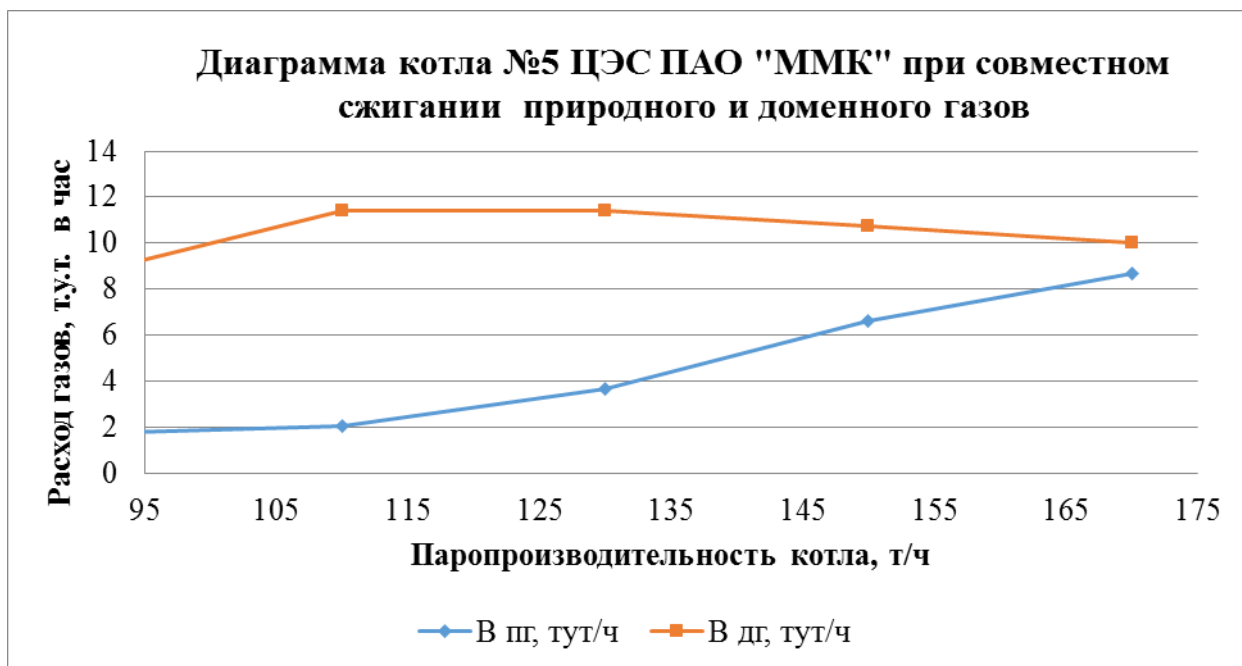


Рис. 2.13

2.3. Системный анализ задач управления энергетической эффективностью энергометаллургических технологических комплексов с использованием концепции энергосберегающей станции

В работе проведен системный анализ задач повышения эффективности энергометаллургического комплекса. В общем, на объем потребляемого ПГ оказывает влияние объем выработки котлами перегретого пара, объем потребляемого доменного газа, КПД котлов. С другой стороны, значение объема потребления ПГ является следствием решения общей обратной задачи ($\min_{\text{пг}}$). Кроме того, изменение потребления ПГ влияет на повышение коэффициента полезного действия ЭК [28, 29].

Выработка перегретого пара, в соответствии с диаграммами (рис. 2.2-2.13) имеет в общем случае нелинейную экстремальную зависимость от величины потребления ДГ и может характеризоваться как ростом (+), так и снижением (–) потребления ДГ. Задача максимального использования доменного газа обуславливает необходимость решения задачи минимизации сжигания ДГ в атмосфере через свечу и задачей минимизации расхода потребления кокса в доменном цехе металлургического производства.

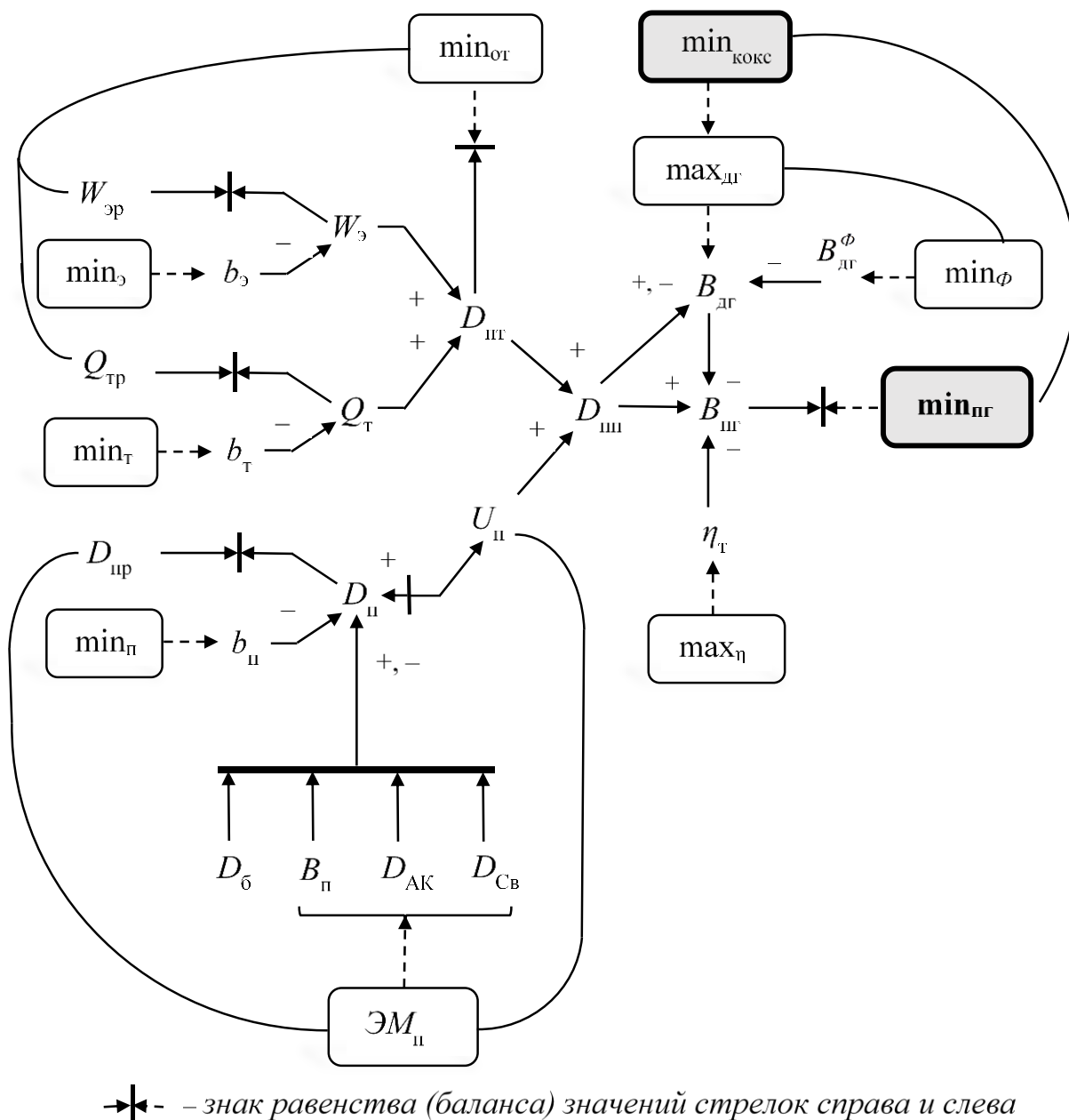


Рис. 2.14. Диаграмма связи задач повышения эффективности энергометаллургического комплекса

$B_{\text{пг}}$ – объем потребляемого природного газа, $D_{\text{шп}}$ – объем выработки котлами перегретого пара $B_{\text{дг}}$ – объем потребляемого доменного газа, $\eta_{\text{т}}$ – КПД котлов, $B_{\text{дг}}^{\phi}$ – потери на свече доменного газа; **min_{пг}** – задача минимизации потребления природного газа, **max_{дг}** – задача максимального потребления доменного газа, **max_η** – задача повышения КПД котлов, **min_φ** – задача снижения потерь на свече, **min_{от}** – снижение пара, потребляемого турбогенераторами $D_{\text{пт}}$; **min_{кокс}** – задача минимизации потребления кокса.

На расчетные объемы выработки электрической $W_{\text{эп}}$ и тепловой энергии $Q_{\text{тр}}$, пара $D_{\text{пр}}$ оказывают существенное влияние задачи **min_э**, **min_т**, **min_п** снижения энергоемкостей $b_{\text{э}}$, $b_{\text{т}}$, $b_{\text{п}}$ потребителей электрической и тепловой энергии, а также пара соответственно, $D_{\text{пт}}$ – объем пара, потребляемого турбогенераторами, $U_{\text{п}}$ – объема пара, отбираемого для регулирования общей подачи пара на технологические нужды. Общий объем пара на технологию $D_{\text{п}}$ определяется базовым источником пара в объеме $D_{\text{б}}$; $D_{\text{ак}}$ – паровой поток с паровых аккумуляторов. С целью энергосбережения в паровую сеть дополнительно подается пар вторичных источников $B_{\text{п}}$. $D_{\text{св}}$ – расход избыточного пара через свечу

Количество перегретого пара, вырабатываемого ЭК, потребляется ТГ для выработки ЭЭ и ТЭ и другими различными технологическими потребителями металлургического комплекса.

Локальная задача снижения количества перегретого пара, потребляемого ТГ взаимосвязана с решением задач обеспечения необходимых объемов выработки тепловой и электрической энергии.

Для решения задачи стабилизации технологических параметров перегретого пара в паровой сети, в которую для экономии энергетических ресурсов дополнительно подается пар вторичных источников B_n , используются паровые аккумуляторы. Излишки технологического пара используются на буферной электростанции (БЭСТ) для максимальной генерации электрической энергии. Сброс избыточного пара осуществляется через свечи в атмосферу. Все рассмотренные задачи взаимосвязаны и описывают обобщенную систему энергоменеджмента паровой сети.

Помимо этого, задача энергоменеджмента паровой сети теплоэнергетического комплекса связана с эффективностью ведения доменного процесса. Оптимизация доменного процесса по критерию минимизации потребления кокса влечет за собой также снижение потребляемого дутья на ПВЭС и оптимизации дутья на ПВЭС приводит к снижению потребления первичного энергетического ресурса природного газа.

На рисунке 2.14 приведены все представленные задачи, обеспечивающие интегрированное управления эффективностью энерготехнологического комплекса металлургического производства. Интегральный эффект от решения задач определяется снижением потребления ПГ, как первичного покупного ресурса. Системный анализ связей между реальными потоками энергетических ресурсов и потоков сбереженных ресурсов является центральным вопросом получения интегрального эффекта энергосбережения в теплоэнергетическом комплексе.

2.4 Системный анализ потоков энергетических ресурсов

Современные средства автоматизации управления технологическими процессами имеют многоуровневую структуру, соответственно:

- на базовом уровне средств автоматизации выполняются функции приборного контроля и автоматического регулирования режимных параметров;
- на уровне оперативного управления решаются задачи контроля и автоматизированного управления режимными параметрами;
- на более высоком технико-экономическом уровне решаются задачи мониторинга и планирования технико-экономических показателей процессов.

На технико-экономическом уровне управления сложными энерготехнологическими комплексами одной из базовых задач является проведение системного анализа потоков энергетических ресурсов с целью оценки энергетической эффективности технологических процессов и разработки мероприятий по снижению энергоемкости производства.

Рассматриваемый в данной работе подход состоит в следующем.

Все энергетические и технологические объекты представляются в виде энергетических и технологических узлов, преобразующих и потребляющих энергетические ресурсы (ЭР).

Преобразование потоков ЭР в энергетических узлах описывается соотношением (2.1):

$$u_{\text{вых}} = K_{\text{э}}(u_{\text{эп}}, u_{\text{вэп}}; x_{\text{э}}), \quad u_{\text{вх}} = u_{\text{эп}} + u_{\text{вэп}}, \quad u_{\text{вых}} = \sum_i u_i. \quad (2.1)$$

Здесь $u_{\text{эп}}$ – входной поток основных рабочих ЭР, потребляемых энергетическим узлом;

$u_{\text{вэп}}$ – входной поток вторичных энергетических ресурсов;

$u_{\text{вх}}$ – входной поток ЭР, потребляемый энергетическим узлом;

$u_{\text{вых}}$ – выходной поток ЭР, производимый энергетическим узлом и распределяемый частными потоками u_i соответствующим потребителям;

$x_{\text{э}}$ – вектор режимных параметров энергетического узла;

$K_{\text{э}}(u_{\text{эр}}, u_{\text{вэр}}; x_{\text{э}})$ – нелинейная функция аргументов $u_{\text{эр}}, u_{\text{вэр}}, x_{\text{э}}$, характеризующая передаточные свойства энергетического узла.

Энергетическая эффективность узла определяется с использованием показателя КПД. С учетом соотношения (2.1) КПД узла может быть определено формулой:

$$\eta_{\text{э}} = \frac{u_{\text{вых}}}{u_{\text{вх}}} = \frac{K_{\text{э}}(u_{\text{эр}}, u_{\text{вэр}}; x_{\text{э}})}{u_{\text{эр}} + u_{\text{вэр}}}. \quad (2.2)$$

Из формулы (2.2) следует

$$u_{\text{вых}} = \eta_{\text{э}}(u_{\text{эр}}, u_{\text{вэр}}; x_{\text{э}})u_{\text{вх}}. \quad (2.3)$$

Потери ЭР в энергетическом узле оцениваются формулой:

$$u_{\text{пот}} = (\eta_{\text{opt}} - \eta_{\text{э}})u_{\text{вх}}. \quad (2.4)$$

Здесь η_{opt} – оптимальное значение КПД, $\eta_{\text{э}}$ – текущее значение КПД.

Графическое изображение энергетического узла с учетом соотношения (2.3) представлено на рис. 2.15.

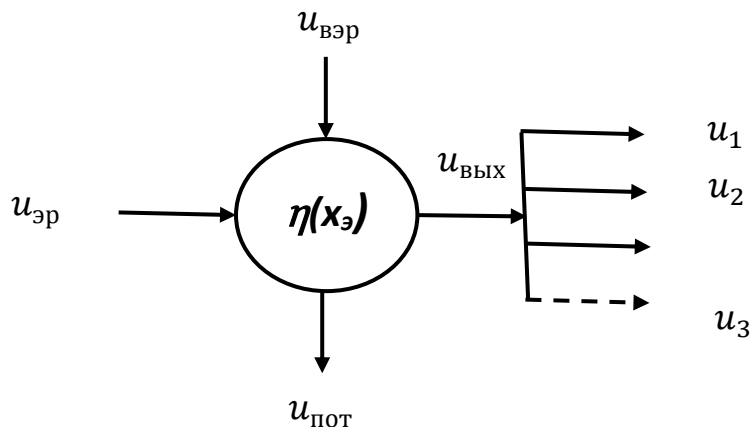


Рис. 2.15. Схема потоков ЭР энергетического узла

Преобразование потоков ЭР в технологических узлах описывается обратным соотношением:

$$u_{\text{эр}} = F_{\text{т}}(p_{\text{вых}}, u_{\text{вэр}}; x_{\text{т}}), \quad u_{\text{вх}} = u_{\text{эр}} + u_{\text{вэр}}, \quad p_{\text{вых}} = \sum_i p_i. \quad (2.5)$$

Здесь $u_{\text{эр}}$ – поток основных рабочих ЭР, потребляемых технологическим узлом;

$u_{\text{вэр}}$ – входной поток вторичных энергетических ресурсов;

$u_{\text{вх}}$ – входной суммарный поток ЭР, потребляемый технологическим узлом;

$p_{\text{вых}}$ – поток продукции, производимый энергетическим узлом и распределяемый частными потоками p_i соответствующим потребителям;

$x_{\text{т}}$ – вектор режимных параметров технологического узла;

$F_{\text{т}}(p_{\text{вых}}, u_{\text{вэр}}; x_{\text{т}})$ – нелинейная функция аргументов $p_{\text{вых}}, u_{\text{вэр}}, x_{\text{т}}$, характеризующая энергетические свойства технологического узла.

Энергетическая эффективность технологического узла определяется, как правило, с использованием показателя энергоёмкости. С учетом соотношения (2.5) энергоёмкость технологического узла может быть определена формулой

$$b_{\text{т}} = \frac{u_{\text{вх}}}{p_{\text{вых}}} = \frac{F_{\text{т}}(p_{\text{вых}}, u_{\text{вэр}}; x_{\text{т}}) + u_{\text{вэр}}}{p_{\text{вых}}}. \quad (2.6)$$

Из формулы (2.6) следует:

$$u_{\text{вх}} = b_{\text{т}}(p_{\text{вых}}, u_{\text{вэр}}; x_{\text{т}})p_{\text{вых}}. \quad (2.7)$$

Потери ЭР в технологическом узле оцениваются формулой:

$$u_{\text{пот}} = (b_{\text{т}} - b_{\text{opt}})p_{\text{вых}}. \quad (2.8)$$

Графическое изображение технологического узла с учетом соотношения (2.7) представлено на рис. 2.16.

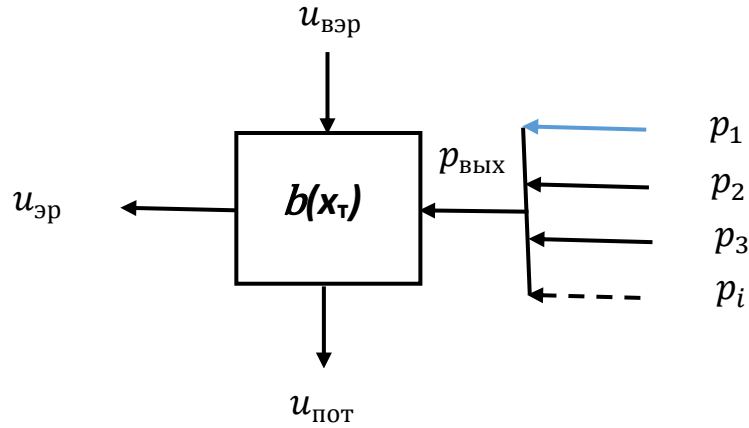


Рис. 2.16. Схема потоков ЭР технологического узла

Энергетические потоки в энерготехнологическом комплексе в целом представляют собой сеть взаимосвязанных энергетических и технологических узлов. Система уравнений, описывающая потоки в указанной энерготехнологической сети, представляется следующими уравнениями.

Уравнения энергетических узлов:

$$u_{\text{вых},i} = \eta_{\text{э},i}(u_{\text{эр},i} + u_{\text{вэр},i}), \quad (2.9a)$$

$$u_{\text{пот},i} = (\eta_{\text{опт},i} - \eta_{\text{э},i})(u_{\text{эр},i} + u_{\text{вэр},i}), \quad (2.9b)$$

$$\eta_{\text{э},i} = \frac{K_{\text{э},i}(u_{\text{эр},i}, u_{\text{вэр},i}; x_{\text{э},i})}{u_{\text{эр},i} + u_{\text{вэр},i}}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (2.9c)$$

Уравнения технологических узлов:

$$u_{\text{вх},j} = b_{\text{т},j} p_{\text{вых},j}, \quad (2.10a)$$

$$u_{\text{пот},j} = (b_{\text{т},l} - b_{\text{опт},j}) p_{\text{вых},j}, \quad (2.10b)$$

$$b_{\text{т},j} = \frac{F_{\text{т},j}(p_{\text{вых},j}, u_{\text{вэр},j}; x_{\text{т},j}) + u_{\text{вэр},j}}{p_{\text{вых},j}}, \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (2.10c)$$

Уравнения технологических связей:

$$M_{IK} = \{(i \rightarrow k): u_{\text{эр},k} = u_{\text{вых},i}\}, \quad i, k \in I_{\text{эу}}; \quad (2.11a)$$

$$M_{KJ} = \{(k \rightarrow j): u_{\text{вх},j} = u_{\text{вых},k}\}, \quad j \in I_{\text{ту}}. \quad (2.11b)$$

Здесь $I_{\text{эу}}, I_{\text{ту}}$ – множества значений индексов энергетических и технологических узлов соответственно.

При расчетах энергетических потоков в сетях в задачах энергосбережения наряду с соотношениями (2.1), описывающими прямые энергетические потоки в энергетических узлах сетевых моделей, целесообразно использовать соотношения, описывающие обратные связи входных потоков с выходными:

$$u_{\text{вх}} = H_{\text{э}}(u_{\text{вых}}, u_{\text{вэр}}; \mathbf{x}_{\text{э}}), \quad u_{\text{вых}} = \sum_i u_i. \quad (2.12)$$

По аналогии с технологическими узлами здесь также можно ввести понятие энергоемкости, но уже для энергетического узла:

$$b_{\text{э}} = \frac{u_{\text{эр}}}{u_{\text{вых}}} = \frac{H_{\text{э}}(u_{\text{вых}}, u_{\text{вэр}}; \mathbf{x}_{\text{т}})}{u_{\text{вых}}}. \quad (2.13)$$

Из формулы (2.13) следует

$$u_{\text{вх}} = b_{\text{э}}(u_{\text{вых}}, u_{\text{вэр}}; \mathbf{x}_{\text{т}})u_{\text{вых}}. \quad (2.14)$$

Потери ЭР в энергетическом узле оцениваются формулой

$$\Delta u_{\text{пот}} = (b_{\text{э}} - b_{\text{opt}})u_{\text{вых}}. \quad (2.15)$$

Графическое изображение энергетического узла в модели обратной ориентации представлено на рис. 2.17.

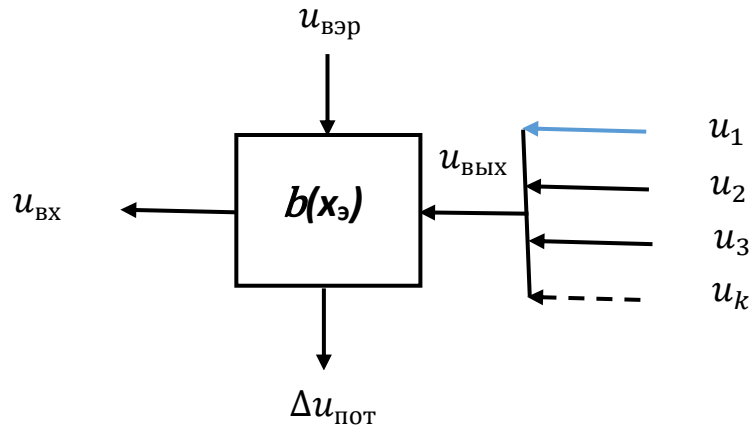


Рис. 2.17. Схема обратных потоков ЭР энергетического узла

В сумме уравнения (2.9)–(2.15) описывают потоки ЭР в энерготехнологической сети. Совместное решение указанных уравнений при заданных значениях исходных данных позволяет рассчитать потоки ЭР в данной сети.

Проблемным вопросом расчета модели энерготехнологической сети (2.9)–(2.11) является определение на основе экспериментальных данных зависимостей типа:

$$u_{\text{вых}} = K_{\text{э}}(u_{\text{эр}}, u_{\text{вэр}}; x_{\text{э}}), \quad (2.16a)$$

$$u_{\text{эр}} = F_{\text{т}}(p_{\text{вых}}, u_{\text{вэр}}; x_{\text{т}}), \quad (2.16b)$$

$$u_{\text{вх}} = H_{\text{э}}(u_{\text{вых}}, u_{\text{вэр}}; x_{\text{э}}). \quad (2.16c)$$

В общем случае здесь можно использовать самые разнообразные методы, включая нейронные сети. Ниже приводится достаточно простой метод, основанный на физических соображениях.

Прежде всего обратим внимание, что для каждого технического объекта, как правило, в технологических инструкциях прописывается номинальный режим работы, который характеризуется номинальными значениями режимных параметров. В отсутствии их в качестве номинальных можно выбрать средние

эксплуатационные значения. В этом случае, чтобы рассматривать свойства объектов в рабочих режимах, уравнения (2.16) целесообразно записывать в отклонениях параметров от номинальных значений, например, в следующем виде:

$$\Delta u_{\text{вых}} = k_{\text{э}}(\Delta u_{\text{эр}}, \Delta u_{\text{вэр}}; x_{\text{э}}), \quad (2.17a)$$

$$\Delta u_{\text{эр}} = f_{\text{т}}(\Delta p_{\text{вых}}, \Delta u_{\text{вэр}}; x_{\text{т}}); \quad (2.17b)$$

$$\Delta u_{\text{вх}} = H_{\text{э}}(\Delta u_{\text{вых}}, \Delta u_{\text{вэр}}; x_{\text{э}}); \quad (2.17c)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta u_{\text{вых}} &= u_{\text{вых}} - u_{\text{вых,н}}, & \Delta u_{\text{эр}} &= u_{\text{эр}} - u_{\text{эр,н}}, \\ \Delta u_{\text{вэр}} &= u_{\text{вэр}} - u_{\text{вэр,н}}, & \Delta p_{\text{вых}} &= p_{\text{вых}} - p_{\text{вых,н}}, \\ \Delta u_{\text{вх}} &= u_{\text{вх}} - u_{\text{вх,н}}. \end{aligned}$$

Рабочие режимы объектов, связанные с параметрами режимов $x_{\text{э}}$, $x_{\text{т}}$, являются специфичными для каждого типа объектов, поэтому мы их здесь рассматривать не будем, а сосредоточимся на энергетических характеристиках.

При рассмотрении энергетических узлов важным является то, что КПД энергетических узлов, как правило, имеет экстремальное значение внутри рабочей области. Точная зависимость КПД от входного потока ЭР в общем случае является неизвестной, поэтому здесь целесообразно строить аппроксимации зависимостей на основе экспериментальных данных.

На рис. 2.18 приводится общая картина зависимости КПД энергетического узла от величины входного энергетического потока с использованием введенных отклонений величин от номинальных значений. Из рассмотрения рисунка 2.18 видно, что зона допустимого значения КПД лежит в диапазоне значений входного энергетического потока $[\Delta u_{\text{вх,min}}, \Delta u_{\text{вх,max}}]$. В данном диапазоне лежат также значения номинального входного потока $u_{\text{вх,н}}$ и оптимального потока $\Delta u_{\text{вх,opt}}$.

Аппроксимацию зависимости КПД от входного энергетического потока в диапазоне допустимых значений КПД целесообразно выполнять с помощью квадратичной функции:

$$\Delta\eta_{\varepsilon} = \eta_{\varepsilon} - \eta_{\varepsilon H}, \quad \Delta\eta_{\varepsilon} = \Delta\eta_{\varepsilon 0} + a(\Delta u_{\text{BX}} - \Delta u_{\text{BX,opt}})^2. \quad (2.18)$$

В итоге

$$\Delta u_{\text{ВЫХ}} \approx \Delta\eta_{\varepsilon} u_{\text{BX}} = (\Delta\eta_{\varepsilon 0} + a(u_{\text{BX}} - u_{\text{BX,opt}})^2) u_{\text{BX}}. \quad (2.19)$$

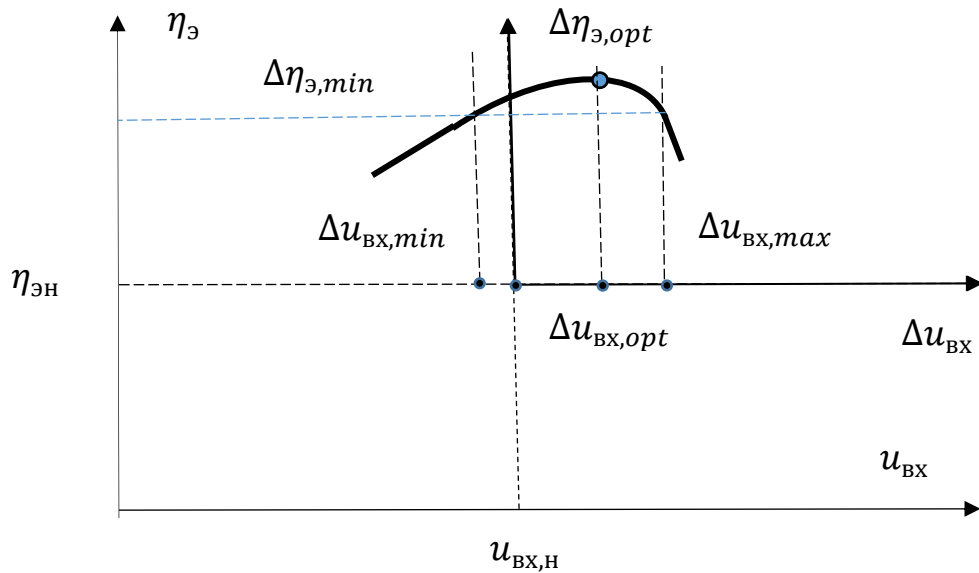


Рис. 2.18. Общий вид зависимости КПД энергетического узла от величины входного энергетического потока

В полиномиальном виде выражение (2.19) имеет вид:

$$\Delta u_{\text{ВЫХ}} = a_1 u_{\text{BX}} + a_2 (u_{\text{BX}})^2 + a_3 (u_{\text{BX}})^3. \quad (2.20)$$

Полином (2.20) может быть определен на основе статистической обработки данных эксплуатации. Сравнение коэффициентов выражений (2.19), (2.20) дает следующие равенства:

$$a = a_3, \quad u_{\text{BX,opt}} = -a_2/2a, \quad \Delta\eta_{\varepsilon 0} = a_1 - a u_{\text{BX,opt}}.$$

В более общем случае выражение (20) имеет вид

$$\Delta u_{\text{вых}} = a_0 + a_1 u_{\text{вх}} + a_2 (u_{\text{вх}})^2 + a_3 (u_{\text{вх}})^3. \quad (2.21)$$

Тогда выражение для приращения КПД будет иметь дополнительную составляющую:

$$\Delta \eta_{\text{э}} = \Delta \eta_{\text{э0}} + a(u_{\text{вх}} - u_{\text{вх,opt}})^2 + \frac{a_0}{u_{\text{вх}}}. \quad (2.22)$$

По аналогии для моделей технологических узлов и моделей энергетических узлов обратной ориентации будут справедливы соотношения:

$$\Delta b_{\text{т}} = \Delta b_{\text{т0}} + a_{\text{т}}(u_{\text{вых}} - u_{\text{вых,opt}})^2 + \frac{a_{0\text{т}}}{u_{\text{вых}}}. \quad (2.23a)$$

$$\Delta b_{\text{э}} = \Delta b_{\text{э0}} + a_{\text{э}}(u_{\text{вых}} - u_{\text{вых,opt}})^2 + \frac{a_{0\text{э}}}{u_{\text{вых}}}. \quad (2.23b)$$

Разница для технологических узлов по сравнению с энергетическими узлами состоит в том, что для энергетических узлов ставится задача достижения максимума КПД, тогда как для технологических узлов ставится обратная задача – достижения минимума энергоемкости.

Что касается участков характеристик КПД и энергоемкостей, лежащих вне допустимых значений, то с точки зрения энергосбережения функционирование энерготехнологического комплекса в указанных зонах является низкоэффективным. В этом случае стоит задача настройки энергетических и технологических узлов по критерию энергетической эффективности. Для решения задач настройки нет необходимости использовать усложненные квадратичные модели объектов настройки, достаточно применение линейных моделей.

В этой связи на участках:

$$\Delta u_{\text{вх}} \notin [\Delta u_{\text{вх,min}}, \Delta u_{\text{вх,max}}], \quad (2.24)$$

модельные соотношения будут иметь вид

$$\eta_{\varepsilon,k} = \eta_{\varepsilon,k-1} + \frac{\Delta\eta_{\varepsilon,k-1}}{\Delta u_{\text{вх},k-1}} \Delta u_{\text{вх},k}, \quad (2.25a)$$

$$b_{\varepsilon,k} = b_{\varepsilon,k-1} + \frac{\Delta b_{\varepsilon,k-1}}{\Delta u_{\text{вых},k-1}} \Delta u_{\text{вых},k}. \quad (2.25b)$$

Квадратичные и линейные модели строятся на разных обучающих выборках данных. Квадратичные модели строятся на обучающих данных, которые принадлежат области допустимых значений энергетических потоков, в то время как линейные модели строятся на обучающих данных, которые выходят за пределы допустимых значений показателей энергетической эффективности. По этой причине в точках, где эти модели сходятся, могут быть нестыковки их значений. Данный недостаток можно избежать, если в точках стыковок моделей в качестве принятых считать те значения, которые дают квадратичные модели, как более точные. В этом случае в линейных выражениях (2.25) неизвестными являются лишь коэффициенты наклона характеристик (первые производные), что значительно упрощает решение задачи идентификации линейных моделей.

В соответствии с приведенными модельными представлениями, рассмотрим формальную постановку задачи оптимизации энергетического баланса потоков в сети по критериям энергетической эффективности.

Предположим, что дано множество I_y энергетических и технологических узлов, пронумерованных по индексу i :

$$\{i \in I_y : i = 1, 2, \dots, n\}. \quad (2.26)$$

Каждый i -ый узел характеризуется входным потоком ЭР

$$\{u_i : i = 1, 2, \dots, n\}. \quad (2.27)$$

Выходной поток ЭР $u_{\text{вых},i}$ для каждого i -го узла представляет собой сумму частных потоков u_j :

$$u_{\text{вых},i} = \sum_{j \in J_i} u_j, \quad (2.28)$$

где J_i – множество индексов j частных выходящих потоков u_j из i -го узла.

Каждый i -ый узел характеризуется нелинейной функцией энергоемкости:

$$u_i = b_i(u_{\text{вых},i}, u_{\text{вэр}}, x_i) u_{\text{вых},i}. \quad (2.29)$$

Положим, что связи узлов носят характер древовидной многоярусной структуры. Такая структура связей может быть описана упорядоченным множеством значений индексов узлов, соединенных между собой бинарной связью:

$$(I_1, J_{2,i}) \rightarrow (I_2, J_{3,i}) \rightarrow (I_3, J_{4,i}) \rightarrow \dots \rightarrow (I_{m-1}, J_{m,i}), \quad (2.30)$$

где I_l – множество значений индекса i узлов l -ого яруса, которые характеризуются своими входными потоками u_i (2.27), $J_{l+1,i}$ – множества значений индексов узлов яруса $l+1$, которые соединены потоками с i -ми узлами l -ого яруса, и для каждого i -го узла определяют для него множество частных исходящих потоков u_j , в сумме составляющих для i -го узла выходной поток $u_{\text{вых},i}$ (2.28).

В совокупности соотношения (2.26)–(2.30) определяют модельные соотношения для расчета потоков в рассматриваемой энерготехнологической сети. Расчет ведется последовательно, начиная с конечных узлов сети до первичных узлов включительно. Данная последовательность хода вычислений является обратной физическому направлению потоков в сети. Такая последовательность позволяет оценить влияние изменений энергоемкости узлов сети на общую ее эффективность.

При этом потери ЭР в сети оцениваются общей суммой потерь в узлах сети с использованием базовой формулы (2.8)

$$u_{\text{пот}}^c = \sum_{i \in I_y} (b_i(u_{\text{вых},i}, u_{\text{вэр}}; x_i) - b_{i,\text{opt}}) u_{\text{вых},i}. \quad (2.31)$$

Ставится задача: определить значения режимных переменных $\{x_i\}$, исходя из условия минимума суммарных потерь в сети $u_{\text{пот}}^c$. Данная задача может быть решена с использованием модели (2.26)–(2.30) на основе поисковых методов оптимизации. Решение данной задачи составляет одну из процедур формализованного подхода к решению задачи интегрированного планирования ресурсов в энерготехнологическом комплексе.

В общем случае формальное решение задачи оптимизации потоков энергетических ресурсов для реальных энерготехнологических комплексов служит отправной точкой анализа полученного решения с учетом реальных производственных условий. При этом учет реальных производственных условий может потребовать корректировки полученного решения и повторения формального решения с учетом новых данных. Другими словами, реальная процедура принятия решения должна быть интерактивной.

Другим требованием к рассматриваемой процедуре оптимизации является требование ее системности. Для реальных энерготехнологических комплексов системная оптимизация должна иметь многоуровневый характер и включать следующие подзадачи.

На уровне всей энерготехнологической сети должны решаться задачи энергетического баланса, когда все энергетические потоки, выходящие из энергоузлов и поставляемые по технологическим связям другим энергетическим и технологическим узлам сбалансированы, каждый узел имеет своих потребителей в суммарном объеме производимых ресурсов.

На локальных уровнях должны решаться задачи повышения энергетической эффективности отдельных энергетических и технологических узлов. Решение локальных задач вызывает дисбаланс в энерготехнологической сети. Появляются свободные энергетические мощности, что определяет

соответствующий межуровневый конфликт. Так стремление повысить энергетическую эффективность на локальных уровнях требует наличия оптимальных нагрузок для энергетических узлов. Однако оптимизация на уровне потребителей, напротив, снижает нагрузки и выводит режимы работы узлов сети в неэффективную область значений режимных параметров.

Разрешение данного конфликта находится путем введения дополнительных потребителей-регуляторов, которые в силу особенностей своего технологического процесса способны нагружать переменные мощности, не ухудшая технико-экономические показатели своего производства; с указанной целью также используется продажа избыточных мощностей на рынке энергии и др.

В целом рассмотренный процесс повышения энергетической эффективности энерготехнологических комплексов представляет собой задачу интегрированного планирования энергетических ресурсов (ИПЭР).

На практике решение задачи интегрированного планирования энергетических ресурсов является во многом неформальной и решается на основе опыта и интуиции специалистов в области планирования и управления сложными энерготехнологическими комплексами. Предложенная в этом разделе формализованное решение данной задачи позволяет повысить точность ее решения на основе строгих количественных расчетов.

В общем случае, если обратиться к теории планирования и управления в сложных многостадийных системах, то с точки зрения математического программирования здесь, например, можно использовать для расчетов процедуру оптимизации энергетического баланса сети на основе принципа оптимальности Беллмана. Принцип оптимальности Беллмана с успехом используется при решении задач планирования и управления в больших технико-экономических системах, в частности, в задачах сетевого планирования.

В соответствии с принципом оптимальности Беллмана процедура оптимизации большой системы начинается с конечных целей производства. В нашем случае это конечные потребители — технологические узлы сети, которые первые подвергаются процессу оптимизации. Процедура оптимизация технологических процессов здесь с точки зрения энергетики сводится к оценкам снижения их энергоемкости. Эти оценки определяют ожидаемые объемы снижения потребностей в потреблении энергетических ресурсов от узлов более низкого уровня. Так как данные объемы снижаются, в качестве побочного эффекта можно ожидать соответствующее снижение эффективности производства энергетических ресурсов. Поэтому на данном уровне необходимо прорабатывать дополнительные варианты подъема производства для снижения издержек.

Таким образом, процесс решения задачи интегрированного планирования и управления направлен от конечных потребителей энергетических ресурсов к первичным источникам ресурсов. Последовательный процесс снижения оценочных объемов потребления ресурсов может быть наглядно представлен через потоки сбереженных ресурсов, которые противоположно направлены потокам сгенерированных ресурсов. Введение в расчеты потоков сбереженных ресурсов позволяет проследить по всей цепочке производства системное влияние процессов энергосбережения на конечные результаты энергосберегающих мероприятий в энерготехнологическом комплексе.

Конечный результат интегрированного планирования и управления энергетическими ресурсами в энерготехнологическом комплексе состоит в повышении энергетической эффективности локальных производственных участков; расширении объемов производства; оптимизации энергобаланса; снижении энергетических издержек.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 2

1. Для комплексного рассмотрения эффективного потребления энергетических ресурсов металлургическим предприятием необходимо совместно решать задачи снижения потребления природного газа на котлах Центральной электростанции; повышения эффективности технологической паровой сети; повышения эффективности доменного процесса; контроля энергоемкости металлургического производства в целом.

2. На основе концепции интегрированного планирования и управления на примере промышленной площадки ПАО «ММК» в работе проведен системный анализ целей и задач повышения эффективности энерготехнологического комплекса металлургического производства.

3. В качестве энергосберегающей станции металлургического производства в составе энерготехнологического комплекса целесообразно использовать электрическую станцию, как одно из центральных звеньев, куда сводятся все локальные эффекты от энергосберегающих мероприятий. В работе предложены структура и автоматизированной системы управления эффективностью энергосберегающей станции.

4. В целом комплекс решаемых задач для обеспечения системного эффекта энергосбережения достигается на основе применения автоматизированных систем оперативного управления, обеспечивающих:

- оптимизацию текущего КПД котлов станции-регулятора;
- максимальное потребление станцией вторичных энергетических ресурсов;
- оптимальную загрузку котельных и турбинных агрегатов станции;
- максимальную выработку электрической энергии буферной электростанцией за счет утилизации технологического пара;
- снижение выработки дутья ПВЭС и снижение потребления дутья доменным производством, за счет стабилизации режимов работы доменных печей;
- минимизацию потерь на «свечах» вторичных энергетических ресурсов (доменный газ, коксовый газ) и технологического пара.

5. Процедура решения задачи интегрированного планирования и управления направлен от конечных потребителей энергетических ресурсов к первичным источникам ресурсов. Последовательный процесс снижения оценочных объемов потребления ресурсов может быть наглядно представлен через потоки сбереженных ресурсов, которые противоположно направлены потокам сгенерированных ресурсов. Введение в расчеты потоков сбереженных ресурсов позволяет проследить по всей цепочке производства системное влияние процессов энергосбережения на конечные результаты энергосберегающих мероприятий в энерготехнологическом комплексе.

Конечный результат интегрированного планирования и управления энергетическими ресурсами в энерготехнологическом комплексе состоит в следующем:

- в повышении энергетической эффективности локальных производственных участков;
- расширении объемов производства;
- оптимизации энергобаланса;
- снижении энергетических издержек.

ГЛАВА 3. АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ СТАНЦИИ В СИСТЕМЕ ИНТЕГРИРОВАННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

3.1 Функциональные задачи ресурсосберегающей станции в системе интегрированного планирования и управления ресурсами

Функциональные задачи энергосберегающей станции в системе интегрированного планирования и управления ресурсами необходимо рассматривать в неразрывном единстве энергетические, технологические и экономические аспекты при решении задачи улучшения энергетической результативности предприятия. Необходимо проводить одновременный анализ энергетических потоков, отражаемых на схеме, материальных потоков основного производства и сбереженных ресурсов.

Основные функциональные задачи ресурсосберегающей станции в системе интегрированного планирования и управления ресурсами:

1. Основной функциональной задачей энергосберегающей станции в системе интегрированного управления энергосбережением в теплоэнергетическом комплексе металлургического производства является экономия потребления ПГ, как покупного ресурса.

2. Получение максимума маржинальной прибыли предприятия энергометаллургического комплекса предприятия.

3. Максимизация потребления доменного газа при уменьшении потребления природного газа. Потребление ПГ непосредственно зависит от объема выработки перегретого пара котлами на станциях, коэффициента полезного действия котлов и объема, потребляемого вторичного энергетического ресурса – ДГ.

4. Снижение потребления кокса доменным цехом предприятия.

5. Повышение выработки электрической энергии.

6. Минимизация энергоемкости потребителей электрической энергии.

7. Минимизация энергоемкости потребителей тепловой энергии.
8. Снижение пара, потребляемого турборенераторами.
9. Снижение себестоимости электрической энергии.
10. Управление потреблением энергетических ресурсов при условии выполнения производственной программы.
11. Оптимальное распределение объемов производства энергетических ресурсов между источниками и между агрегатами.
12. Минимизация сжигания доменного газа через свечу. Утилизация ВЭР. Выработка электроэнергии на вторичных энергетических ресурсах (доменный, коксовый, конвертерный). Сжигание доменного газа на котлах ЦЭС более эффективно, что подтверждается режимными картами работы котлов.

3.2. Оптимальное регулирование режимов ресурсосберегающей станции при утилизации доменного газа с нестабильными характеристиками и нестабильной нагрузкой

3.2.1. Задача снижения потребления природного газа на ресурсосберегающей станции за счет утилизации вторичных энергетических ресурсов

Рассмотрим задачу снижения потребления природного газа на ресурсосберегающей станции за счет утилизации вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) металлургического производства и оптимизации режимов котлов.

На рис. 3.1 приведена, для примера, диаграмма потерь доменного газа в 2013 году при сжигании его избытков на свече.

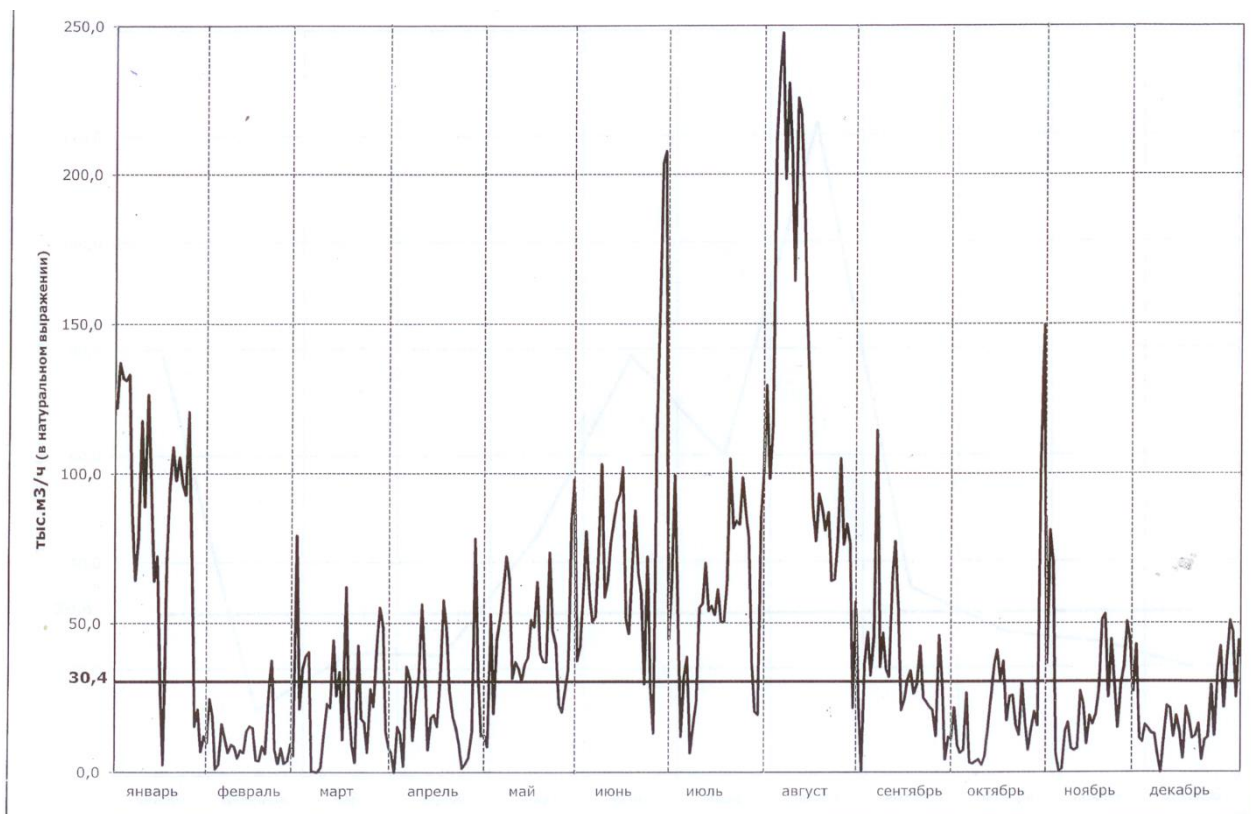


Рис. 3.1. Потери доменного газа в натуральном выражении

Повышение объемов утилизации вторичных энергетических ресурсов, например, доменного газа можно достичь за счет повышения разряжения в топке котла. В этом случае в котел принимает большее количество доменного газа. Однако резко переменное давление и низкая калорийность вторичных энергетических ресурсов, например, доменного газа, обуславливает снижение КПД котла. Для регулирования режимов работы котлоагрегата по максимуму КПД необходимо использовать экстремальное регулирование по подаче воздуха и топлива. При этом снижение потребления природного газа на котлах станции является терминальной задачей в общей схеме повышения эффективности энергетического комплекса, рассмотренного выше.

Для реализации данной схемы необходимо использовать регулирование разряжения в котле по схеме, приведенной на рисунке 3.2.

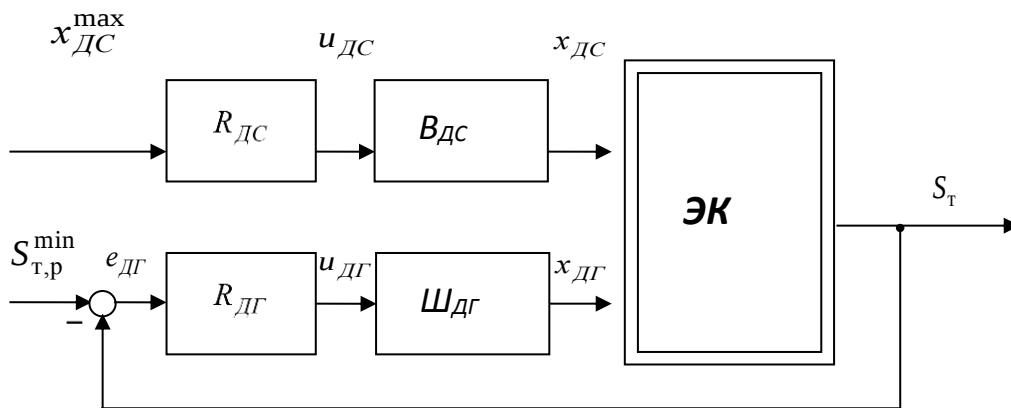


Рис. 3.2. Автоматическая система экстремального регулирования разрежения в топке котла.

Здесь ЭК – энергетический котел; $B_{ДС}$ – вентилятор дымососа; $R_{ДС}$ – регулятор дымососа; $Ш_{ДГ}$ – шиберы доменного газа; $R_{ДГ}$ – регулятор доменного газа; S_T – разрежение в топке; S_T^{min} – минимальный технологический допуск разрежения в топке котла; $u_{ДГ}$ – управляющее воздействие на шиберы доменного газа; $u_{ДС}$ – управляющее воздействие на дымосос; $x_{ДГ}$ – степень открытия шиберов доменного газа; $x_{ДС}$ – производительность дымососа.

Регулирование разрежения в котле по схеме, приведенной на рис. 3.2, осуществляется по двум каналам. Регулирование по каналу подачи ДГ осуществляется шибером ДГ ($Ш_{ДГ}$). Регулирование производительностью дымососа ($B_{ДС}$) осуществляется в ручном режиме.

Целью работы по каналу подачи ДГ является максимизация утилизации доменного газа энергетическим котлом. При увеличении потребления энергетическим котлом доменного газа падает разрежение в топке энергетического котла по причине того, что калорийность доменного газа является нестабильной величиной и намного ниже калорийности природного газа. При этом очень важным является поддержание значения разрежения в

топке энергетического котла (S_T) не ниже минимального разряжения (S_T^{min}) согласно технологическим ограничениям.

Общая структура разработанной автоматизированной системы управления экономичностью парового котла приведена на рис. 3.3.

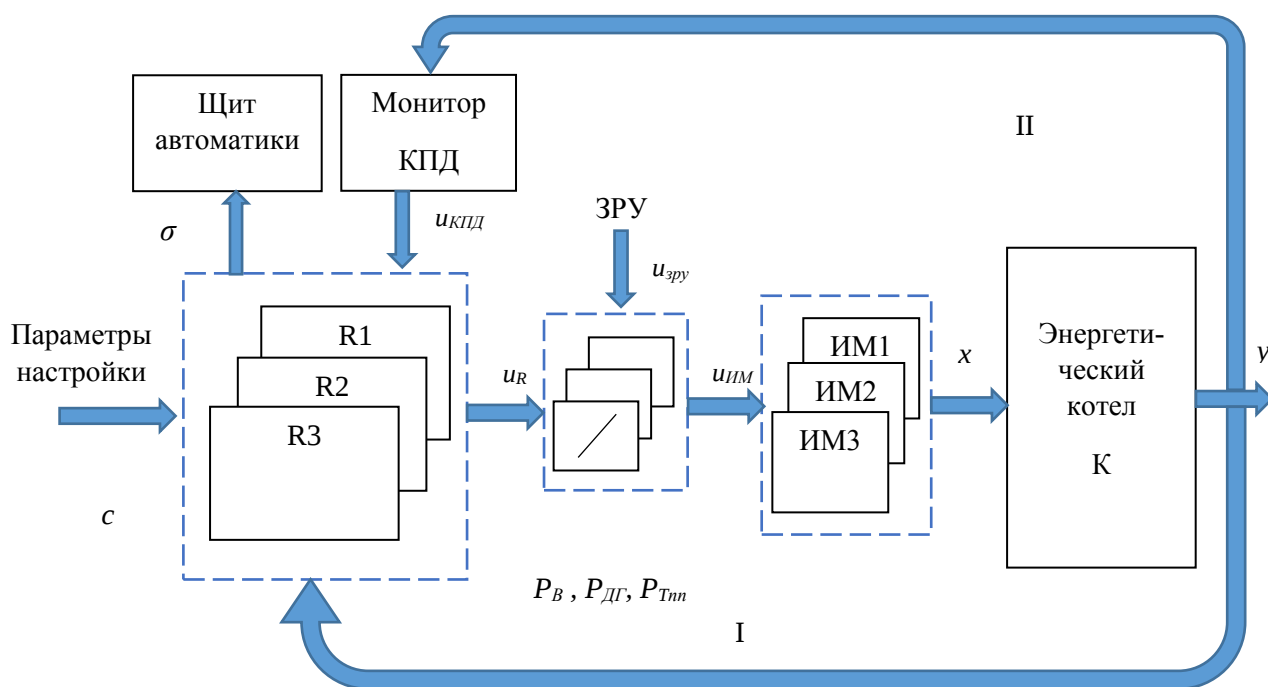


Рис. 3.3. Общая структура АСУ парового котла

Здесь К – паровой котел; $R1$, $R2$, $R3$ – корректирующие регуляторы подачи воздуха, подачи доменного газа, а также регулирования температуры перегретого пара соответственно; ИМ1, ИМ2, ИМ3 – исполнительные механизмы: шибер подачи воздуха, шибер подачи доменного газа и устройство впрыска конденсата соответственно; P_B , $P_{ДГ}$, $P_{Тnn}$ – переключатели режимов подачи воздуха, доменного газа, а также регулирования температуры перегретого пара соответственно; ЗРУ – задатчик ручного управления. На щите автоматики выделены транспаранты, сигнализирующие о нарушениях режимов по каналам подачи воздуха, подачи доменного газа, регулирования температуры перегретого пара и тревоги (alarm) соответственно. Программа

«Монитор-КПД» реализована на отдельной рабочей станции и осуществляет текущий контроль изменения КПД котла и оценивает направление изменения подачи воздуха с целью достижения максимума КПД.

Координаты, представленные на рис. 3.3 следующие: x – вектор положений исполнительных механизмов; y – вектор режимных параметров котла; c – вектор настроечных параметров регуляторов; u_R – вектор управляющих воздействий регуляторов; $u_{ЗРУ}$ – вектор управляющих воздействий машиниста-оператора; $u_{ИМ}$ – вектор управляющих воздействий на исполнительные механизмы; σ – вектор сигналов нарушения режимов по каналам подачи воздуха, подачи доменного газа, регулирования температуры перегретого пара и тревоги (*alarm*); $u_{КПД}$ – вектор приращений КПД котла и направлений изменений подачи воздуха.

В структуре АСУ парового котла выделяется контур автоматической коррекции подачи воздуха, подачи доменного газа и регулирования температуры перегретого пара (контур I) и контур автоматической оптимизации КПД котла и минимизации потребления природного газа (контур II). В системе предусмотрено 2 режима работы: автоматический и ручной. В ручном режиме машинист-оператор устанавливает параметры подачи воздуха, подачи доменного газа и регулирования температуры перегретого пара в соответствии с технологическим регламентом, определяемым режимной картой котла. С этой целью машинист-оператор использует задатчики ручного управления (ЗРУ). Если значения режимных параметров котла соответствуют режимной карте, то машинист-оператор включает режим автоматической коррекции с помощью переключателей P_B , $P_{ДГ}$, $P_{Тпп}$. В режиме автоматической коррекции осуществляется оптимальное ведение режимов котла на основе корректирующих воздействий по параметрам подачи воздуха, подачи доменного газа и впрыска конденсата в перегретый пар. Корректирующие воздействия рассчитываются по критериям максимума КПД котла и минимума потребления природного газа.

Увеличение потребления вторичных энергетических ресурсов вследствие проведения энергосберегающих мероприятий приводит к изменению режимных параметров котлов. В результате рабочий режим котлов смещается по КПД в неэффективную зону. Это приводит к необходимости организации экстремального управления котлом по КПД.

Рассмотрим основные соотношения, которые используются при *оперативной оценке КПД котла в реальном времени* для решения задачи экстремального управления.

Прежде всего отметим, что режимы горения в топках котлов характеризуются ярко выраженной экстремальной характеристикой, как по подаче воздуха, так и по его нагрузке. Примерный вид экстремальной характеристики по подаче воздуха приведен на рис. 3.4.

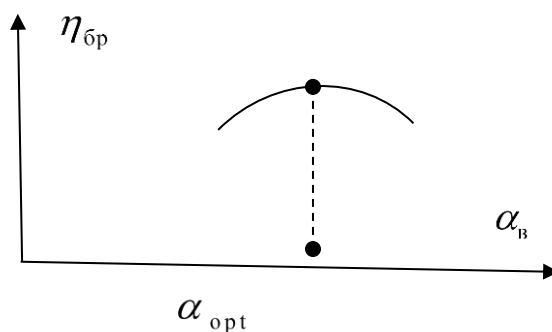


Рис. 3.4. Зависимость *КПД* котла от коэффициента избытка воздуха

Здесь $\eta_{бр}$ —*КПД* брутто котла, α_v — коэффициент избытка воздуха.

Зависимость для идентификации характеристик котлоагрегата будем рассматривать в нелинейной форме, режимными факторами которой являются входной тепловой поток и давление воздуха:

$$\Delta\eta_{\text{бп}}(t) = a_0 + a_1\Delta Q_{\text{вх}}(t - \tau) + a_{12}(\Delta Q_{\text{вх}}(t - \tau))^2 + a_2\Delta P_{\text{в}}(t - \tau) + a_{22}(\Delta P_{\text{в}}(t - \tau))^2, \quad (3.1)$$

здесь $\Delta\eta_{\text{бп}}(t)$ – отклонение КПД брутто котла, $\Delta Q_{\text{вх}}(t - \tau)$ – уклонение теплового потока, вносимого топливными газами; $\Delta P_{\text{в}}(t - \tau)$ – уклонение давления подачи воздуха, τ – транспортное запаздывание процессов в котле, $a_0, a_1, a_2, a_{12}, a_{22}$ – статистические коэффициенты.

В общем случае запаздывание процессов котле носит более общий динамический характер, в частности, запаздывание может иметь инерционный характер. В этом случае динамика процессов запаздывания описывается динамическим оператором:

$$h_i(t) = \int_0^\infty x_i(t - \tau_{\text{min}} - \lambda)w_i(\lambda)d\lambda, \quad i=1,2; \quad (3.2)$$

$$\int_0^\infty w_i(\lambda)d\lambda=1,$$

где $w_i(\lambda)$ – весовая функция динамического оператора, $x_1(t)$ – входной фактор: входной тепловой потока, $x_2(t)$ – входной фактор: давления воздуха, $h_i(t)$ – соответствующий сигнал входного фактора $x_i(t)$, синхронизированный с сигналом $\Delta Q_{\text{вых}}(t)$.

В дискретном виде выражение (3.2) имеет вид:

$$h_i(t_k) = \sum_{l=0}^n x_{i,k-l}(t_{k-l} - \tau_{\text{min}})w_{i,k-l}, \quad i=1,2, \quad (3.3)$$

где $w_{i,k-l}$ – весовые коэффициенты, n – число слагаемых.

Для того, чтобы определить влияние факторов $x_i(t)$ на выходной сигнал $\Delta y(t) = \Delta\eta_{\text{бп}}(t)$ необходимо сначала их синхронизировать. Для решения

задачи синхронизации необходимо определить транспортное запаздывание τ_{min} и весовые коэффициенты $w_{i,k-l}$.

С этой целью определим точность решения задач идентификации величин τ_{min} и множества $w_{i,k-l}$. Введем критерий точности решения задачи идентификации:

$$E_c^2(t_k) = \Phi_m\{(y(t_k) - h_i(t_k))^2\},$$

где Φ_m – экспоненциальный фильтр порядка m .

Искомое решение находится на текущий шаг k :

$$\{\tau_k^{min}, w_{i,k}\} = \arg \min E_c^2(t_k).$$

Отметим, что соотношение (3.1) определяет текущую оценку отклонений КПД. При этом запаздывание τ имеет переменное значение, которое определяется из условия:

$$\max_{\{\tau\}} \Phi_m\{\Delta Q_{вых}(t) \Delta Q_{вх}(t - \tau)\},$$

где оператор $\Phi_m\{\cdot\}$ – экспоненциальный фильтр m -го порядка. Данное представление учитывает тот факт, что запаздывание в рассматриваемой системе зависит от текущей нагрузки и других факторов. При этом для того, чтобы правильно оценить коэффициенты передачи между входным и выходным тепловым потоками необходимо провести динамическую синхронизацию между ними на основе сдвига во времени запаздывания. Только в этом случае соотношение (3.1) будет справедливо.

Обработка измерительной информации, поступающей с котла осуществляется в реальном времени с помощью экспоненциальных фильтров,

разработанных проф. Казариновым Л.С. [39]. Экспоненциальный фильтр осуществляет на фоне помех разложение измеренного сигнала по базисным функциям:

$$y(t - \lambda) \approx \sum_{i=0}^n a_i(t)(\lambda^i), \quad (3.2)$$

где λ^i – базисные функции;

$a_i(t)$ – переменные спектральные составляющие сигнала.

Вычисление переменных составляющих сигнала $a_i(t)$ осуществляется на основе решения уравнения:

$$\mathbf{a}(t) = \mathbf{P}^{-1} \boldsymbol{\mu}(t), \quad (3.3)$$

где $\mathbf{P}$ – матрица базовых корреляционных связей,

$\boldsymbol{\mu}(t)$ – матрица моментов i -го порядка сигнала,

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} p_{00} & p_{01} & p_{02} & p_{0n} \\ p_{10} & p_{11} & p_{12} & p_{1n} \\ p_{20} & p_{21} & p_{22} & p_{2n} \\ p_{n0} & p_{n1} & p_{n2} & p_{nn} \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{a}(t) = \begin{pmatrix} a_0(t) \\ a_1(t) \\ a_2(t) \\ a_n(t) \end{pmatrix},$$

$$\boldsymbol{\mu}(t) = \begin{pmatrix} \mu_0(t) \\ \mu_1(t) \\ \mu_2(t) \\ \mu_n(t) \end{pmatrix}.$$

Вычисление корреляционных коэффициентов базисных функций производится по выражению:

$$p_{ij} = c_\phi \int_0^\infty \lambda^{i+j} e^{-c_\phi \lambda} d\lambda = \frac{(i+j)!}{c_\phi^{(i+j)}}, \quad \forall(i, j). \quad (3.4)$$

Здесь параметр c_Φ играет роль показателя старения данных, обратная величина $\tau_\Phi = \frac{1}{c_\Phi}$ имеет смысл постоянной времени фильтра первого порядка, на основе которого усредняется величина квадрата ошибки.

Моменты входного сигнала будут равны

$$\mu_i(t) = c_\Phi \int_0^\infty y(t - \lambda) \lambda^i e^{-c_\Phi \lambda} d\lambda, \quad \forall i. \quad (3.5)$$

В дискретном виде вычисляются на основании формул:

$$\begin{cases} \mu_{0,k} = \frac{1}{1+c_\Phi \Delta t} \mu_{0,k-1} + \frac{c_\Phi \Delta t}{1+c_\Phi \Delta t} y_k, \\ \mu_{i,k} = \frac{1}{1+c_\Phi \Delta t} \mu_{i,k-1} + \frac{i \Delta t}{1+c_\Phi \Delta t} \mu_{i-1,k}; \quad i = 1, 2, \dots, n. \end{cases} \quad (3.6)$$

Система разностных уравнений (3.6) определяет дискретный формирующий фильтр – анализатор сигнала.

Произведение $c_\Phi \Delta t$ в соотношениях (3.6) имеет смысл числа, обратного текущему числу статистических наблюдений:

$$c_\Phi \Delta t = \frac{\Delta t}{\tau_\Phi} = \frac{1}{n_\Phi}, \quad (3.7)$$

где τ_Φ – постоянная времени фильтра,

n_Φ – число статистических наблюдений, содержащихся в интервале времени, равном постоянной времени τ_Φ , при дискретизации наблюдений с шагом Δt .

С учетом (3.7) первое уравнение системы (3.6) можно представить в виде:

$$\mu_{0,k} = \frac{n_\Phi}{n_\Phi + 1} \mu_{0,k-1} + \frac{1}{n_\Phi + 1} y_k. \quad (3.8)$$

Преимущество использования данного фильтра является то, что на основе представленного экспоненциального фильтра можно экстраполировать

обрабатываемый сигнал (3.2) на интервал упреждения τ для осуществления модельно-упреждающего управления режимом работы энергетического котла в реальном времени:

$$y(t + \tau) = \sum_{i=0}^n (-1)^i a_i(t) \lambda^i, \quad (3.9)$$

$$y^*(t + \tau) = \Phi_n\{y(t + \tau)\}, \quad (3.10)$$

Рассмотрим алгоритм декомпозиционного алгоритма модельно-упреждающего управления режимами работы котла.

Соотношение (3.2) можно представить в виде соотношения

$$y = a_0 + a_1 h_1 + a_{12} h_1^2 + a_2 h_2 + a_{22} h_2^2, \quad (3.11)$$

где h_1, h_2 – отклонения от средних величин входных параметров по теплоте вносимых топливных газов и давлению воздуха:

$$h_1(t) = \Delta Q_{\text{вх}}(t - \tau),$$

$$h_2(t) = \Delta P_{\text{в}}(t - \tau),$$

причем a_{11} – параметр, определяющий зависимость отклонений тепловой энергии вносимой топливными газами от коэффициента полезного действия энергетического котла:

$$a_{11}(t) = \frac{\partial \eta_{\text{оп}}(t)}{\partial Q_{\text{вх}}(t - \tau)},$$

a_{12} – параметр, определяющий зависимость отклонений подачи воздуха от коэффициента полезного действия энергетического:

$$a_{12}(t) = \frac{\partial \eta_{\text{оп}}(t)}{\partial P_{\text{в}}(t - \tau)},$$

y – отклонение текущего значения коэффициента полезного действия энергетического котла от среднего значения:

$$y(t) = \Delta \eta_{\text{оп}}(t),$$

τ – транспортное запаздывание, описывающее динамику работы котлов.

На первом этапе предложенного метода находим постоянную составляющую a_0 , как среднее значение выходного сигнала y .

При этом $\Delta y = y - a_0$.

Далее приведем линеаризованную часть зависимости (3.11):

$$\Delta y = a_1 x_1 + a_2 x_2.$$

Нахождение коэффициентов a_1, a_2 осуществляется методом наименьших квадратов.

По аналогии с методом главных компонент определяет коэффициенты a_{12}, a_{22} для нелинейной части зависимости 3.11. При этом

$$\begin{aligned} \delta y &= \Delta y - a_1 x_1 - a_2 x_2 = \\ &= a_{12} x_1^2 + a_{22} x_2^2. \end{aligned}$$

Коэффициенты a_{12}, a_{22} также определяются методом наименьших квадратов.

Модельно-упреждающее управление основывается на решении задач управления режимами котлоагрегатов в реальном времени на каждом шаге управления.

Причем важным в работе оператора является нахождение значения шага регулирования, а именно шаг движения к экстремуму.

Для движения к экстремуму и повышения коэффициента полезного действия котлоагрегата необходимо находить изменения значений входных параметров уклонения теплового потока, вносимого топливными газами; и уклонение давления подачи воздуха по следующим формулам:

$$x_1(t) = \Delta Q_{\text{вх}}(t - \tau) = -0,5 \frac{a_1}{a_{12} + \alpha},$$

$$x_2(t) < x_{2 \max},$$

$$x_2(t) = \Delta P_{\text{в}}(t - \tau) = -0,5 \frac{a_2}{a_{22} + \alpha},$$

α – малая величина.

Данное оперативное управление режимами работы котлоагрегата по максимуму коэффициента полезного действия при одновременном сжигании природного и доменного газов выполняется на каждом шаге управления в реальном времени.

3.2.2. Задача снижения нагрузки котлов за счет рационального распределения нагрузок энергетических агрегатов энергетической станции

Следующей решаемой задачей является снижение нагрузки котлов за счет рационального распределения нагрузок энергетических агрегатов энергетической станции.

Структура станции-регулятора (рис. 3.5) представляет собой теплоэнергетическую станцию (ТЭС) с поперечными связями по пару [7, 28, 29].

В паровой коллектор поступает выработанный котлоагрегатами перегретый пар $D_{\text{пп},i}$. Турбогенераторы $ТГ_i$ потребляют из коллектора перегретый пар $D_{\text{пп},i}^{ТГ}$ и вырабатывают электрическую $W_{ТГ,i}$ и тепловую $Q_{ТГ,i}$ энергию.

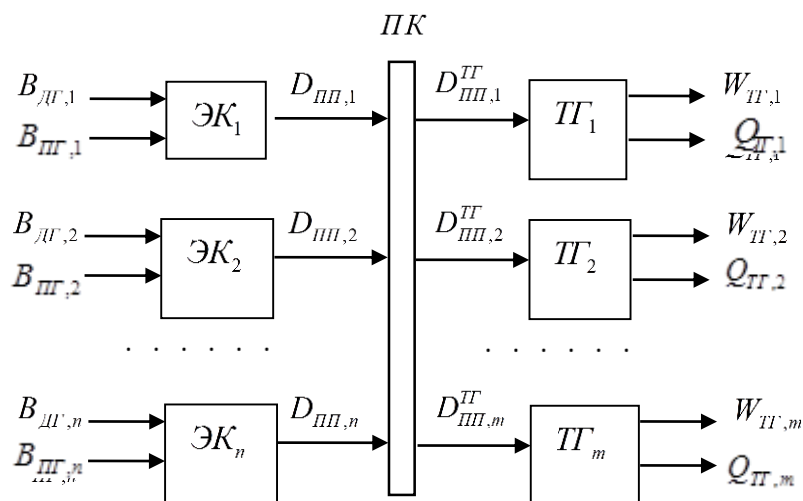


Рис. 3.5. Схема теплоэнергетической станции
 (ЭК_i - энергетические котлоагрегаты, ТГ_i - турбогенераторы,
 ПК - паровой коллектор)

В работе рассматривается задачу **оптимизации распределения энергетических нагрузок турбогенераторов** для достижения эффекта сбережения природного газа. Типовая энергетическая характеристика турбогенератора представлена на рис. 3.6.

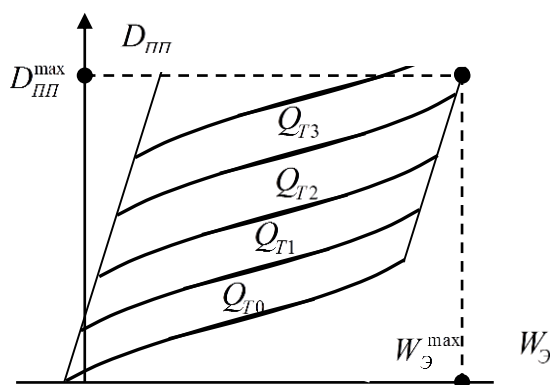


Рис. 3.6. Типовая энергетическая характеристика турбогенератора
 $W_{\text{э}}$ - вырабатываемая электрическая мощность, $Q_{\text{т}}$ - тепловая мощность,
 $D_{\text{пп}}$ - потребление перегретого пара

При идентификации энергетических характеристик турбин используются зависимости:

$$\left. \begin{aligned} D_{III,i}^{TT} &= a_{0,i} + a_{1,i} W_{\mathcal{E},i} + a_{2,i} Q_{T,i} + < поправки >; \\ D_{III,i}^{TT} &\geq b_{0,i} + b_{1,i} W_{\mathcal{E},i} + b_{2,i} Q_{T,i} + < поправки >; \\ W_{\mathcal{E},i} &\leq W_{\mathcal{E},i}^{\max}, \quad D_{III,i}^{TT} \leq D_{III,i}^{TT,\max}; \quad i=1, 2, \dots \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

где коэффициенты a_{ji} , b_{ji} определяются эмпирически из анализа статистических данных.

Обобщенные зависимости для параллельно работающих турбин приведены ниже:

$$\left. \begin{aligned} W_{\mathcal{E},0} &= \sum_{i=1}^m W_{\mathcal{E},i}; \\ Q_{T,0} &= \sum_{i=1}^m Q_{T,i}; \\ D_{III,0}^{TT} &= \sum_{i=1}^m D_{III,i}^{TT}. \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$

Ставится задача: найти оптимальные значения электрической $W_{\mathcal{E},i}$ и тепловой $Q_{T,i}$ нагрузок турбогенераторов по критерию минимума суммарного потребления пара $D_{III,0}^{TT}$ при заданных значениях мощности суммарной выработки электрической $W_{\mathcal{E},0}$ и тепловой $Q_{T,0}$ энергии. Данная задача является типовой задачей линейного программирования. Для конкретного примера: оптимизация распределения нагрузок турбин ЦЭС ПАО "ММК". В результате рационального распределения нагрузок энергетических агрегатов энергетической станции потребление пара блоком турбогенераторов снизилось на 11,7% (с 1700 т/ч до 1500 т/ч).

Следующим вопросом повышения энергетической эффективности станции регулятора является задача **оптимизации распределения потребления природного и доменного газа котлоагрегатами.**

3.2.3. Задача оптимизации распределения потребления природного и доменного газа котлоагрегатами

Типовая энергетическая характеристика котлоагрегата приведена на рис.3.7.

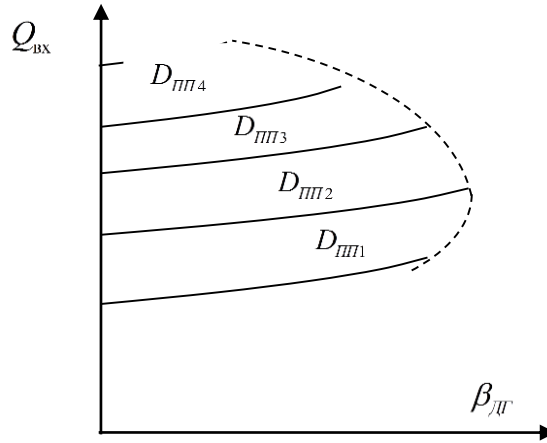


Рис. 3.7. Энергетическая характеристика котла, работающего на смеси доменного и природного газа

$Q_{вх}$ - количество тепловой энергии, поступающей в котел с топливом;

$\beta_{дг}$ - доля доменного газа в топливной смеси с природным газом:

$$\beta_{дг} = B_{дг} / B_{пг} ; \quad D_{пп} - \text{паровая нагрузка котла}$$

При идентификации энергетических характеристик котлоагрегатов используются зависимости:

$$\left. \begin{aligned} Q_{вх,i} &= a_{0,i} + a_{1,i} D_{пп,i} + a_{2,i} \beta_{дг,i} + a_{3,i} D_{пп,i}^2 + a_{4,i} \beta_{дг,i} D_{пп,i} + \langle \text{поправки} \rangle; \\ \beta_{дг,i} &\leq \begin{cases} \beta_{дг,i}^{\max} + b_{1,i} (Q_{вх,i} - Q_{м,i})^2, & \text{при } Q_{вх,i} - Q_{м,i} \geq 0, \\ \beta_{дг,i}^{\max} + b_{2,i} (Q_{вх,i} - Q_{м,i})^2, & \text{при } Q_{вх,i} - Q_{м,i} < 0; \end{cases} \\ D_{пп,i} &\leq D_{пп,i}^{\max}; \quad i=1, 2, \dots \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

где коэффициенты a_{ji} , b_{ji} определяются эмпирически из анализа статистических данных.

Обобщенные зависимости для параллельно работающих котлоагрегатов приведены ниже:

$$\left. \begin{aligned} D_{III,0} &= \sum_{i=1}^n D_{III,i}; \\ Q_{вх,0} &= \sum_{i=1}^m Q_{вх,i}; \\ B_{ПГ,0} &= \sum_{i=1}^m B_{ПГ,i}. \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

$$Q_{вх,i} = B_{ПГ,i} Q_{н}^{ПГ} + B_{ДГ,i} Q_{н}^{ДГ} = B_{ПГ,i} (Q_{н}^{ПГ} + \beta_{ДГ,i} Q_{н}^{ДГ}), \quad (3.16)$$

где $B_{ПГ,i}$, $B_{ДГ,i}$, $Q_{н}^{ПГ}$, $Q_{н}^{ДГ}$ - расходы и калорийности ПГ и ДГ.

Зависимости и ограничения (3.14–3.16) является базовым при решении оптимизационной задачи минимизации потребления ПГ при максимизации утилизации ДГ энергетическими котлами.

Целями разработанной автоматизированной системы управления режимами ЦЭС ПАО «ММК» являются:

1. Снижение потребления природного газа на ЦЭС на основе обеспечения максимального текущего КПД котлов при рациональном соотношении потребления природного и доменного газа.
2. Максимальная утилизация доменного газа, снижение выбросов «на свечу».
3. Снижение вредного воздействия на окружающую среду.
4. Повышение надежности работы Центральной электростанции.
5. Снижение риска «Возникновения аварий и инцидентов».
6. Создание надежной, гибкой, резервируемой, наращиваемой информационно-вычислительной системы управления, сбора и передачи данных на базе контроллерного оборудования.

На рисунке 3.8 приведена мнемосхема автоматизированной системы оптимизации эффективности потребления вторичных энергетических ресурсов металлургического производства на тепловых электростанциях. При выборе меню «Схема» отображается структурная схема выбранного котла и показания

средств измерений (см. рис. 3.8). В нижней части данного видеокадра расположено окно системы сообщений, в котором приводится последнее сообщение предупредительной и аварийной сигнализации.

На рисунке 3.9 приведена мнемосхема автоматизированной системы оптимизации эффективности потребления вторичных энергетических ресурсов металлургического производства на тепловых электростанциях. На мнемосхеме приведены условные изображения топки энергетического кола, его хвостовой части, пароперегревателя, барабана, линии технологических процессов, высоковольтных двигателей, регуляторов и регулирующей аппаратуры.

На рис. 3.10–3.12 в качестве примера приведена дополнительная графическая информация зависимостей входных и выходных тепловых потоков (в отклонениях), а также отклонение коэффициента полезного действия энергетического котла.

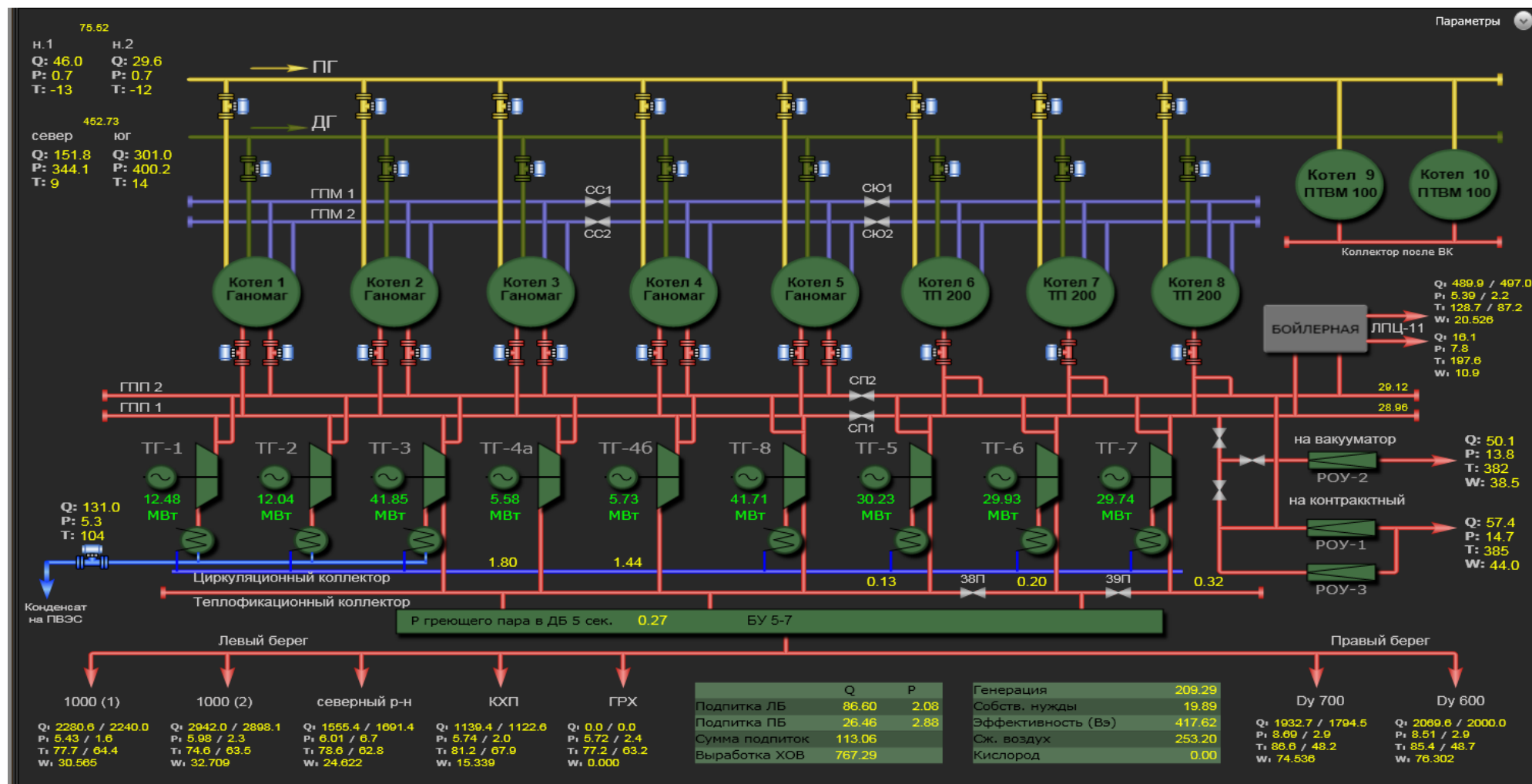


Рис. 3.8. Обобщенная структура ЦЭС

Для повышения надежности и отказоустойчивости функционирования автоматизированной системы оптимизации эффективности потребления вторичных энергетических ресурсов металлургического производства на тепловых электростанциях предусмотрено:

- электроснабжение оборудования КИПиА с использованием источников резервного питания,
- дублирование процесса управления регулирующей аппаратуры со щита управления КИП,

Реализация системы автоматического регулирования технологических процессов на базе резервируемых контроллеров SIEMENS,

- резервирование основных элементов системы управления, таких как модули управляющих контроллеров, каналов передачи информации, источников питания,
- программное разграничение прав доступа к экраным формам автоматизированной системы оптимизации эффективности потребления вторичных энергетических ресурсов металлургического производства на тепловых электростанциях,
- архивирование данных аналоговых и дискретных входных и выходных сигналов для проведения анализа работы и причин отказов оборудования автоматизированной системы оптимизации эффективности потребления вторичных энергетических ресурсов металлургического производства на тепловых электростанциях.

На рис. 3.13 приведена зависимость изменения потребления природного газа энергетическим котлом в выработке тепловой энергии. Зависимость полученной экономии потребления природного газа энергетическим котлом при сжигании смеси газов за счет внедрения разработанной автоматизированной системы оптимизации эффективности потребления вторичных энергетических ресурсов металлургического производства на тепловых электростанциях представлена на рис. 3.14.

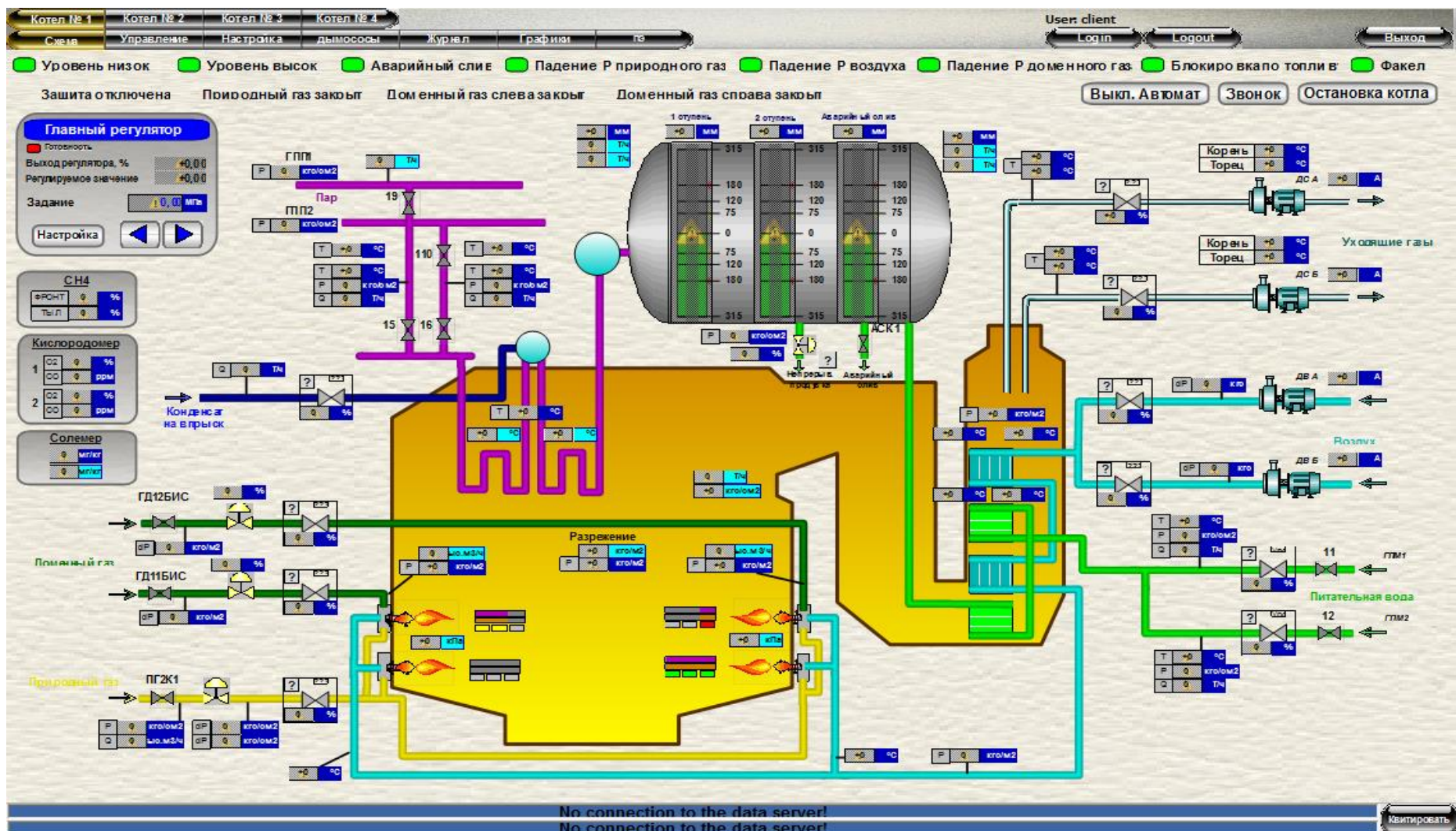


Рис. 3.9. Видеокادر автоматизированной системы оптимизации эффективности потребления вторичных энергетических ресурсов металлургического производства на тепловых электростанциях

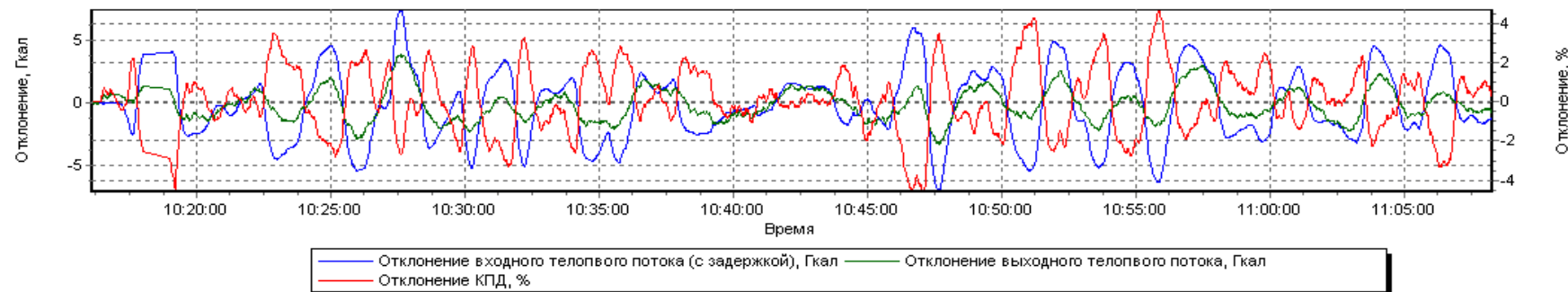


Рис. 3.10. Общие графики зависимостей отклонений входных и выходных тепловых потоков, отклонения коэффициента полезного действия энергетического котла

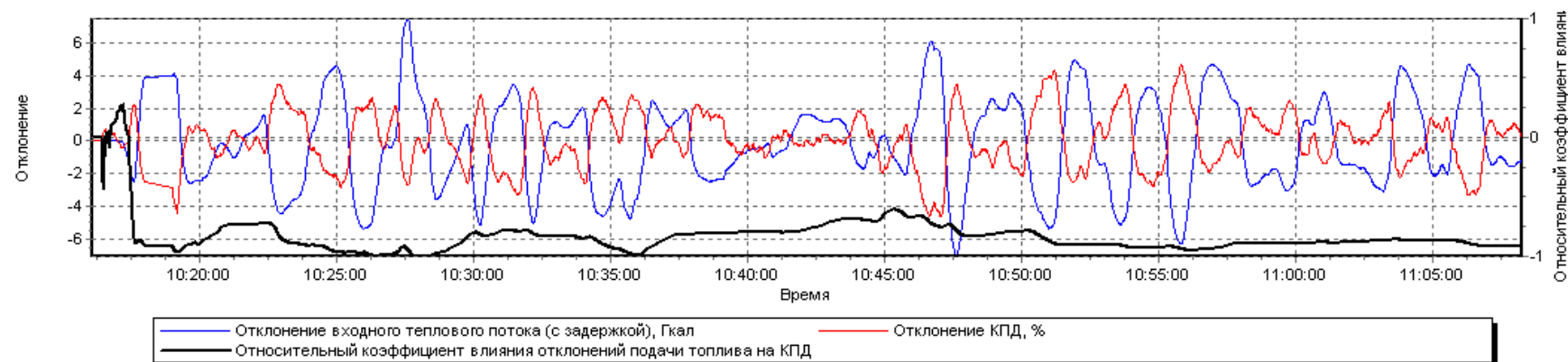


Рис. 3.11. Графики зависимостей отклонений входных и выходных тепловых потоков, отклонения коэффициента полезного действия энергетического котла (по каналу топлива)

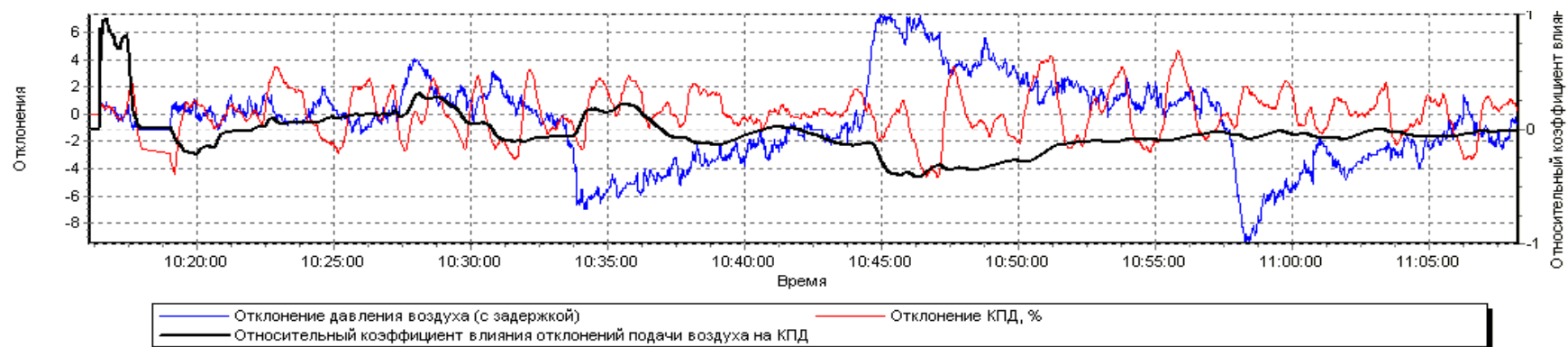


Рис. 3.12. Графики зависимостей отклонений входных и выходных тепловых потоков, отклонения коэффициента полезного действия энергетического котла (по каналу воздуха)

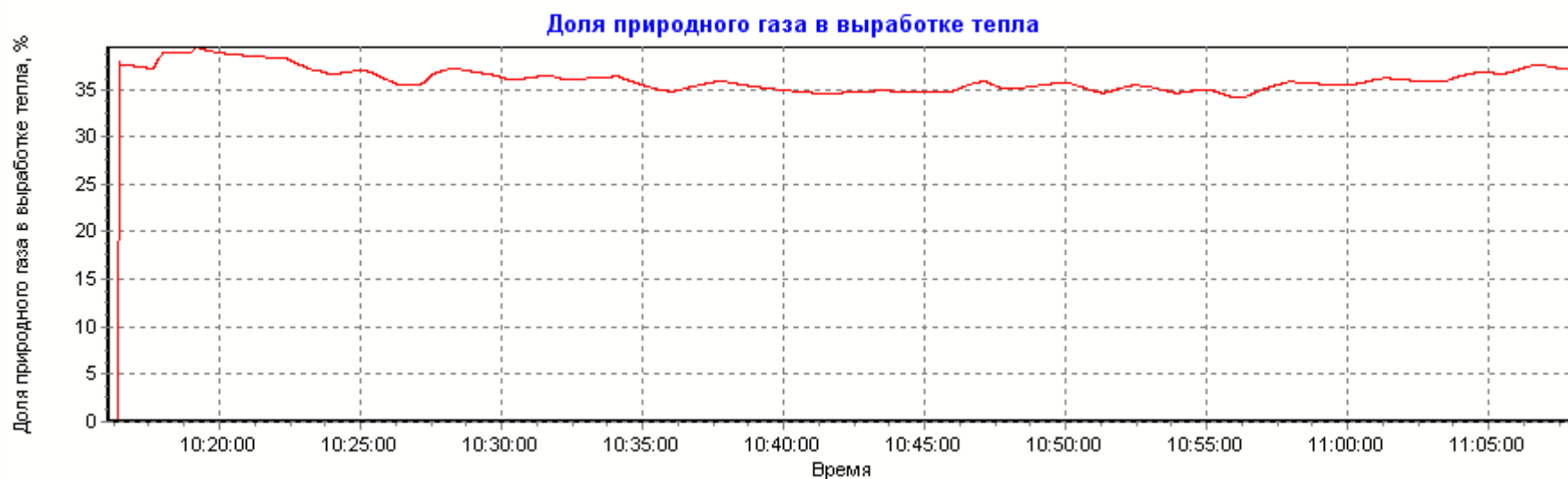


Рис. 3.13. Зависимость изменения потребления природного газа энергетическим котлом в выработке тепловой энергии



Рис. 3.14. График изменения экономии природного газа энергетическим котлом

В ходе испытаний АСУ в апреле 2014 г., согласно протокола Заседания технического совета ПАО «ММК» №5 от 02.06.2014 г. и письма №УГЭ-1058-23 от 5.05.2014 «Об испытаниях системы автоматического управления на котле №5 ЦЭС» выявлено:

- расход доменного газа при тепловом режиме котла без химического недожога вырос соответственно в базовом режиме на 8% (5,7 тыс. м³/ч), на главном регуляторе на 5 % (3,8 тыс. м³/ч);

- расход природного газа при тепловом режиме котла без химического недожога снизился соответственно в базовом режиме на 11% (0,73 тыс. м³/ч), на главном регуляторе на 7% (0,47 тыс. м³/ч).

В результате экономия природного газа на 1 котле ст.№5 составила 2 558 тыс.м³ в год.

В настоящее время экономия природного газа на 8-ми котлах станции ЦЭС согласно акта внедрения за счет внедрения автоматизированной системы оптимизации эффективности потребления вторичных энергетических ресурсов металлургического производства на энергетических котлах составляет 0,5 тыс. м³ в час.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 3

1. Интегральный эффект предложенной концепции ресурсосберегающей станции в рассматриваемом теплоэнергетическом комплексе металлургического предприятия в рамках типовой структуры металлургического производственного комплекса базируется на системной организации локальных задач энергосбережения с использованием концепции энергосберегающей станции и интегрально выражается как экономия объема потребления природного газа на основе: оптимизации текущего КПД станции и максимизации потребления вторичных энергетических ресурсов металлургического производства; оптимизации нагрузки теплоэнергетических агрегатов; минимизации потерь энергетических ресурсов на «свече» доменного газа; минимизации потерь энергетических ресурсов на «свече» технологического пара за счет максимального аккумуляирования вторичного технологического пара; минимизации потребления кокса за счет оптимизации режимов ведения доменной плавки; контроля энергоемкости технологических процессов.

2. Проведена разработка методики автоматизированного регулирования эффективности работы котла по максимуму КПД в реальном времени на основе использования современных информационно-технических средств с целью снижения потребления природного газа на ресурсосберегающей станции за счет оптимизации режимов и утилизации вторичных энергетических ресурсов энергометаллургического технологического комплекса, а именно за счет сжигания доменного газа.

3. Программное обеспечение разработанной автоматизированной системы управления режимами котлоагрегатов основывается на разделении динамических свойств объектов управления, при этом общая процедура идентификации объектов управления распадается на две частные процедуры: динамическую синхронизацию процессов и идентификацию коэффициентов передачи.

4. Внедрение разработанной системы автоматизированной системы управления режимами котлоагрегатов позволило реализовать оптимизацию

топочных процессов в реальном времени. В результате оценка технического эффекта, согласно акта внедрения, составляет 0,5 тыс. м³ в час экономии природного газа. Что при цене природного газа 3900 руб. за 1 тыс. м³ оценивается до 17 млн. руб. в год.

ГЛАВА 4. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПАРОВОЙ СЕТИ ПРИ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ НЕСТАБИЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПАРА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

4.1 Постановка задачи управления режимами паровых сетей

Особенностью функционирования технологических сетей пароснабжения металлургических предприятий является резко выраженная динамика потребления ресурсов, обусловленная переменными режимами работы технологического оборудования. В этом случае управление сложными сетями необходимо осуществлять с использованием динамических макромоделей сетей. Перспективным подходом в настоящее время здесь является использование оперативного управления на базе динамического макромоделирования. Применение оперативного управления особенно эффективно для протяженных разветвленных сетей, нагрузку которых составляют сотни и тысячи потребителей. В этом случае, характерном для металлургических производств, протяженность сетей обуславливает значительные запаздывания между регистрацией событий в сети и обработкой управляющих воздействий. Это снижает эффективность управления вплоть до его потери. Оперативное управление с использованием макромоделей сети позволяет компенсировать указанный недостаток.

Типовая система технологической паровой сети металлургического предприятия состоит из:

- источников пара, таких как паровоздушные электростанции (ПВЭС), редуционно-охладительные установки (РОУ), паровые котлы утилизаторы, парогенераторы;
- потребители пара;
- паровые трубопроводы;
- пароводяные аккумуляторы;

- технологическое оборудование, предназначенное для изменения параметров пара: пароперегревающие установки, задвижки, сепараторы, редукционно-охладительные установки, паровые турбины, узлы распределения пара, охлаждающие теплообменники;
- устройства для сброса пара.

Режимы потребления пара различными технологическими потребителями носят неравномерный характер, поэтому возникает пиковая перегрузка источника пароснабжения, изменяются параметры пара на входе установки, что, в конечном счете, сказывается на стабильности технологического процесса производства и качестве выпускаемой продукции.

Система пароснабжения металлургического предприятия, как правило, имеет несколько источников пара. Поэтому для демпфирования пиков нагрузки можно осуществлять снабжение паром потребителей за счет дополнительных источников пара. При этом необходимый расход пара для потребителей будет определяться с помощью метода оперативного управления.

Например, на площадке ПАО «ММК» предусмотрена для рационального использования пара в системе предусмотрена буферная электростанция (БЭСТ) ST-3. На промплощадке ПАО «ММК» энергокорпус (ЭК) является одним из ключевых элементов пароснабжения промплощадки ККЦ и КХП. В ЭК установлены паровые аккумуляторы (7 шт.), паспортная паропроизводительность одного аккумулятора составляет 38,5 т/ч; аккумулирующая способность 15 т. Заряд паровых аккумуляторов (ПА) осуществляется от котлов утилизаторов охладителя конверторных газов (ОКГ) утилизирующих тепло, образующееся при плавках в ККЦ. Среднее время плавки в ККЦ, образующееся тепло при которых утилизируется в котлах ОКГ, занимает 15 мин., среднее количество плавок составляет 28 в сутки. Плавки происходят поочередно при нормальном режиме, но также котлы ОКГ могут включаться и параллельно. Во время плавки подача пара от одного котла ОКГ составляет от 150 до 300 т/ч. Объем выработки пара от котлов является резко переменным и

аккумулирующей способности ПА может не хватить для аккумуляирования такого объема пара. В таком случае происходит сброс пара через свечи в атмосферу, осуществляющийся диспетчером энергокорпуса.

Макромоделирование режимов заряда и позволяет повысить эффективность пароснабжения буферной электростанции ST-3 от паровых аккумуляторов. Заряд ПА происходит от котлов ОКГ, при этом повышается температура, давление и масса воды, имеющейся в аккумуляторах. Разряд ПА сопровождается снижением давления пара и вторичным вскипанием воды, при этом уровень воды в аккумуляторе уменьшается.

Система автоматического регулирования зарядно/разрядных процессов работала лишь частично, так как полностью не реализована. Операции по регулированию в основном осуществляются вручную. Так при увеличении давления в аккумуляторах выше допустимого уровня осуществляется сброс пара через свечу эксплуатационным персоналом ЭК вручную с использованием неэлектрифицированной задвижки. Это приводит к сбросу большего объема пара и, соответственно, снижению эффективности работы системы пароснабжения. Кроме того, через свечи ЭК сбрасывается пар при превышении давления в паровых сетях. Это является необходимой мерой, иначе может произойти разгрузка турбины ВРТ-25 ПВЭС-2 и уменьшение производства электроэнергии. Вследствие расположения свечи непосредственно на выходе ПА, что приводит к их разряду и, соответственно, к снижению возможности энергокорпуса демпфировать нагрузку вакууматора и снабжать паром станцию ST-3.

Таким образом, для повышения подачи пара на турбогенераторы ST-3 необходимо обеспечение режима работы САР энергокорпуса и паровых свечей, при котором демпфируются пики нагрузки вакууматора.

Кроме того, эффективность работы системы пароснабжения буферной станции ST-3 снижается в результате сброса пара через свечу ЭК в следующих случаях:

- 1) при увеличении давления в паровом аккумуляторе выше 29 кгс/см^2 ;
- 2) при увеличении давления перед пароперегревательным устройством до $15,5\text{-}16 \text{ кгс/см}^2$ (при этом направление движения пара меняется: от пароперегревательного устройства к энергокорпусу).

На рис. 4.1 представлены зависимости расхода пара на входе и выходе пароперегревательного устройства. Анализ данных показал, что наличие появления пиков расхода пара на входе ППУ обусловлено изменением движения пара в паропроводе от ППУ к ЭК. Как отмечалось выше, это происходит в результате сброса пара через свечу ЭК при увеличении давления на входе ППУ до $15,5\text{-}16 \text{ кгс/см}^2$.

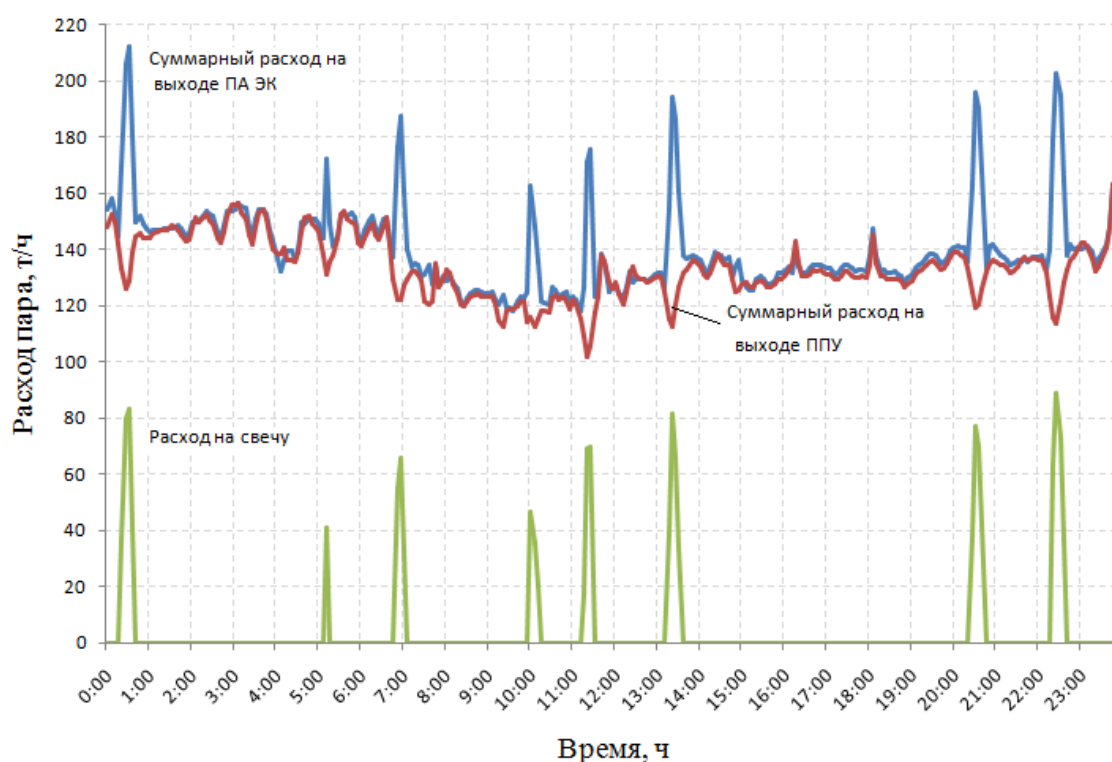


Рис. 4.1.

Таким образом, в рассматриваемой схеме пароснабжения наблюдается нескоординированная работа систем регулирования распределения пара. В этой связи является актуальной задача координации работы указанных систем

регулирования. Решение поставленной задачи позволит стабилизировать параметры сети и повысить выработку электрической энергии на станции ST-3.

4.2 Общая схема оперативного управления потоками в сетях

При расчете систем пароснабжения требуется рассчитать давления, расходы и температуры пара в каждой точке системы, исходными данными при этом являются:

- конфигурация паровой сети, включающая топологическую схему с указанием источников и потребителей пара, а также информацию по диаметрам, длинам и местным сопротивлениям участков паропроводов;

- давление и температура пара на источниках;

- расходные характеристики и положение регулирующих органов;

- характеристики потребителей, включающие данные по режимам работы, давлениям и расходам пара.

Общая схема оперативного управления в сетях представлена на рис. 4.2.1.

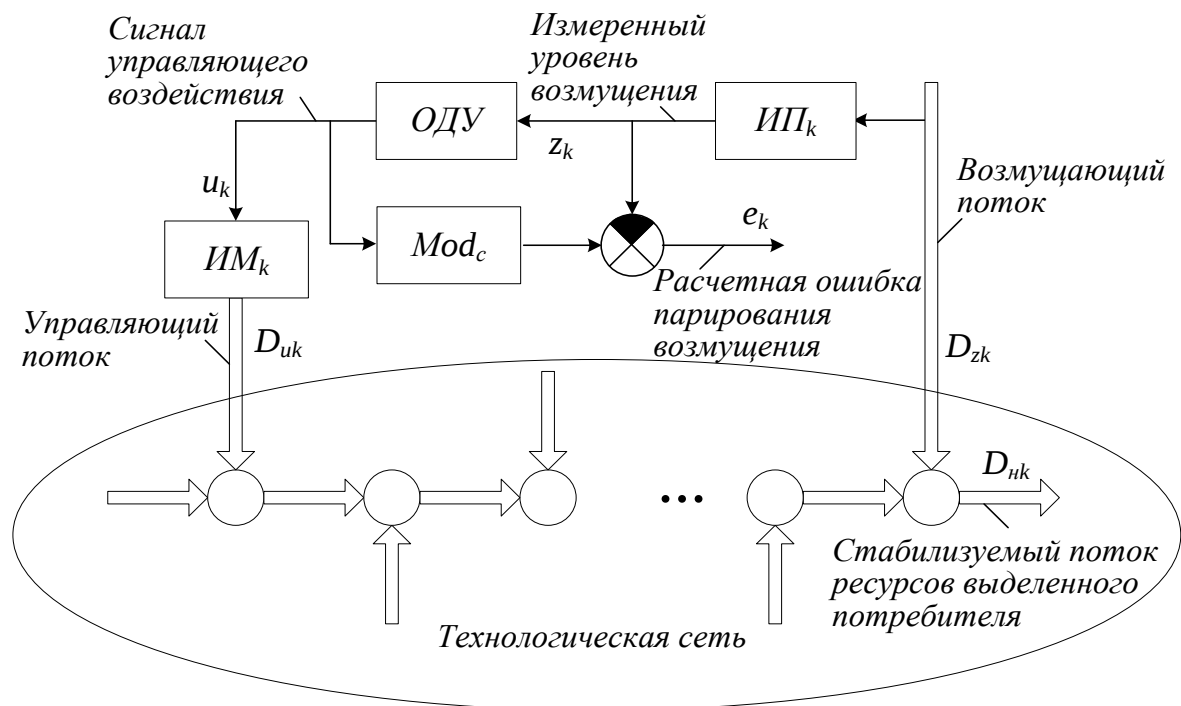


Рис. 4.2.1. Общая схема оперативного управления в сетях

Частные k -ые задачи управления потоками в сети состоят в том, чтобы для выделенных k -ых потребителей стабилизировать требуемые значения потоков ресурсов D_{nk} при воздействии возмущающего потока D_{zk} . С этой целью АСУ ТП исходя из величины z потока D_{zk} , полученного с помощью измерительного прибора ($ИП_k$), должно вырабатывать управляющий сигнал u , на основе которого с помощью исполнительного механизма ($ИМ_k$) подается управляющий поток ресурсов D_{uk} .

Определение величины управляющего потока осуществляется на основе следующих подходов:

- 1) опыта и интуиции диспетчера;
- 2) проверки эффективности тем или иным способом выбранных управляющих воздействий u на модели сети (Mod_c);
- 3) путем вычисления обратного k -ого динамического оператора соответствующего k -ого пути в сети:

$$u = L_{ck}^{-1}(z_k). \quad (4.2.1)$$

При этом динамический оператор сети (L_{ck}) определяется передачей потоков:

$$\Delta D_{hk} = L_{ck}(u), \quad (4.2.2)$$

где ΔD_{hk} – приращение потока D_{hk} при подаче D_{uk} к соответствующему узлу сети.

Отметим, что выражения (4.2.1), (4.2.2) записаны в обобщенной форме, в которой переменные z_k , u_k , D_{uk} , D_{zk} определены на множестве реализаций соответствующих процессов во времени. В этом случае динамические операторы L_{ck} и L_{ck}^{-1} представляют собой отображения, которые реализациям процессов на входе оператора ставят в соответствие реализации процессов на выходе оператора.

Рассмотрим алгоритмы парирования возмущающих потоков в сети.

В простейшем случае динамика в дугах сети описывается звеньями запаздывания. В этом случае при наличии чистого запаздывания обратные операторы осуществляют прогнозирование возмущений в сети. При учете процессов аккумуляции ресурсов в сети модель сети дополнительно содержит интегрирующие звенья. В этом случае ресурсов обратные операторы осуществляют «форсированное» прогнозирование возмущений в сети. При наличии помех измерений и других возмущающих воздействий решение поставленных задач парирования возмущений представляет собой сложную проблему.

В общем случае динамические характеристики сетей являются существенно нелинейными, так как зависимости напоров сети от величин потоков являются квадратичными. Однако при решении задач автоматического парирования возмущений в сети будем использовать линеаризованные представления. При больших погрешностях линеаризованных представлений вычисления парирующих потоков будем осуществлять рекуррентным методом, соответствующим алгоритму Ньютона решения нелинейных уравнений.

При данных предположениях алгоритм работы АСУ в автоматическом режиме на основе соотношения (4.2.1) будет обеспечивать компенсацию возмущений потоков D_{zk} и величины потоков на нагрузках D_{nk} будут стабилизированы. При этом рабочая станция диспетчера осуществляет вычисления в соответствии с соотношением (4.2.1) и отображает диспетчеру значение u – рекомендуемое решение задачи парирования возмущения z .

Алгоритмы решения указанных задач детально рассматриваются в следующих параграфах данной главы.

4.3 Построение обратных моделей динамики сетей для парирования возмущений в сетях

Решение следующего операторного уравнения позволит математически осуществить построение обратных моделей динамики:

$$D_z = L_c(u). \quad (4.3.1)$$

Однако задача построение обратных моделей динамики (4.3.1) является некорректно поставленной. Поэтому при решении данной задачи целесообразно использовать процедуру регуляризации.

Первый способ основан на использовании регуляризующего оператора α_R :

$$L_c(u) + \alpha_R u = D_z. \quad (4.3.2)$$

Тогда решение задачи будет проводиться согласно схеме, приведенной на рис. 4.3.1.

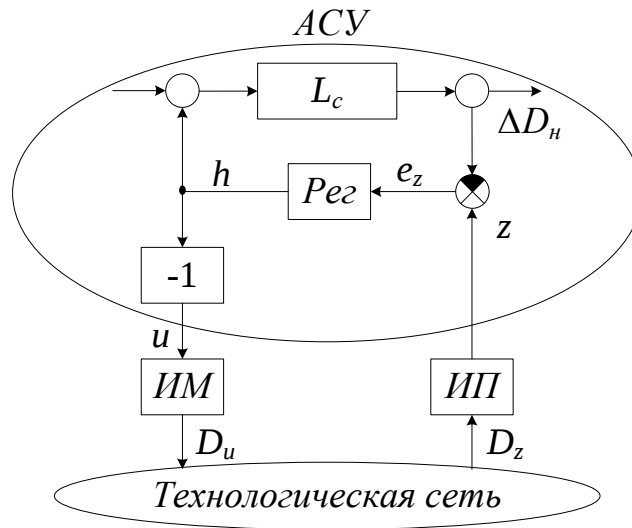


Рис. 4.3.1.

Здесь величина возмущающего потока z , полученная в результате измерения реального потока в сети D_z , поступает на специальную вычислительную схему, реализуемую в АСУ, которая содержит модель пути передачи входного парирующего сигнала h на выходной стабилизируемый поток D_n . Величина парирующего сигнала h вычисляется в расчетном контуре типа регулирующей отрицательной обратной связи, в котором полагается, что коэффициент усиления регулятора Peg равен α^{-1}_R . Структурно данный расчетный контур аналогичен контурам систем автоматического регулирования, которые формируют сигнал управления h из условия слежения приращения стабилизируемого потока ΔD_n за величиной возмущающего потока D_z . В этом случае подача парирующего сигнала $u = -h$ в реальную сеть через исполнительный механизм ($D_u = u$) приведет к компенсации возмущения D_u стабилизируемого потока ($\Delta D_n = -D_u$).

Модель сети с расчетными контурами регулирования будем называть расчетной моделью сети. Построение расчетной модели сети может быть выполнено с использованием известных методов теории автоматического управления. Используя расчетную модель сети, можно в реальном времени определять сигналы управления, парирующие возмущения потоков в технологической сети.

Второй способ парирования возмущений в сети основан на прямом построении обратных моделей динамики. В следующем параграфе рассматриваются методы построения обратных моделей динамики на основе экспоненциальной фильтрации.

4.4 Построение обратных моделей динамики на основе экспоненциальной фильтрации

Пусть передаточный оператор динамической макромоделли сети задан в дробно-рациональном виде со звеном запаздывания:

$$L_0(p) = \frac{1}{\sum_{i=0}^n a_i p^i} e^{-p\tau_3}. \quad (4.4.1)$$

Обращение оператора формально можно записать:

$$L_0^{-1}(p) = \sum_{i=0}^n a_i p^i \cdot e^{p\tau_3}. \quad (4.4.2)$$

На рис. 4.4.1 приведена схема определения обратного оператора.

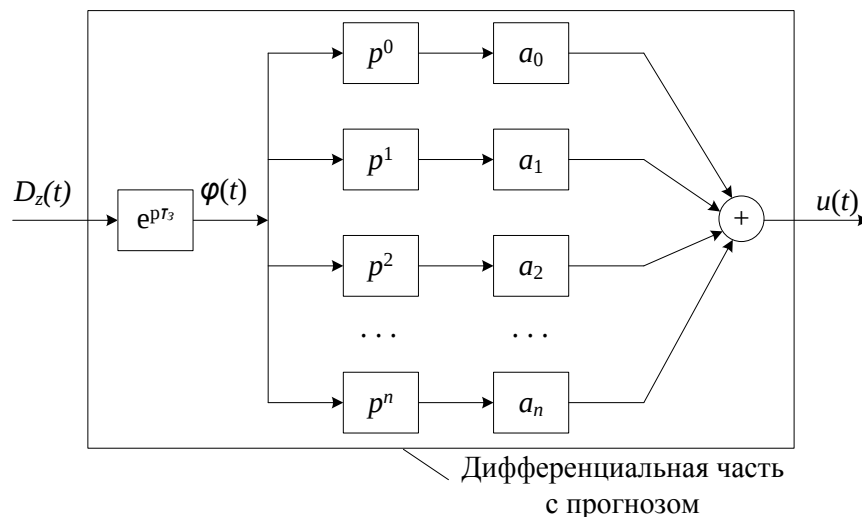


Рис. 4.4.1.

Рассмотрим задачу построения прогнозирующего фильтра при условии помех.

Пусть дано разложение воздействия в полиномиальном базисе:

$$D_z(t - \lambda) \approx \sum_{i=0}^n d_i(t) \lambda^i. \quad (4.4.3)$$

где λ – интервал ретроспективы; $d_i(t)$ – коэффициенты разложения входного сигнала $D_z(t)$ по координатным функциям λ^i .

Учитывая прогноз на время τ_3 можно записать соотношение (4.4.3) в виде:

$$D_z(t - (\lambda - \tau_3)) \approx \sum_{i=0}^n d_i(t) (\lambda - \tau_3)^i. \quad (4.4.4)$$

С использованием бинома Ньютона можно получить:

$$(\lambda - \tau_3)^i = \sum_{k=0}^i c_k \lambda^k \tau_3^{i-k} (-1)^{i-k}, \quad (4.4.5)$$

где c_k – биномиальные коэффициенты.

На основе подстановки соотношения (4.4.5) в (4.4.4), запишем выражение для воздействия с учетом временного прогноза τ_3 :

$$D_z(t - (\lambda - \tau_3)) \approx \sum_{i=0}^n d_i(t) \sum_{k=0}^i c_k \lambda^k \tau_3^{i-k} (-1)^{i-k}. \quad (4.4.6)$$

Искомый управляющий поток в сети определяется на основе соотношения:

$$u = L_c^{-1}(D_z). \quad (4.4.7)$$

С учетом (4.4.2), (4.4.4), (4.4.6) получим:

$$u(t) \approx \sum_{i=0}^n d_i(t) \sum_{k=0}^i c_k \tau_3^{i-k} (-1)^{i-k} (-1)^k k! a_k = \sum_{i=0}^n (-1)^i d_i(t) \sum_{k=0}^i k! c_k a_k \tau_3^{i-k}. \quad (4.4.8)$$

Формула (4.4.8) является основой для определения управляющих потоков D_u в сети, исходя из разложения возмущающих воздействий D_z в ряд $\sum_{i=0}^n d_i(t) \lambda^i$ на основе экспоненциальной фильтрации при известных параметрах

динамического оператора $L_c(u)$ пути распространения управляющего потока до узла приложения возмущающего потока.

Таким образом, структура обратного оператора будет иметь вид (см. рис. 4.4.2).

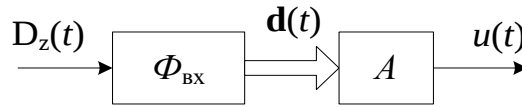


Рис. 4.4.2.

Здесь Φ_{BX} – экспоненциальный фильтр; A – матрица коэффициентов дифференциальной части обратного оператора; $\mathbf{d}(t)$ – вектор текущих коэффициентов разложения $d_i(t)$ входного сигнала $D_z(t)$ по функциям.

Рассмотрим далее реализацию обратного оператора в общем случае на фоне шумов.

Запишем передаточную функцию фильтра в виде:

$$u(t) = \int_0^{\infty} D_z(t - \lambda) w(\lambda) d\lambda. \quad (4.4.9)$$

Тогда разложение в спектр воздействия $u(t-\lambda)$ в формуле (4.4.9) можно записать в виде

$$u(t - \lambda) = \sum_{i=0}^n g_i(t) \lambda^i. \quad (4.4.10)$$

Отсюда получим выражение:

$$u(t) = \sum_{i=0}^n g_i(t) \int_0^{\infty} \lambda^i w(\lambda) d\lambda. \quad (4.4.11)$$

Сравнивая соотношения (4.4.11) и (4.4.8), запишем:

$$\int_0^{\infty} \lambda^i w(\lambda) d\lambda = \sum_{k=0}^i (-1)^k k! c_k a_k \tau_3^{i-k}. \quad (4.4.12)$$

Соотношение (4.4.12) является условием преобразования фильтром возмущающего воздействия $D_z(t)$ в воздействие $u(t)$ в соответствии с (4.4.8).

Введем условие: фильтром должна подавляться помеха, представляющая собой белый шум. При белом шуме дисперсию воздействия на выходе фильтра можно записать в виде:

$$D_0 = \int_0^{\infty} w^2(\tau) d\tau. \quad (4.4.13)$$

Поставим задачу нахождения весовой функции фильтра при условии минимума дисперсии сигнала D_0 :

$$C_i = \int_0^{\infty} \lambda^i e^{-c\lambda} w(\lambda) d\lambda, \quad i = 0, \dots, n. \quad (4.4.14)$$

Здесь c – абсцисса сходимости.

Поставленная задача представляет собой задачу определения минимума функционала Лагранжа:

$$D_0 - \sum_{i=0}^n 2\gamma_i \int_0^{\infty} \tau^i w(\tau) e^{-c\tau} d\tau, \quad (4.4.15)$$

где γ_i – множители Лагранжа.

Весовая функция находится по соотношению

$$w(\tau) = \sum_{i=0}^n \gamma_i \tau^i e^{-c\tau}, \quad (4.4.16)$$

где γ_i определяются из условий (4.4.12).

4.5. Расчет парового аккумулятора

Одним из центральных элементов паровой сети является паровой аккумулятор. Расчет парового аккумулятора осуществляется совместно с присоединяемыми к нему элементами сети. На рис. 4.5.1 приведена обобщенная расчетная схема аккумулятора.

Базовым уравнением, связывающим температуру, давление, и плотность пара является уравнение Клапейрона-Менделеева. Масса пара, содержащегося в паровом аккумуляторе, определяется через известный объем аккумулятора и плотность пара. Отличительной особенностью моделирования парового аккумулятора является то, что данный элемент является динамическим: расходы пара на входе и выходе аккумулятора равны только в установившемся режиме, при этом численные значения расходов зависят как от состояния самого аккумулятора (давления, массы пара), так и от давлений и расходов в остальных узлах и участках паровой сети. Таким образом, паровой аккумулятор описывается следующей системой уравнений:

$$\frac{P(t)}{\rho(t)} = R \cdot T(t),$$

$$\rho(t) = m(t) \cdot V_A,$$

$$m(t) = \int (G_{A.вх}(t) - G_{A.вых}(t)) dt,$$

где R – удельная газовая постоянная; $P(t)$ – давление пара в аккумуляторе, [Па]; $\rho(t)$ – плотность пара, [кг/м³]; $T(t)$ – температура пара, [°C]; $m(t)$ – масса пара, [кг]; V_A – объем парового аккумулятора, [м³]; $G_{A.вх}(t), G_{A.вых}(t)$ – расход пара на входе и выходе аккумулятора соответственно, [кг/с]; t – текущее время, [с].

Представленная выше система уравнений подходит для описания аккумулирующей способности однофазных паровых систем (не содержащих воды и конденсата), в частности, аккумулирующей способности паропроводов. Особенностью паровых аккумуляторов энергокорпуса является наличие двух сред: воды и пара.

Далее рассмотрим математическое описание пароводяного аккумулятора.

На рис. 4.5.1 приведена принципиальная схема макромодели парового аккумулятора.

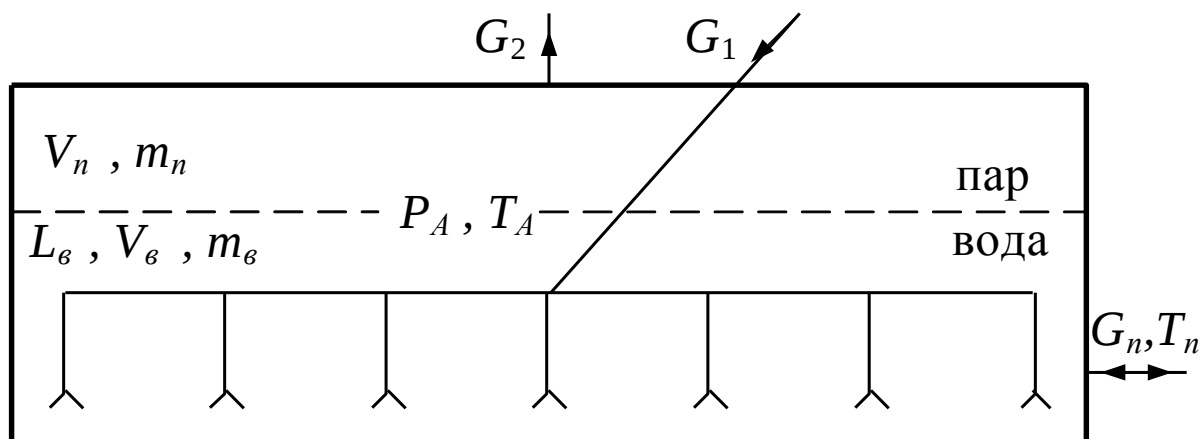


Рис. 4.5.1. Принципиальная схема макромодели парового аккумулятора

Здесь $P_A(t)$, $T_A(t)$ – давление [Па] и температура [°C] в паровом аккумуляторе соответственно; $m_в(t)$, $V_в(t)$, $L_в(t)$ – соответственно масса [кг], объем [м³] и уровень воды [м]; $m_n(t)$, $V_n(t)$ – масса [кг] и объем [м³] пара; $G_1(t)$, $G_2(t)$, $G_n(t)$ – соответственно расходы входящего, выходящего пара и подпитки [кг/с]; $T_n(t)$ – температура подпитки [°C].

Паровой аккумулятор рассматривается как объект с сосредоточенными параметрами, т.е. делается допущение, что температура и давление среды в любой точке парового аккумулятора в данный момент времени имеют одинаковые значения. Указанное допущение позволит упростить расчеты при сохранении точности, приемлемой для практического использования макромодели.

Расчет парового аккумулятора следует осуществлять совместно с присоединяемыми к нему элементами сети. На рис. 4.3.2 приведена обобщенная расчетная схема аккумулятора.

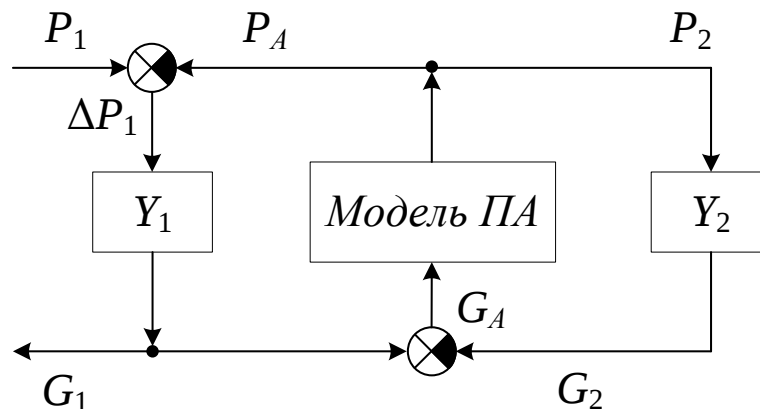


Рис. 4.5.2. Обобщенная расчетная схема аккумулятора

На рис. 4.5.2: P_1 , P_2 – напор входящего и выходящего пара в аккумулятор соответственно; Y_1 , Y_2 – проводимость присоединяемой к паровому аккумулятору части схемы от источников и потребителей соответственно.

На рис. 4.5.3 приведена структурная схема макромодели парового аккумулятора.

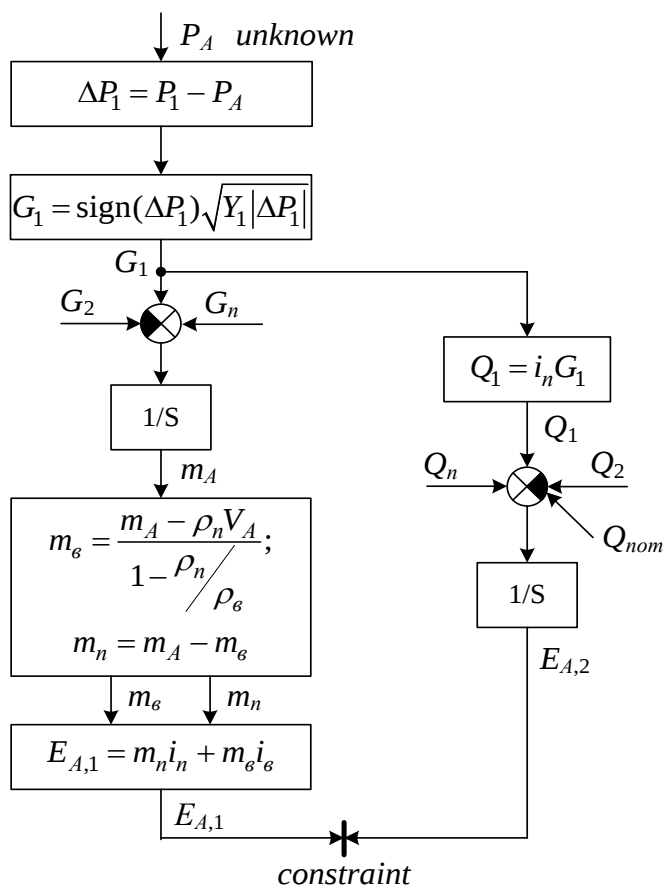


Рис. 4.5.3. Структурная схема макромодели парового аккумулятора

Макромодель парового аккумулятора описывается уравнениями, соответствующими описанным выше физическим процессам и структурной схеме (рис. 4.5.3.):

$$m_A(t) = m_e(t) + m_n(t);$$

$$V_n(t) = V_A - \frac{m_e(t)}{\rho_e(T_A(t))};$$

$$T_A(t) = f_{нас}(P_A(t));$$

$$m_A(t) = \int_0^t (G_1(t) - G_2(t) + G_n(t)) dt;$$

$$E_{A,1}(t) = m_e(t) \cdot i_e(t) + m_n(t) \cdot i_n(t);$$

$$E_{A,2}(t) = \int_0^t (Q_1(t) - Q_2(t) - Q_{nom}(t) + Q_n(t)) dt;$$

$$Q_1(t) = G_1(t) \cdot i_{n1}(t);$$

$$Q_2(t) = G_2(t) \cdot i_{n2}(t);$$

$$Q_{nom}(t) = K_n \cdot F_A \cdot (T_A(t) - T_{нар}(t));$$

$$Q_n(t) = G_n(t) \cdot i_n(t),$$

где $Q_1(t)$, $Q_2(t)$, $Q_n(t)$, $Q_{nom}(t)$ – тепловая мощность входящего и выходящего пара; $\rho_e(T_A(t))$ – зависимость плотности воды [кг/м³] от ее температуры; $f_{нас}(P_A(t))$ – зависимость температуры пара в состоянии насыщения от его давления; $i_e(t)$, $i_n(t)$, $i_{n1}(t)$, $i_{n2}(t)$, – энтальпия воды в аккумуляторе, питательной воды, входящего и выходящего пара соответственно [кДж/кг]; подпитки и потерь соответственно [кВт]; $E_A(t)$ – тепловая энергия, накопленная в паровом аккумуляторе [кДж]; V_A , F_A – объем [м³] и площадь [м²] поверхности парового аккумулятора; K_n – коэффициент передачи тепла от поверхности аккумулятора в окружающую среду [кДж/(кг °C)]; $T_{нар}(t)$ – температура наружного воздуха [°C]; $m_A(t)$ – масса воды и пара в паровом аккумуляторе [кг].

Паровые аккумуляторы (ПА) в количестве 7 штук входят в состав энергокорпуса и определяют режим его работы. Энергокорпус является центральным элементом пароснабжения промплощадки ККЦ и КХП.

Макромодель СУ зарядно-разрядными процессами ПА представлена на рисунке 4.5.4. Здесь приняты следующие обозначения: P_{A0} – максимальное допустимое значение давления пара в паровом аккумуляторе; ΔP_A – разность P_{A0} и P_A ; Reg – пропорционально-интегральный регулятор; $G_{св}$ – расход пара на свече; $G_{ОКГ}$ – расход пара от котлов ОКГ.

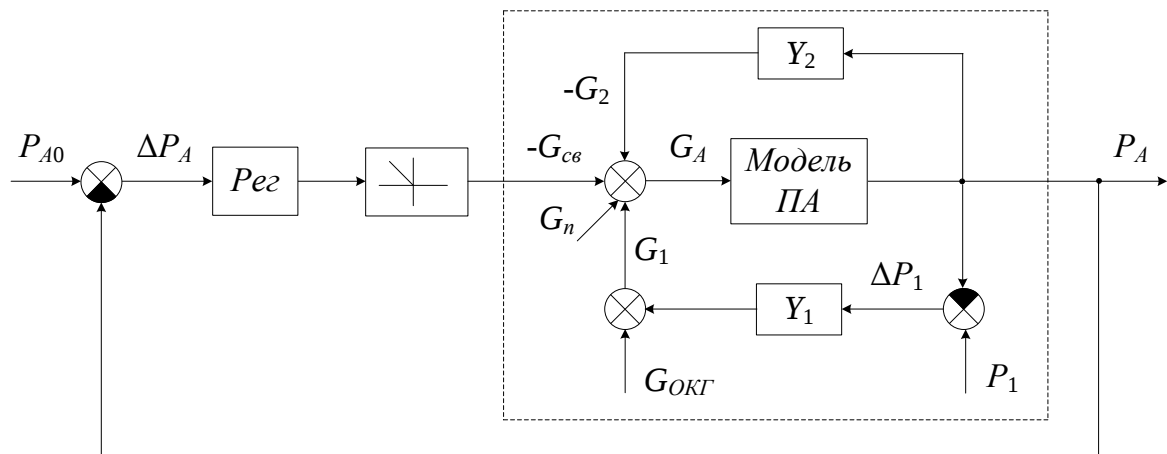


Рис. 4.5.4. Макромодель СУ зарядно-разрядными процессами ПА

Здесь приняты следующие обозначения: P_{A0} – максимальное допустимое значение давления пара в паровом аккумуляторе; ΔP_A – разность P_{A0} и P_A ; Reg – пропорционально-интегральный регулятор; $G_{св}$ – сброс пара в атмосферу через свечу; $G_{ОКГ}$ – расход технологического пара от котлов охладителя конверторных газов.

В приведенной системе управления основным технологическим параметром для регулирования является давление пара. Заряд парового аккумулятора происходит от источников пара. Ограничение давления пара производится с помощью регулятора Reg следующим образом. Когда давление пара P_A становится выше максимально допустимого P_{A0} , ΔP_A становится отрицательной, происходит постепенное открытие клапана на свече 1 под управлением Reg в

следящем режиме. При снижении давления пара в аккумуляторе до допустимого уровня сброс пара через свечу автоматически прекращается.

Расход G_2 в приведенной макромодели (рис. 4.5.5) определяется согласно структурной схеме, представленной на рис. 4.5.5.

На рис. 3.5.5 приняты следующие обозначения:

G_{BPT} – расход пара от турбины BPT-25 ПВЭС-2;

G_{POY} – расход пара от ЦЭС РОУ-2;

G_{K2} – расход пара от котельной №2 ЛПЦ-10;

T_1, T_2, T_3 – терминалы диспетчеров ПВЭС-2, ЦЭС, котельной № 2 соответственно;

$R_{ППУ}$ – сопротивление ППУ;

$Y_{ST-3}, Y_{ЛПЦ}$ – проводимости станции ST-3 и ЛПЦ 6-8 соответственно;

$P_{ППУ}$ – давление на ППУ;

$G_{ППУ}$ – расход пара на ППУ;

G_{ST-3} – расход пара на станции ST-3;

$G_{ЛПЦ}$ – расход пара на ЛПЦ 6-8;

$G_{Вак}$ – расход пара на вакууматоре;

τ_1, τ_2, τ_3 – время запаздывания подачи пара от турбины BPT-25 ПВЭС-2, ЦЭС РОУ-2 и котельной №2 ЛПЦ-10 соответственно.

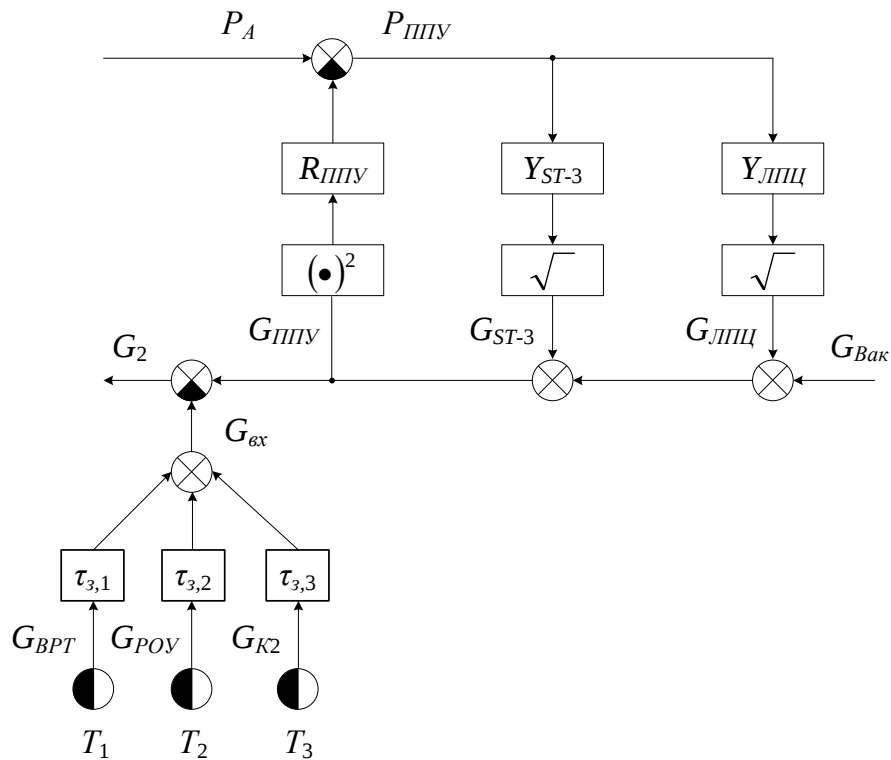


Рис. 4.5.5. Структурная схема определения расхода пара G_2

На рис. 4.5.5 расход пара, потребляемый вакууматором при его работе, представляет собой возмущающий поток. Для парирования указанного возмущения используются потоки пара от турбины ВРТ-25 ПВЭС-2, ЦЭС РОУ-2 и котельной №2.

Расчетная схема моделирования рассматриваемой системы пароснабжения, основанная на применении описанных выше методов моделирования и математических моделях.

4.6. Выбор оптимального варианта функционирования систем паро- и теплоснабжения

В работе приведены результаты оптимизации выработки электроэнергии на электрических станциях ПАО «ММК» с учетом режимов отпуска тепловой энергии в зависимости от фактических гидравлических режимов работы тепловых сетей.

Целью оптимизационной задачи является максимизация выработки электроэнергии на электрических станциях:

$$\max \sum_s W_{\text{эс}}, \quad (4.6.1)$$

где $W_{\text{эс}}$ – выработка электрической энергии s -ой электростанцией.

В работе выработка электрической энергии представляется как:

$$W_{\text{эс}} = f_s(Q_{\text{мфс}}, Q_{\text{нс}}^{\text{тех}}), \quad (4.6.2)$$

где $Q_{\text{мфс}}$, $Q_{\text{нс}}^{\text{тех}}$ – соответственно отпуск тепла и пара технологию электростанцией.

Идентификация рабочих характеристик осуществляется с использованием режимных карт оборудования источников: котельных агрегатов и турбогенераторов. Проверка правильности построенных моделей проводится на фактических данных эксплуатации.

Для примера приведены результаты идентификации рабочих характеристик потребления природного газа и выработки электрической энергии ТЭЦ.

В результате идентификации получена рабочая характеристика потребления природного газа ТЭЦ, представляющая выражение:

$$B_{\text{нг}} = 5,7240 + 0,0658D_0, \quad (4.6.3)$$

где $B_{\text{нг}}$ – потребление природного газа, м³/ч; D_0 – выработка пара, т/ч.

Рабочая характеристика выработки электрической энергии ТЭЦ, полученная при идентификации, имеет следующий вид:

$$W_{\text{э}} = -29,9690 + 0,2807D_0 + (-0,1062)D_m, \quad (4.6.4)$$

где $W_{\text{э}}$ – выработка электроэнергии, МВт; D_0 – выработка пара, т/ч; D_m – отпуск пара на теплофикацию, т/ч.

Следует отметить, что в приведенных соотношениях (4.6.3), (4.6.4) выработка пара D_0 представляет собой функцию вида:

$$D_0 = f(D_n), \quad (4.6.5)$$

где D_n – расход пара на технологию, т/ч.

Идентификация зависимости (4.6.5) производится по фактическим данным эксплуатации.

Для примера приведены результаты идентификации рабочих характеристик потребления природного газа и выработки электрической энергии ЦЭС.

В результате идентификации получена рабочая характеристика потребления природного газа ЦЭС, представляющая следующие аналитическое выражение:

$$B_{ng} = 4,1978 + 0,0801D_0 + (-0,0963)B_{dg}, \quad (4.6.6)$$

где B_{ng} , B_{dg} – потребление природного и доменного газа соответственно, м³/ч; D_0 – выработка пара, т/ч.

Рабочая характеристика выработки электрической энергии ЦЭС, полученная в результате идентификации, имеет вид:

$$W_g = -8,9372 + 0,2065D_0 + (-0,0833)D_m, \quad (4.6.7)$$

где B_{ng} – потребление природного газа, м³/ч; D_0 – выработка пара, т/ч; D_m – отпуск пара на теплофикацию, т/ч.

В приведенных соотношениях (4.6.6), (4.6.7) выработка пара D_0 представляет собой функцию вида (4.6.5) вследствие того, что при использовании расчетной схемы пароснабжения можно определить именно расход пара на технологию как сумму расходов пара потребителей, «питающихся» от данного источника.

С использованием рассмотренных выше методик разработана программная макро модель системы паро- и теплоснабжения промплощадки ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (г. Магнитогорск, Россия), учитывающая 6 источников теплофикационной воды и 9 источников пара, около 140 потребителей теплофикационной воды и около 50 потребителей пара, а также 180 км тепловых сетей и 300 км паровых сетей. Разработка программной макро модели осуществлялась в среде моделирования и визуализации VisSim.

Для иллюстрации на рис. 4.6.1 приведен видеокадр макро модели системы паро- и теплоснабжения. На рис. 4.6.3 приняты следующие обозначения: синие линии – паропроводы низкого давления; красные линии – паропроводы высокого

давления; зеленые линии – трубопроводы системы теплоснабжения; блоки серого цвета – источники; блоки белого цвета – потребители.

Макромодель визуализирует структурные схемы сетей паро- и теплоснабжения с разной степенью детализации. Структурная схема построена в ориентированных связях, отражающих направления потоков в сети. Направление движения теплоносителя в нормальном режиме работы указано стрелкой на трубопроводе.

Разработанная макромодель позволяет рассчитывать выработку электроэнергии на основании режимных карт работы котлов электрических станций, в качестве примера, а также производить определение эффективного режима работы сетей за счет перераспределения паровой и теплофикационной нагрузки сети между станциями ТЭЦ и ЦЭС.

Таблица 4.6.1

Режим работы	ТЭЦ		ЦЭС	
	Тепловая нагрузка, Гкал/ч	Выработка э/э, МВт	Тепловая нагрузка, Гкал/ч	Выработка э/э, МВт
Существующий	70	288,82	53	199,55
Энергоэффективный	40	289,68	63	201,82
Изменение выработки э/э, МВт	+0,86		+2,27	

На рис. 4.6.1, 4.6.2 показаны видеокадры моделирования систем паро- и теплоснабжения в летний период работы при существующем и энергоэффективном режимах теплоснабжения соответственно.

Разработанная программная макро модель позволяет моделировать статические и динамические режимы систем паро- и теплоснабжения, зарядно-разрядные процессы паровых аккумуляторов, а также работу потребителей с резко выраженной переменной нагрузкой, к которым, например, относится установка вакуумирования стали.

Кроме того, разработаны модели источников паро- и теплоснабжения, потребляющих природный газ и (или) вырабатывающих электрическую энергию. К подобным источникам относятся электростанции и некоторые котельные. Моделирование источников паро- и теплоснабжения происходит на основе их рабочих характеристик с целью оценки потребления природного газа и выработки электрической энергии.

Результаты проведенной опытной эксплуатации программной макро модели показали, что макро модель обладает достаточной для практического использования точностью моделирования и может быть рекомендована для оперативного управления сетями паро- и теплоснабжения, а также для решения задач по выбору оптимальных вариантов функционирования систем паро- и теплоснабжения по критерию максимума выработки электрической энергии на электрических станциях (минимума потребления природного газа).

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 4

1. Перспективным подходом для оперативного управления крупномасштабными сложными сетями тепло- и пароснабжения металлургических предприятий является применение динамического макро моделирования, основанного на использовании сигнально-ориентированных моделей, отражающих причинно-следственные связи параметров сетей. Особенностью функционирования данных сетей является то, что они относятся к классу крупномасштабных сложных нелинейных систем. Сети, как правило, включают в себя десятки источников, сотни потребителей, сотни километров теплотрасс. Кроме того, сети металлургических предприятий характеризуются выраженной динамикой потребления ресурсов, обусловленной переменными режимами работы технологического оборудования. Управление подобными сетями необходимо осуществлять с использованием макромоделей.

2. Для решения задач оперативного управления в сетях технологического пароснабжения в работе предложена макро модель распределенной сети пароснабжения демпфирования резко переменных нагрузок системой управления зарядно-разрядными процессами паровых аккумуляторов. В данной модели регулируемым параметром является давление пара в аккумуляторе. Ограничение давление пара в аккумуляторе осуществляется с помощью специального регулятора давления, который настраивается на минимум потерь пара на свече при его избытке в сети.

3. Предложена структура АСУ распределенной технологической паровой сети металлургического производства, реализующей оперативное управление с использованием предложенных подходов.

4. Разработана комплексная динамическая макро модель сетей тепло- и пароснабжения промплощадки ПАО «ММК», учитывающая 5 источников тепла, около 140 потребителей тепла, 180 км тепловых сетей, 9 источников пара, 50 потребителей пара, 300 км паровых сетей и содержащая более 41 тыс. функциональных блоков.

5. Алгоритмы парирования потоковых возмущений в технологической сети целесообразно строить с использованием обратных моделей динамики путей передачи входных управляющих потоков к входным узлам потоковых возмущений в сети. В этом случае достигается компенсация возмущений в сети, что обеспечивает стабилизацию потоков на входах потребителей.

6. Построение обратных моделей динамики путей передачи потоков в сети является некорректно поставленной задачей. В работе предложены два метода регуляризации данной некорректно поставленной задачи. Первый метод основан на введении в модель сети расчетных контуров регулирования, которые позволяют в режиме реального времени определять величины парирующих потоков. Второй метод основан на непосредственном решении задачи построения обратной модели динамики пути передачи потока в сети с использованием экспоненциальной фильтрации.

ГЛАВА 5. АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ АНАЛИЗА ДАННЫХ

5.1 Общая структура системы интегрированной системы управления ресурсами на промышленной площадке ПАО «ММК»

В пятой главе на основе проведенного системного анализа с использованием концепции ресурсосберегающей станции рассматривается структура задач интегрированного планирования и управления энергетической эффективностью металлургического комплекса предприятия.

Указывается, что в энергетическом комплексе металлургического производства процессы потребления, генерации и преобразования энергетических ресурсов характеризуются сложными взаимосвязями.

Энергетическая подсистема в структуре металлургического производства хотя и является одной из главных при проведении энергосберегающих работ, однако конечный эффект энергосбережения в рамках методологии интегрированного планирования и управления ресурсами должен рассматриваться в комплексе с основными металлургическими цехами. В этом плане на рисунке 5.1.1 представлена структура снижения себестоимости металлургической продукции во взаимосвязи теплоэнергетической подсистемы и технологической линии металлургического производства.

Учет этих связей позволяет достичь более высокой эффективности энергосберегающих мероприятий. Поэтому в работе были проведены исследования по повышению эффективности доменного процесса, который является самым энергозатратным звеном в технологической линии производства. Более того доменное производство тесно связано с теплоэнергетической подсистемой, т.к. на основе утилизации доменного газа достигается снижение потребления природного газа.

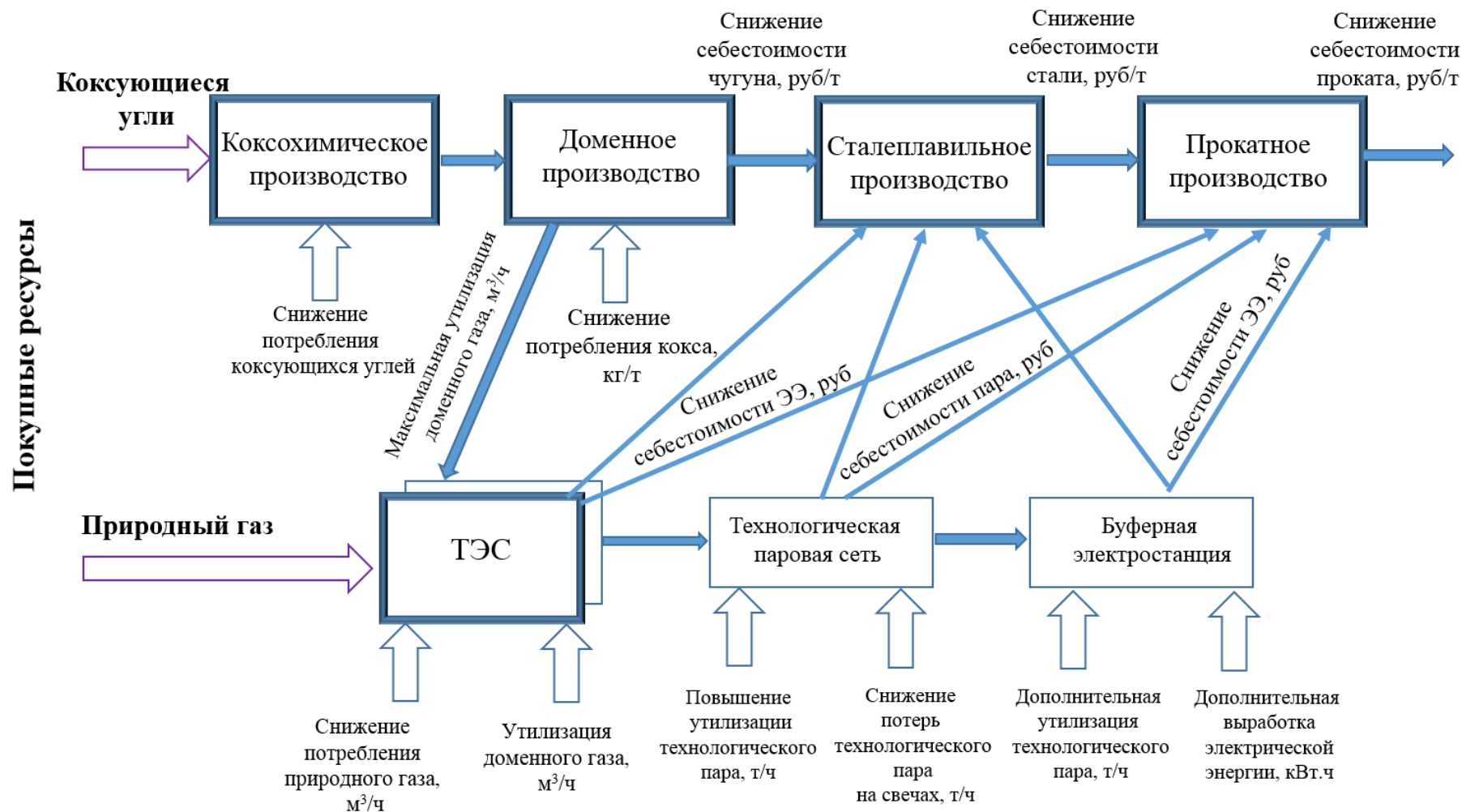


Рис. 5.1.1. Структура снижения себестоимости конечной продукции в рамках интегрированного планирования и управления металлургическим комплексом

В работе рассматриваются вопросы эффективного управления доменным процессом, как составной частью комплексной задачи интегрированного планирования и управления ресурсами в энергометаллургическом технологическом комплексе.

Энергетическая подсистема в структуре металлургического производства хотя и является одной из главных при проведении энергосберегающих работ, однако конечный эффект энергосбережения в рамках методологии интегрированного планирования и управления ресурсами должен рассматриваться в комплексе с основными металлургическими цехами. Учет этих связей позволяет достичь более высокой эффективности энергосберегающих мероприятий. Поэтому в работе были проведены исследования по повышению эффективности доменного процесса, который является самым энергозатратным звеном в технологической линии производства. Более того доменное производство тесно связано с теплоэнергетической подсистемой, т.к. на основе утилизации доменного газа достигается снижение потребления природного газа.

В работе рассматривается задача определения выхода колошникового газа с доменных печей с целью минимизации потребления кокса. Данная задача связана с основной задачей минимизации потребления природного газа рассматриваемым энергетическим комплексом.

На рисунке 5.1.2 представлен пример графика 3D-поверхности представления выхода доменного газа доменной печи от технологических параметров доменной плавки.

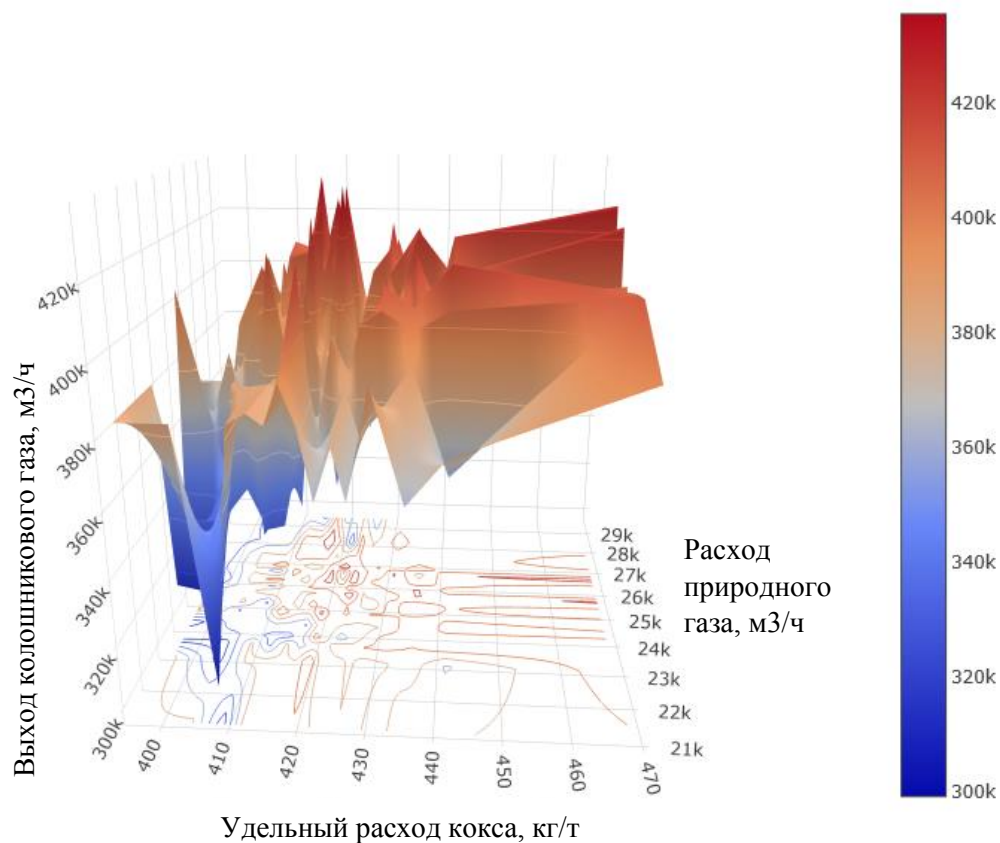


Рис.5.1.2. 3D-график поверхности выхода доменного газа доменной печи

В работе разрабатывается автоматизированная адаптивная система формирования оптимальных режимов работы доменных печей (локальных целей управления для уровня) по нагреву печей, структуре металлошихты, расходу природного газа, кислорода с учетом текущих и планируемых параметров качества кокса, железорудного сырья, дутья, технического состояния оборудования, ремонтной программы, предназначенная для работы в режиме советчика начальнику ДЦ.

Критериями оптимального адаптивного управления должны являться:

- а) максимум производства чугуна;
- б) минимума удельного расхода кокса.

Реализация адаптивного управления выполняется на основе нахождения реальных эффективных характеристик доменного процесса для каждой доменной печи путем применения имитационного моделирования и интеллектуального анализа фактических статистических данных эксплуатации.

Адаптивное управление режимом работы доменных печей будет обеспечивать:

а) определение границ потенциальных возможностей достижения высоких значений показателей эффективности доменного процесса согласно заданным критериям адаптивного управления в многомерном пространстве влияющих факторов агло-коксо-доменного производства, включая характеристики качества кокса, железорудного сырья, дутья и др. параметры доменной плавки (не менее 70 параметров);

б) определение резервов снижения потребления кокса и повышения производительности, которые можно достичь при оптимальном выборе режима доменной печи по сравнению с текущим или заданным базовым режимом;

в) обоснованный выбор режима работы печи, исходя из потенциальных возможностей повышения производительности, минимизации расхода кокса при заданном качестве кокса, доли агломерата и заданных требованиях на тепловое состояние доменной плавки;

г) формирование оптимальных воздействий адаптивного управления режимом работы доменных печей по выборке управляющих факторов, задаваемой пользователем, в многомерном факторном пространстве влияющих факторов согласно заданным критериям управления и технологическим ограничениям;

д) контроль текущих режимов на их соответствие оптимальным режимам и потенциальным резервам повышения эффективности доменного процесса;

е) построение многомерных областей неуплощаемых решений по основным показателям, характеризующим доменную плавку, включая качественные характеристики кокса, металлошихты, горячего дутья, для последующего использования при решении оптимизационных задач на технико-экономическом уровне управления агло-коксо-доменным производством.

Особенностью построения математических зависимостей, представленного в работе, является использование программных средств глубинного анализа статистических данных эксплуатации (Data Mining), кластерный анализ на основе обучения нейронной сети Кохонена для выявления зависимостей влияния управляющих параметров на экономически значимые параметры ведения доменного процесса, производительность и расход кокса, и выявления оперативных корректировок работы доменной печи, для повышения энергетической эффективности.

Распознавание областей повышения качества доменного процесса осуществляются при определении семейства парных зависимостей технологических факторов между собой.

Область повышения качества определяется, как область данных, при которых происходит только увеличение производительности доменной печи. При этом области негативного влияния и область нейтрального влияния параметров на производительность доменной печи считаются для советчика мастера запрещенными областями работы.

Распознавание областей, для исследования производилось с помощью программного комплекса SPSS. На рисунках 5.1.3 – 5.1.5 представлены графические трехмерные представления исследования режимов работы доменной печи.

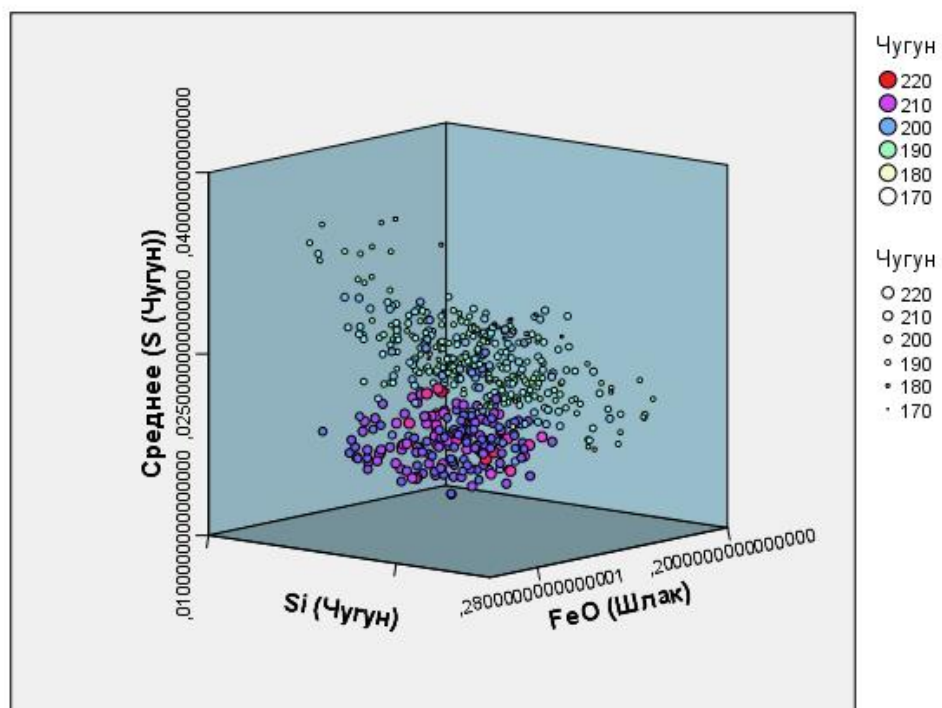


Рис. 5.1.3

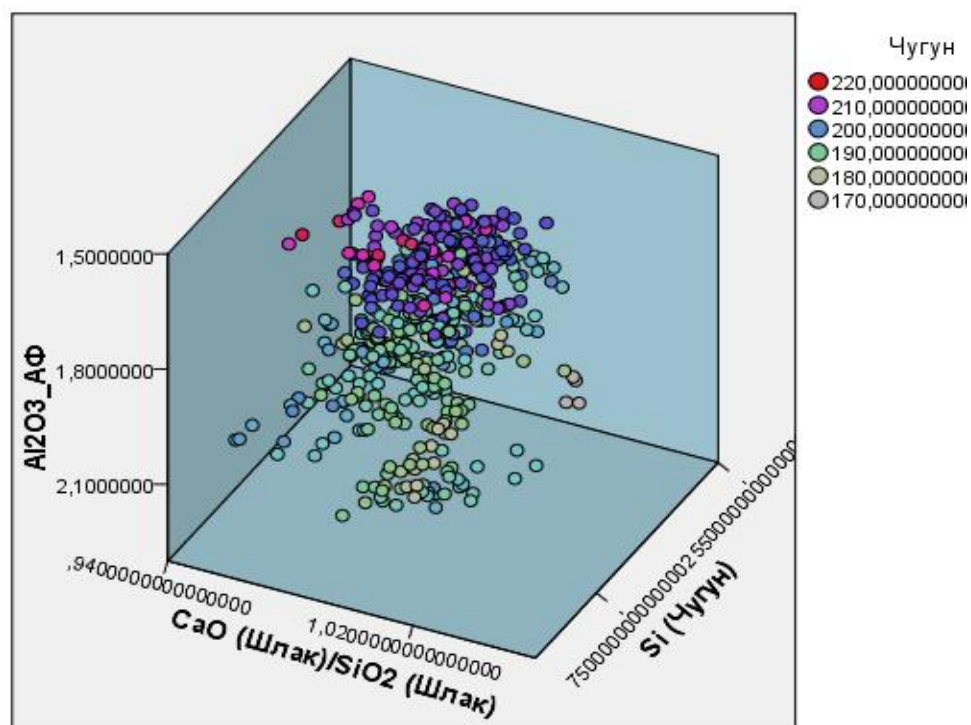


Рис. 5.1.4

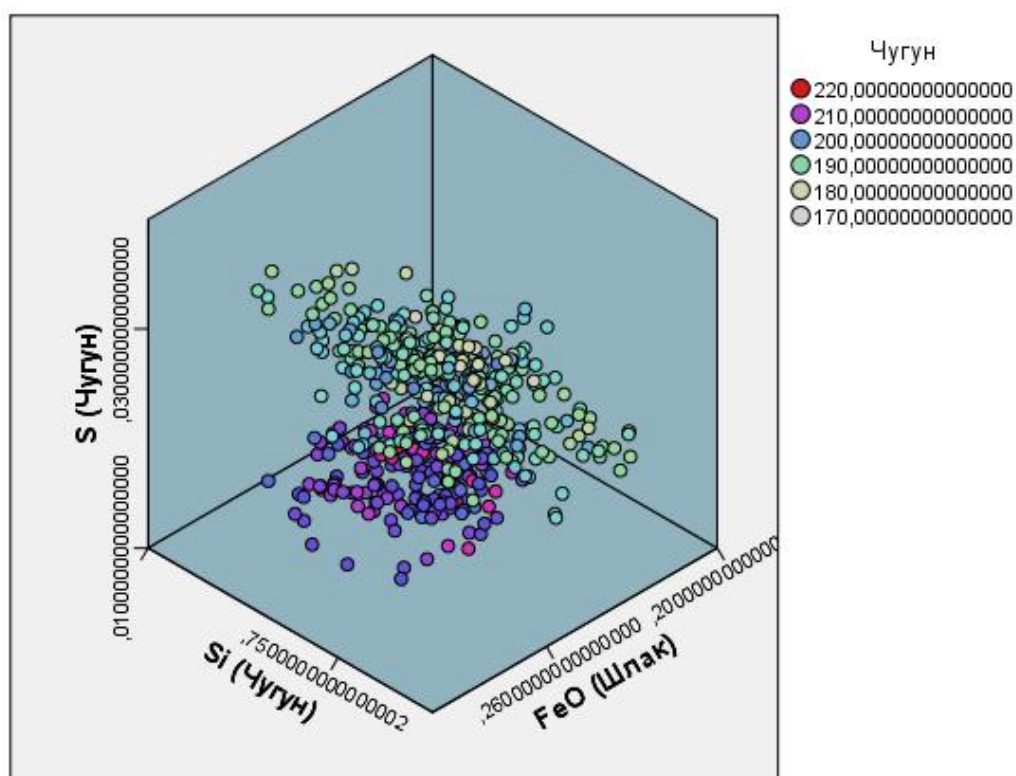


Рис. 5.1.5

5.2. Анализ характеристик доменных процессов с использованием нейронных сетей Кохонена

Из-за сложности доменного процесса статистика работы не отражает реальных взаимосвязей показателей, что приводит к противоречивым результатам, например, как на рисунке 5.2.1, где показана зависимость расчетной производительности девятой доменной печи (тонн чугуна в сутки) от показателя качества кокса M_{10} . Влияние многомерной совокупности факторов приводит к результату противоречащему физическому смыслу с точки зрения проекции на двумерную плоскость, т.к. чем ниже M_{10} , тем выше газопроницаемость шихты, а, следовательно, и производство чугуна.

Решение проблемы одновременного влияния большого числа факторов на доменный процесс лежит в области разделения статистических данных на

кластеры – режимы работы доменной печи. Каждый режим представляет собой набор данных одновременно близких по всей совокупности параметров.

Критерием качества разбиения данных на кластеры можно считать физический смысл зависимостей между основными технико-экономическими показателями доменного процесса, а именно производительность доменной печи и удельный расход кокса, и основными управляющими факторами, а именно M_{10} , доля агломерата, расход природного газа, расход холодного дутья, содержание кислорода в дутье, температура дутья. Дополнительным подтверждением правильности разбиения должны служить индикаторы состояния протекания доменного процесса, а именно содержание кремния в чугуне.

На рисунке 5.2.1 схематично представлена графическая интерпретация данного подхода. Жирной линией обозначена общая зависимость между показателями, а пунктирными зависимости между показателями внутри кластеров.

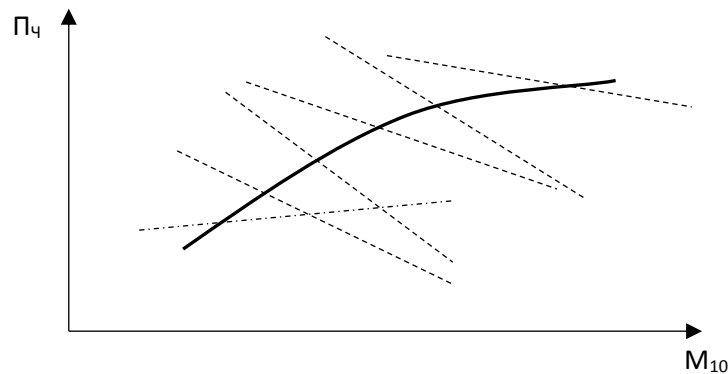


Рис. 5.2.1. Схематичное представление предлагаемого подхода

Число критерий качества разбиения можно обозначить как взвешенное количество физически корректно разбитых кластеров к количеству физически некорректно разбитых. Веса определяются на основе экспертизы в зависимости от важности взаимозависимости переменных.

При разбиении можно пользоваться следующими методами кластеризации: нейросетевой метод карт Кохонена, метод К-средних, иерархический метод классификации.

При функционировании автоматизированной системы пользователь задает основные характеристики доменного процесса, касательно дутья и сырья, а также индикаторы состояния доменного процесса. На основе полученного разбиения определяется какой из режимов наиболее близок данному набору данных. Характеристики зависимостей удельного расхода кокса и производительности доменной печи от M_{10} и доли агломерата используются из ближайшего кластера для расчета ожидаемого эффекта или оптимизации.

Таким образом система интерактивно реагирует на изменяющиеся начальные условия расчета.

В критерий качества при кластеризации включены следующие уравнения регрессий:

$$ПЧ = a_0 + a_1 \cdot M_{10} \ (a_1 < 0);$$

$$УРК = a_0 + a_1 \cdot M_{10} \ (a_1 > 0);$$

$$ПЧ = a_0 + a_1 \cdot ДА + a_2 \cdot ДА^2 \ (a_2 < 0);$$

$$УРК = a_0 + a_1 \cdot ДА + a_2 \cdot ДА^2 \ (a_2 > 0);$$

$$ПЧ = a_0 + a_1 \cdot РПГ \ (a_1 < 0);$$

$$УРК = a_0 + a_1 \cdot РПГ \ (a_1 < 0);$$

$$РХД = a_0 + a_1 \cdot M_{10} \ (a_1 < 0);$$

$$РХД = a_0 + a_1 \cdot ДА + a_2 \cdot ДА^2 \ (a_2 < 0);$$

$$ПЧ = a_0 + a_1 \cdot Si \ (a_1 < 0);$$

$$УРК = a_0 + a_1 \cdot Si \ (a_1 > 0);$$

$$Si = a_0 + a_1 \cdot РПНУ \ (a_1 > 0),$$

где

$ПЧ$ – производительность доменной печи в сутки, т/сутки;

$УРК$ – удельный расход кокса, кг/т чугуна;

M_{10} – показатель истираемости кокса, %;

$ДА$ – доля агломерата в железорудной шихте, %;

$РПГ$ – расход природного газа, м³/час;

$РХД$ – расход холодного дутья, м³/час;

РПНУ – расход пара на увлажнение, т/час.

Исследование характеристик доменного процесса проводилась на статистических данных работы доменной печи за три года 2014-2017.

В таблице 5.2.1 размещена информация о данных: максимальное, среднее, минимальное значения наблюдений по основным технико-экономическим параметрам работы исследуемой доменной печи. Всего в выборке участвуют 886 наблюдений и 39 параметров.

Таблица 5.2.1

Информация об исходных данных исследуемой доменной печи

Параметр доменного процесса	Минимальное значение в выборке	Максимальное значение в выборке	Среднее значение	Единица измерения
Расчётный чугун	4743,3	5578,2	5163,5	т
Удельный расход кокса	412,9	485,1	442,9	кг/т
Содержание кремния в чугуне	0,53	0,95	0,72	%
Истираемость (<i>M10</i>)	7,6	10,03	8,8	%

Для преодоления указанной сложности, связанной с необходимостью оценки взаимосвязей большого количества режимных параметров печи, в данной работе предлагается вариант построения режимных карт ведения доменного процесса на основе использования самоорганизующихся карт Кохонена [111] (англ. Self-organizing map – SOM). Построение самоорганизующихся карт Кохонена является проецирование многомерного пространства в двумерное пространство.

Самоорганизующиеся карты Кохонена (SOM) применяются при необходимости поиска закономерностей в больших массивах данных (big data), решении задач моделирования, прогнозирования работы технологических объектов.

U-matrix (unified distance matrix) – матрица, которая является представлением расстояния между векторами соседних нейронов. Расстояние между нейронами M_p и M_q определяется по формуле:

$$D(M_p, M_q) = \sqrt{\sum_{i=0}^n (m_i^p - m_i^q)^2},$$

где n – число параметров, участвующих в обучении,

$M_k = \{m_1^k, \dots, m_n^k\}$ – вектор весов k -ого нейрона.

Таким образом, элементы матрицы расстояний U-matrix рассчитываются как среднее значение расстояний между нейроном и его соседями.

На рисунке 5.2.2 представлена визуализация U-matrix.

Чем ближе друг к другу располагаются нейроны в n -мерном пространстве, тем более темным синим цветом они обозначены. Можно определить, что темно-синим цветом обозначены нейроны, которые определяют регулярные данные, а красным выбросы.

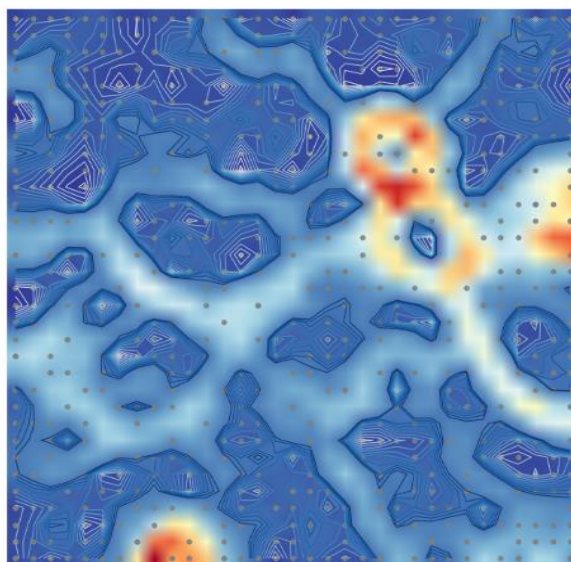


Рис. 5.2.2. Пример визуализации U-matrix

Построение самоорганизующихся карт (вариант 1)

Набор параметров (вариант 1) для построения самоорганизующихся карт (агрегированные данные по ДП№10 с января 2014 г. по июнь 2016 г.):

1. Расчетная выработка чугуна, т/сутки.
2. Удельный расход кокса, кг/т.
3. Содержание Si в чугуне, %.
4. Титановый модуль $TiO_2_{ш}/Ti$.
5. Степень использования колошникового газа $CO_2/(CO+CO_2)$, %.
6. Перепады давлений общий, атм.
7. Перепады давлений нижний, атм.
8. Перепады давлений верхний, атм.
9. Давление колошникового газа, атм.
10. Теоретическая температура горения, °С.
11. Температура материалов на входе в фурменные очаги t_2'' , °С.
12. Температура материалов на выходе из фурменных очагов t_4'' , °С.

В качестве примера построенные карты для указанных выше параметров приведены на рис. 5.2.3.

На рис. 5.2.4 приведена соответствующая самоорганизующаяся карта Кохонена кластеров режимов.

На рис. 5.2.5 приведена самоорганизующаяся карта Кохонена линий уровней ведения доменного процесса для ДП№10.

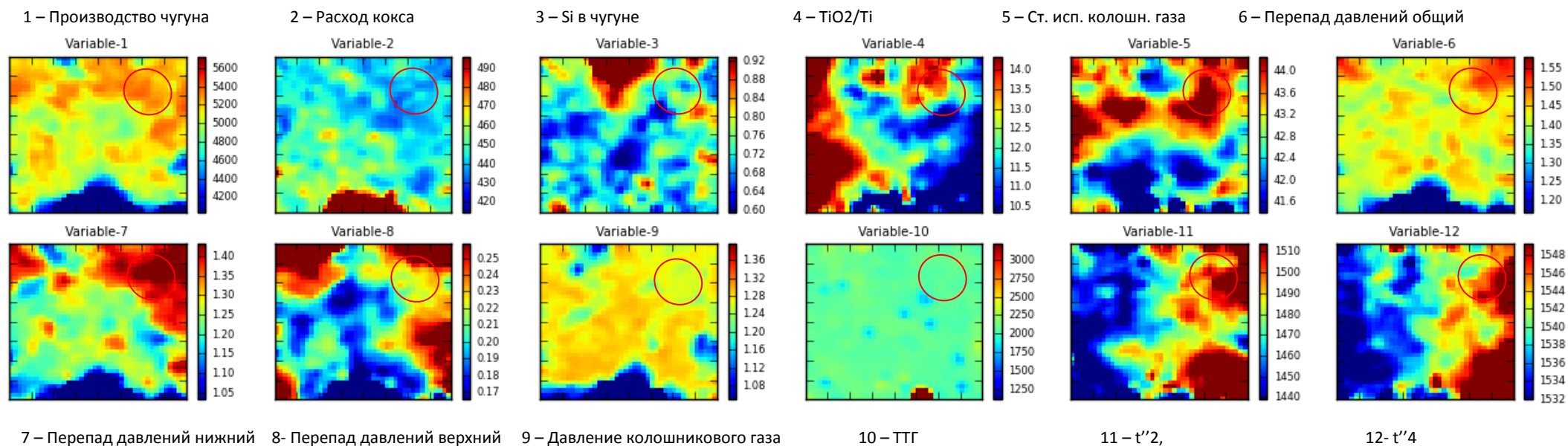


Рис. 5.2.3. SOM карты ДПН₁₀ (набор параметров №1)

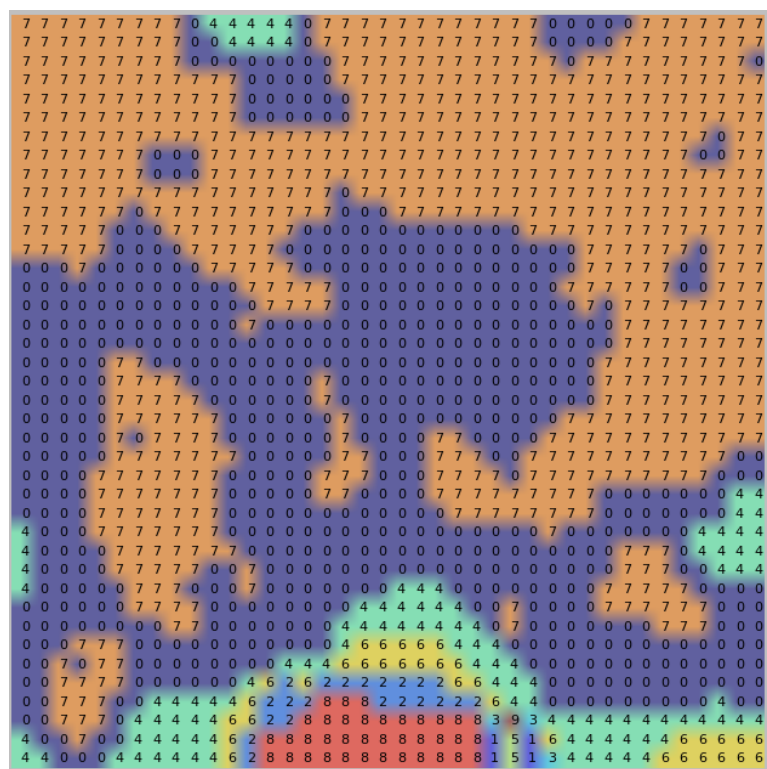


Рис. 5.2.4. SOM карта кластеров режимов ДП№10 (набор параметров №1)

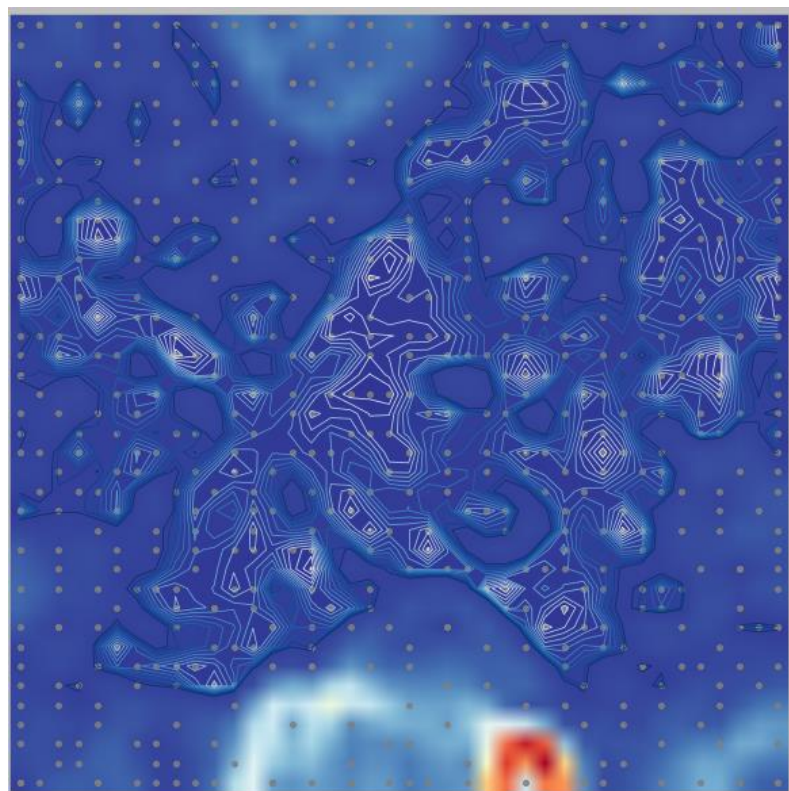


Рис. 5.2.5. SOM карта линий уровней ведения доменного процесса для ДП№10 (набор параметров №1)

Построение самоорганизующихся карт (вариант 2)

Набор параметров №2 построения самоорганизующихся карт (агрегированные данные по ДПП№10 с января 2014 г. по июнь 2016 г.):

1. E – целевой показатель эффективности доменной плавки.
2. Производительность доменной печи, т/сутки.
3. Удельный расход кокса, кг/т.
4. Содержание Si в чугуна, %.
5. Доля агломерата, %.
6. Вес агломерата, т/сутки.
7. Выход шлака, т/сутки.
8. $M10$, %.
9. CRI , %.
10. Содержание кислорода в дутье O_2 , %.
11. Расход пара на увлажнение, т/ч.
12. Давление горячего дутья, атм.
13. Расход холодного дутья, $m^3/ч$.
14. Расход природного газа, $m^3/ч$.
15. Перепады давлений общий, атм.
16. Перепады давлений нижний, атм.
17. Перепады давлений верхний, атм.
18. Давление колошникового газа, атм.

Целевой показатель эффективности доменной плавки описывается на базе частных показателей эффективности, таких как выработка чугуна и удельный расход кокса, нормированных по соотношениям:

$$n_q = \frac{P_q}{P_{q\text{ ср}}}, \quad e_k = \frac{B_k}{B_{k\text{ ср}}}, \quad (5.2.1)$$

где P_q – текущая выработка чугуна, т/сутки; $P_{q\text{ ср}}$ – средняя выработка чугуна, т/сутки; n_q – относительная выработка чугуна; B_k – текущий удельный расход

кокса, кг/т; $B_{к\text{ ср}}$ – средний удельный расход кокса, кг/т; e_k – относительный удельный расход кокса.

Целевой показатель эффективности доменной плавки:

$$E = \alpha_n n_u + \alpha_k e_k^{-1}, \quad \alpha_n, \alpha_k \geq 0, \quad \alpha_n + \alpha_k = 1. \quad (5.2.2)$$

где α_n, α_k – веса частных показателей.

Целевой показатель эффективности доменной плавки описывает области различных уровней эффективности ведения доменной плавки.

В данной работе рассматриваются различные значения целевого показателя. Для примера приведен равным $E=1,001$. Область повышенной эффективности определяется условием $\varepsilon_u \geq 1,001$, область средней эффективности: $\varepsilon_u \geq 1$ и $\varepsilon_u < 1,001$, область пониженной эффективности: $\varepsilon_u < 1$.

На рисунке 5.2.6 красной области соответствует область режимов повышенной эффективности, зеленой области – область режимов средней эффективности, черной – область пониженной эффективности.

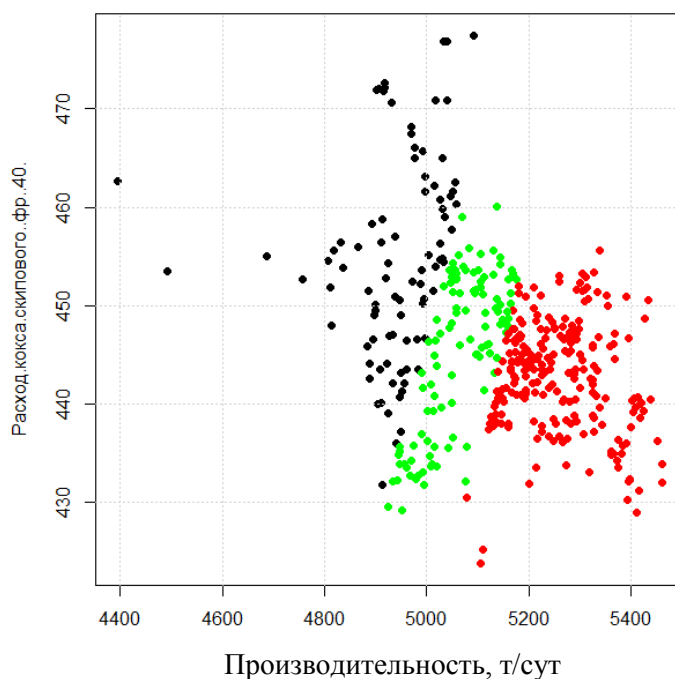


Рис. 5.2.6. Области высокого, среднего и пониженной эффективности доменного процесса

На рисунке 5.2.7 представлена область среднего качества по тепловому состоянию на агрегированных данных эксплуатации, отмеченная зеленым эллипсом.

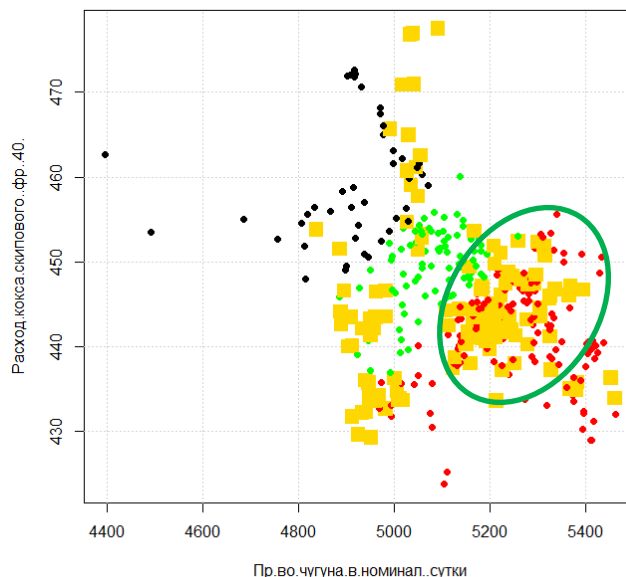


Рис. 5.2.7. Область среднего качества по тепловому состоянию на агрегированных данных эксплуатации

На рисунке 5.2.8 представлена область высокого (красный эллипс) и среднего качества (зеленый эллипс) по тепловому состоянию. Область высокого качества доменного процесса получена на данных 2014 года. В 2015 году нет статистических данных, где бы выполнялись условия и по высокой эффективности и высокому качеству по тепловому состоянию. Но для решения задачи модельно-упреждающего управления доменным процессом необходимо построить область с данными текущего режима работы. С этой целью предлагается рассматривать область высокой эффективности при ослабленном требовании по содержанию Si в чугуне. При постепенном выходе на режим высокого качества, требования по содержанию Si в чугуне рекомендуется вернуть в четкие границы области высокого качества ведения доменного процесса по тепловому состоянию.

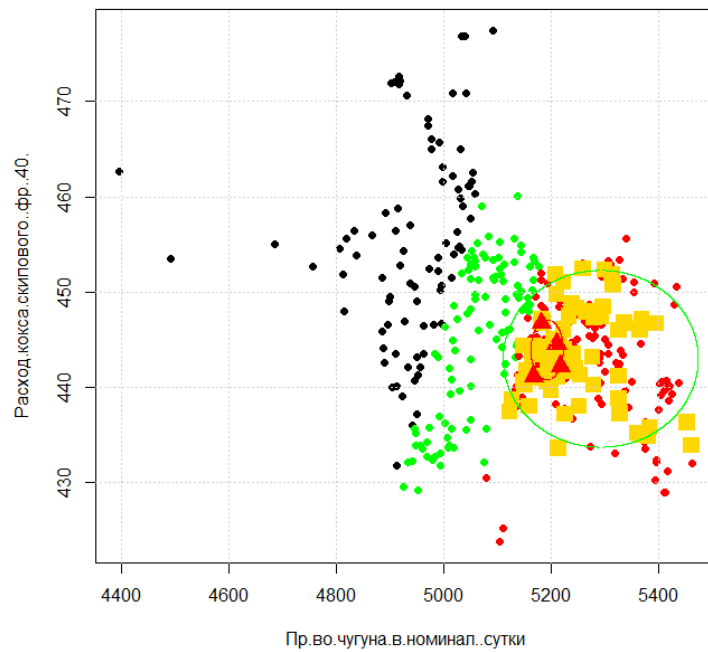


Рис. 5.2.8 Область высокого и среднего качества по тепловому состоянию

Примеры полученных SOM карт приведены на рисунках 5.2.9 и 5.2.10

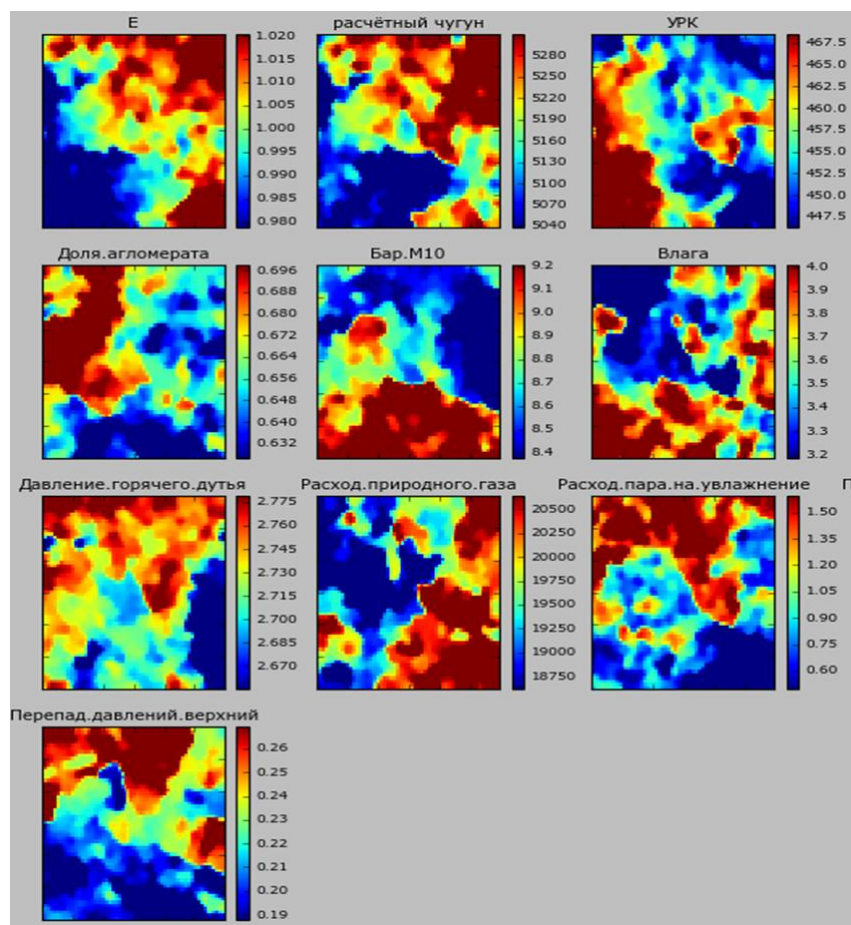


Рис. 5.2.9. SOM карты ДП №10 (набор параметров №2)

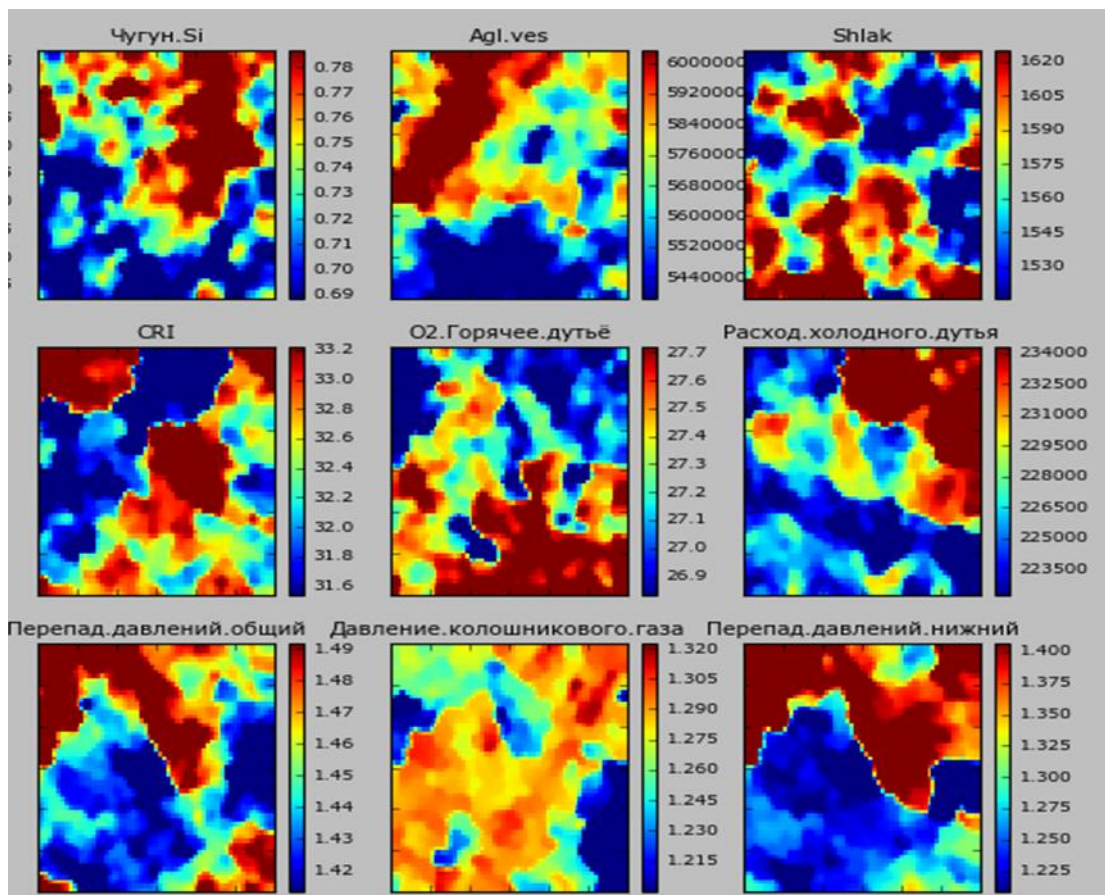


Рис. 5.2.10. SOM карты ДП№10 (набор параметров №2)

Построены карты с проецированием многомерного пространства в пространство, на котором указаны кластеры (рис. 5.2.11) и линии уровней ведения доменного процесса (рис. 5.2.12).

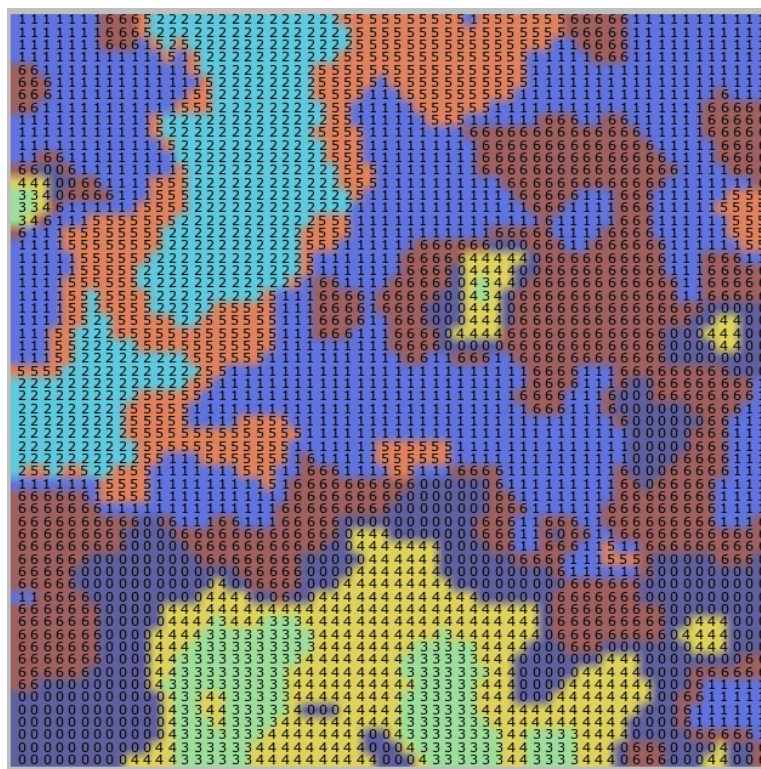


Рис. 5.2.11. SOM карта кластеров режимов ДПН№10 (набор параметров №2)

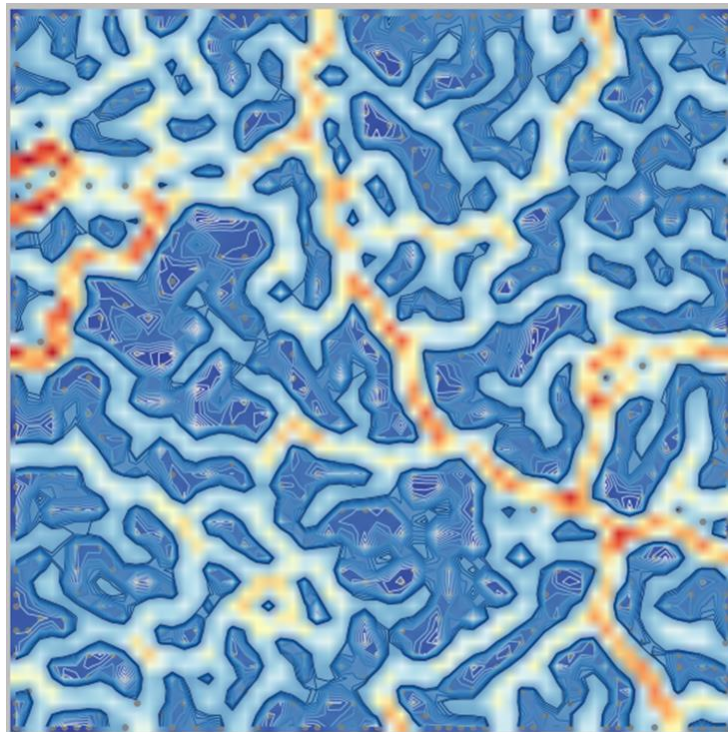


Рис. 5.2.12. SOM карта линий уровней ведения доменного процесса для ДПН№10 (набор параметров №2)

Построение самоорганизующихся карт (вариант 3)

Набор параметров №3 построения самоорганизующихся карт (среднесуточные не агрегированные данные по ДП№10 с января 2014 г. по июнь 2016 г.):

1. Количество руды в сутки, т/сутки.
2. Производство чугуна в номинальные сутки, т/сутки.
3. Расход кокса скипового (фр.+40), кг/т.
4. Истираемость (M10), %.
5. Реакционная способность (CRI), %.
6. Содержание Si в чугуне, %.
7. Доля агломерата рудной шихты.
8. Температура горячего дутья, °C.
9. Содержание кислорода в горячем дутье, %.
10. Давление горячего дутья, атм.
11. Расход дутья, м³/ч.
12. Перепады давления газов общий, атм.
13. Перепады давления газов нижний, атм.
14. Перепады давления газов верхний, атм.
15. Давление колошникового газа, атм.
16. Расход колошникового газа, м³/ч.
17. Температура колошникового газа (т.5), °C.
18. Температура периферийного газа, °C.
19. Температура чугуна, °C.
20. Расход природного газа, м³/ч.
21. Температура материалов на входе в фурменные очаги t_2'' , °C.
22. Температура материалов на выходе из фурменных очагов t_4'' , °C.
23. Расход пара на увлажнение, т/ч.

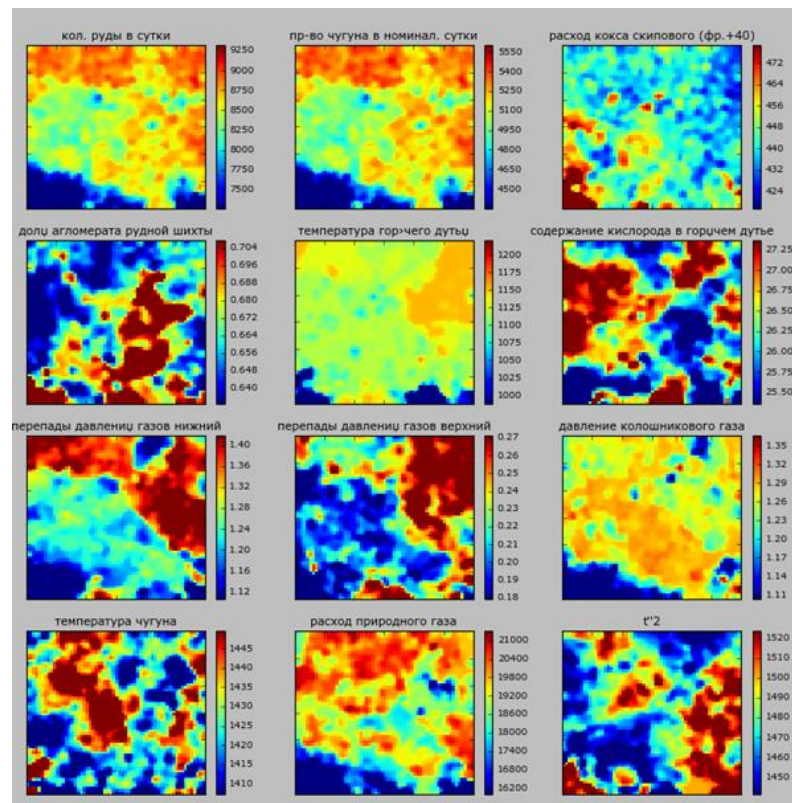


Рис. 5.2.13. SOM карты ДП№10 (набор параметров №3)

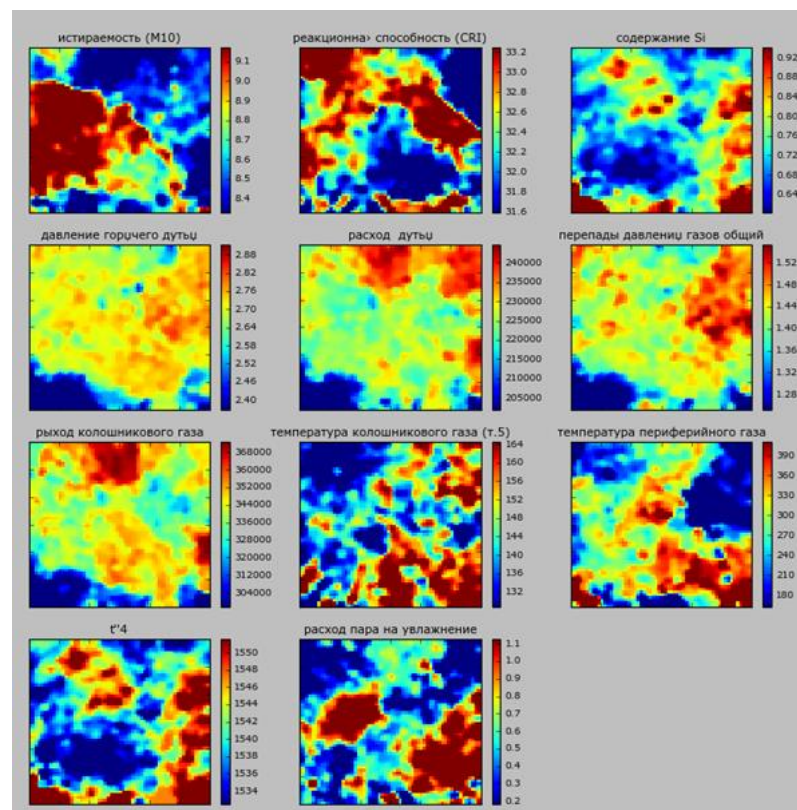


Рис. 5.2.14. SOM карты ДП№10 (набор параметров №3)

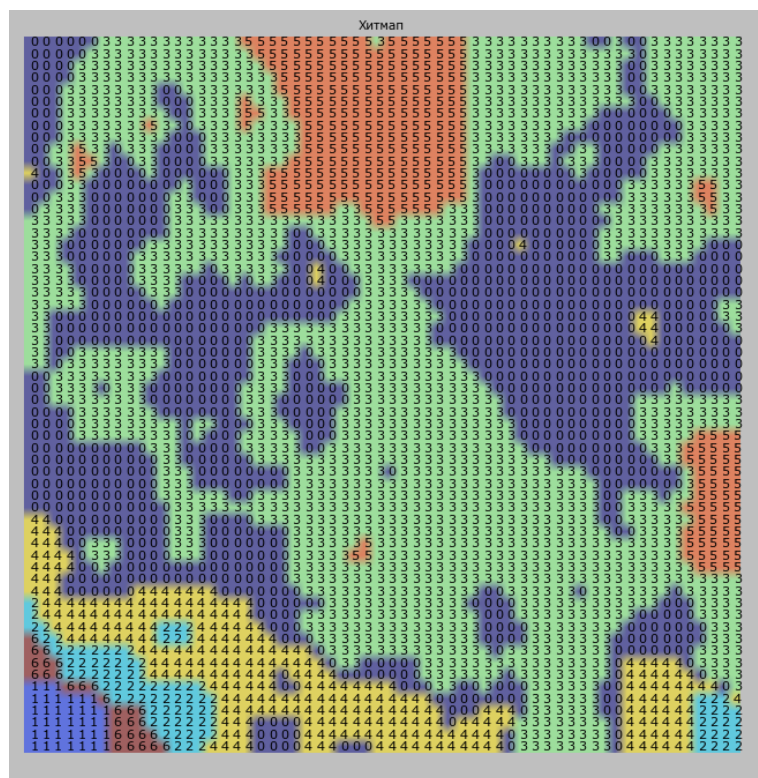


Рис. 5.2.15. SOM карта кластеров режимов ДП№10 (набор параметров №3)

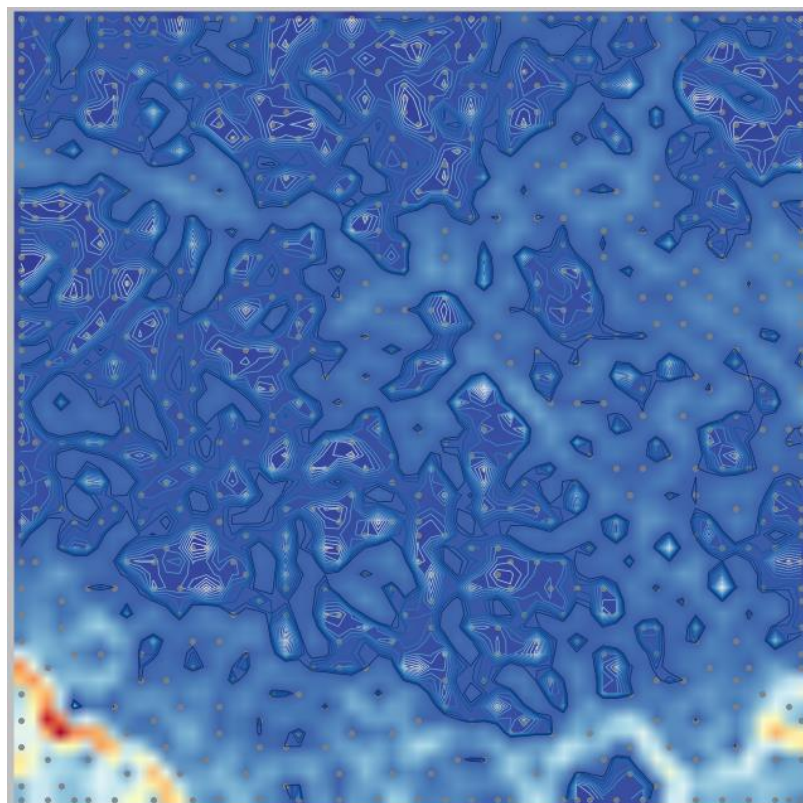


Рис. 5.2.16. SOM карта линий уровней ведения доменного процесса для ДП№10 (набор параметров №3)

На рисунках 5.2.17, 5.2.18 приведен пример визуализации результатов кластерного анализа методом сетей Кохонена, представленного двумерным графиком координатах: производительность доменной печи ($ПЧ$) от истираемости (M_{10}).

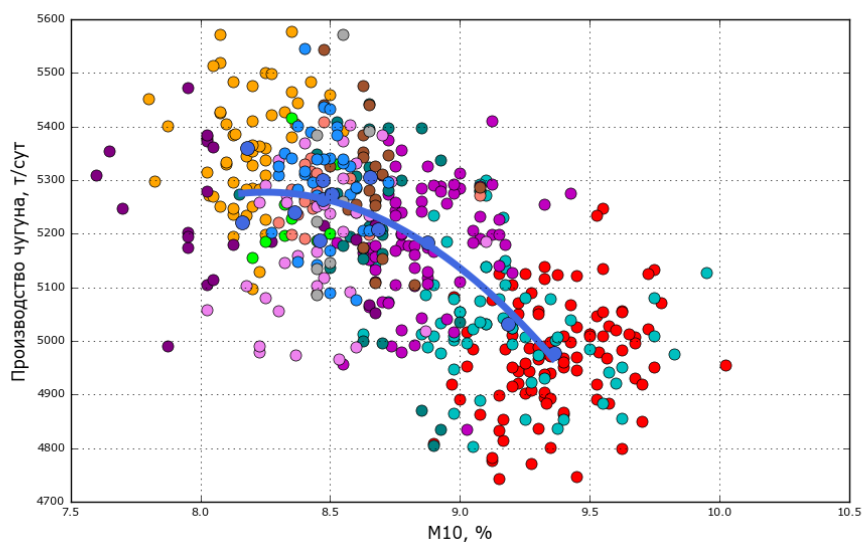


Рис. 5.2.17. Визуализация кластерного анализа
в координатах $ПЧ$ (M_{10})

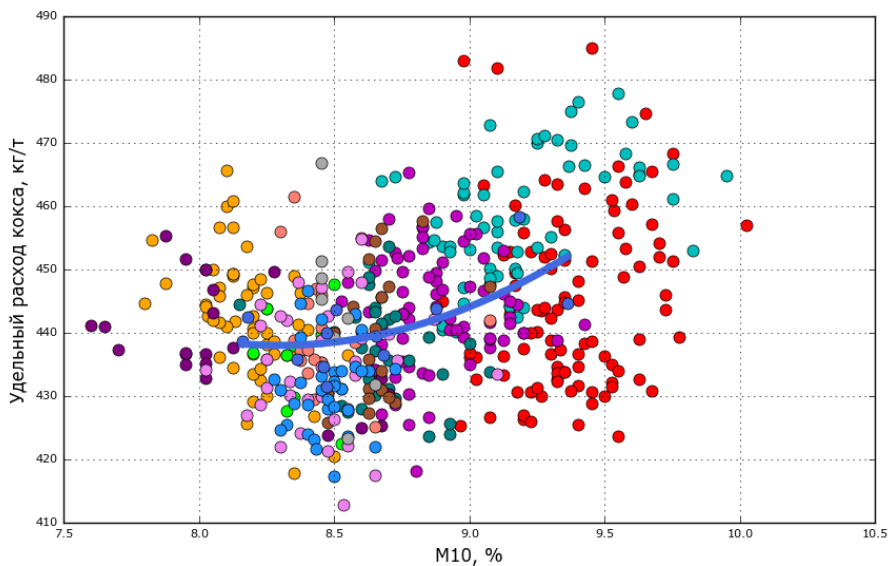


Рис. 5.2.18. Визуализация кластерного анализа
в координатах $УРК$ (M_{10})

На основе данного кластерного разбиения были получены зависимости для определения влияния истираемости кокса на производительность печи и расход кокса. Результирующие формулы:

$$\text{УРК} = 12.4 \cdot \text{М10}^2 - 205.4 \cdot \text{М10} + 1290.2,$$

$$\text{ПЧ} = -252.64 \cdot \text{М10}^2 + 4169.6 \cdot \text{М10} - 11926,$$

где Пч – производительность доменной печи, т/с; УРК – удельный расход кокса, кг/т.

На основе полученных зависимостей были уточнены коэффициенты влияния показателя истираемости кокса М10 на производительность доменной печи и расход кокса.

Таблица 5.2.2

Влияние (+ увеличение, – уменьшение) фактора истираемости кокса М10 на удельный расход кокса и производительность ДП №10

Показатель М10, %	Коэффициент по методике		Коэффициент по нормативной таблице	
	Расход, %	Производи- тельность, %	Расход, %	Производи- тельность, %
8 – 8.5	0	0	+1.4	-1.4
8.5 – 8.9	-1.4	+0.9	+1.12	-1.2
8.9 – 9.5	-5.6	+3.1	+1.68	-1.68
Среднее изменение на 1%	-4.42	+2.4	+2.8	-2.8

Приведенные выше тестовые результаты показывают, что применение современных достижений в области интеллектуального анализа данных, основанных на применении самоорганизующихся карт режимов, принципиально позволяет строить наглядные диаграммы взаимосвязей режимов доменного процесса в виде топографических изображений областей уровней значений параметров. Подобное представление реалистично

отображает сложную структуру процессов, реально происходящих в доменной печи с учетом неопределенности их характеристик.

Применение самоорганизующихся карт режимов может быть положено в основу построения автоматизированной экспертной системы, которая не только будет наглядно отображать топологические карты процессов, но и рассчитывать рациональные маршруты управления доменным процессом на основе последовательностей подач кокса, влаги, природного газа и других управляемых факторов, оптимальных с точки зрения снижения потребления кокса и повышения производительности печи.

Примером применения интеллектуального анализа данных является исследование влияние дутьевого режима на эффективность доменной плавки.

Проведенные исследования показывают влияние дутьевого режима на эффективность доменной плавки и соответственно на выработку вторичного энергетического ресурса — доменного газа, используемого в теплоэнергетическом комплексе металлургического предприятия.

На рисунке 5.2.19 приведен график зависимости производительности от соотношения удельного значения природного газа ($V_{ПГ}$) к удельному значению технологического кислорода ($V_{ТК}$). На рисунке 5.2.20 приведен график зависимости удельного расхода кокса от соотношения удельного значения природного газа к удельному значению технологического кислорода.

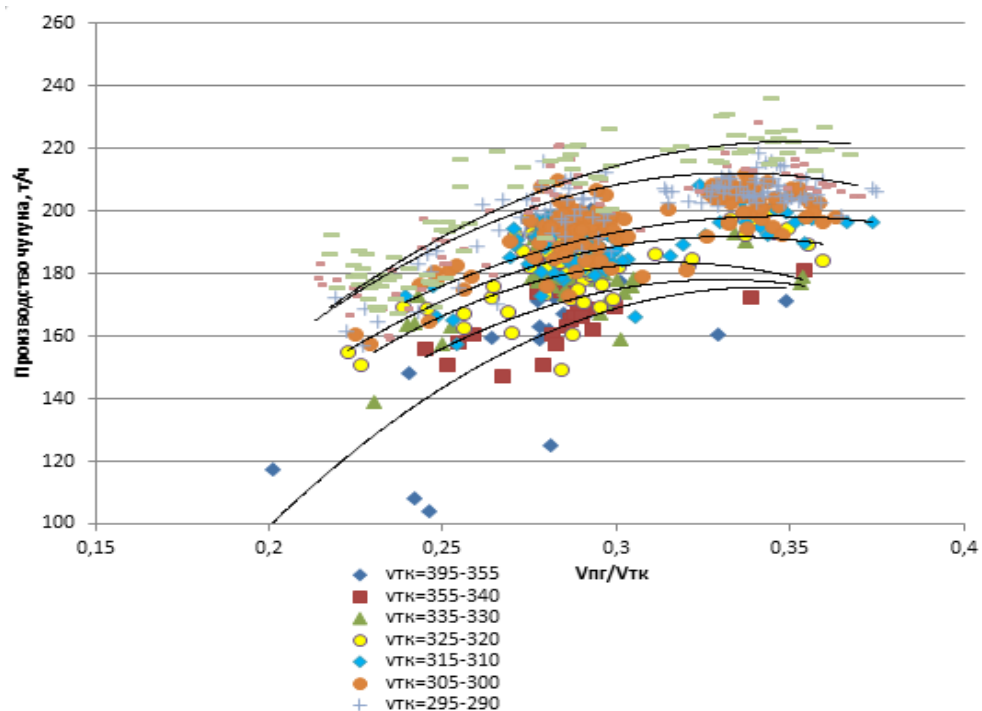


Рис. 5.2.19. График зависимости производительности от соотношения
удельного значения природного газа к удельному значению
технологического кислорода

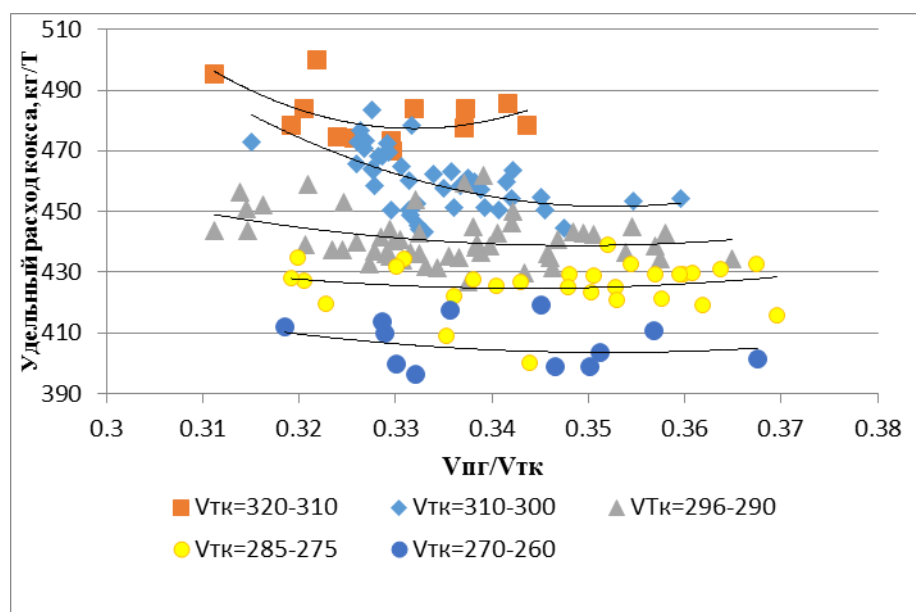


Рис.5.2.20. График зависимости удельного расхода кокса от
соотношения удельного значения природного газа к удельному значению
технологического кислорода

Разработанная система поддержки принятия решения по управлению доменным процессом на основе искусственных сетей Кóхонена позволяет повысить его технико-экономическую эффективность на основе системной координации совокупности существующих нормативных технологических решений по управлению процессом с коррекцией по реальным данным эксплуатации.

5.3. Метод принятия решений по управлению технологическими процессами на основе выделения целевых областей значений режимных параметров

В работе предлагается метод принятия решений по управлению технологическими процессами на основе выделения целевых областей значений режимных параметров, позволяющих повысить эффективность технологического процесса в рамках ограничений технологического регламента. Предположим, что известна статистика значений режимных параметров за определенный период наблюдения технологического объекта. Исходя из данной статистики, на основе известных методов кластеризации можно выделить в пространстве значений режимных параметров подобласти повышенного качества – эффективные кластеры. Аналитическое представление эффективных кластеров может быть самым различным [34].

При выделении целевых областей режимных параметров:

$$\{x_i : i \in I\} \quad (5.3.1)$$

происходит разбиение на управляемые и неуправляемые параметры:

$$\{x_i : i \in I_y\}, \quad \{x_i : i \in I_n\}. \quad (5.3.2)$$

Индексное множество всевозможных упорядоченных пар параметров:

$$I_c = \{(i, j) : (i, j) \in I \times I\}. \quad (5.3.3)$$

Для представления областей повышенного качества будем использовать двумерные проекции в виде удлинённых эллипсоидов для каждой упорядоченной пары параметров (x_i, x_j) .

Для нормализации данных производится замена переменных:

$$\begin{aligned} y_1 &= b_{11}x_1 + b_{12}x_2, \\ y_2 &= b_{21}x_1 + b_{22}x_2, \end{aligned} \quad (5.3.4)$$

где а) $i = j$,

$$\begin{aligned} b_{11} &= 1, & b_{12} &= 0, \\ b_{21} &= 0, & b_{22} &= 1. \end{aligned} \quad (5.3.5)$$

б) $i \neq j$,

$$\begin{aligned} b_{11} &= \frac{s_{ij}}{\sqrt{1 + K_{ij}^2}}, & b_{12} &= \frac{s_{ij}K_{ij}}{\sqrt{1 + K_{ij}^2}}, \\ b_{21} &= -\frac{K_{ij}}{\sqrt{1 + K_{ij}^2}}, & b_{22} &= \frac{s_{ij}}{\sqrt{1 + K_{ij}^2}}. \end{aligned} \quad (5.3.6)$$

Вводятся дискриминантные функции удлинёнными эллипсоидами:

$$а) \ i = j, \quad \frac{y_i^2}{\sigma_i^2} \leq r_{ii}^2 R_0^2; \quad (5.3.7)$$

$$б) \ i \neq j, \quad \frac{y_i^2}{\sigma_i^2} + \frac{y_j^2}{\sigma_j^2} \leq r_{ij}^2 R_0^2. \quad (5.3.8)$$

В нормализованном виде дискриминантные функции представляются системой неравенств:

$$f_{ij}(x_i, x_j) \leq 0, \quad (i, j) \in I_c. \quad (5.3.9)$$

Здесь а) $i = j$,

$$f_{ij}(x_i, x_j) = \frac{y_i^2}{\sigma_i^2} - r_{ij}^2 R_0^2; \quad (5.3.10)$$

b) $i \neq j$,

$$f_{ij}(x_i, x_j) = \frac{y_i^2}{\sigma_i^2} + \frac{y_j^2}{\sigma_j^2} - r_{ij}^2 R_0^2. \quad (5.3.11)$$

При описании эффективной области удлинёнными эллипсоидами нормализованный вид дискриминантной функции имеет вид ($i \neq j$):

$$f_{ij}(x_i, x_j) = \frac{y_i^2}{\sigma_i^2} + \frac{[(y_j - y_j^{\max})^+]^2}{(\sigma_j^+)^2} + \frac{[(y_j - y_j^{\min})^-]^2}{(\sigma_j^-)^2} - r_{ij}^2 R_0^2.$$

Для определения значений набора управляемых технологических параметров $\{x_i : i \in I_y\}$ находим квадратичную невязку решения системы неравенств на основе статистики наблюдения за технологическим процессом:

$$E_{\text{св}}^2 = 0,5 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left((f_{ij}(x_i, x_j))^+ \right)^2, \quad (5.3.12)$$

$$(f_{ij}(x_i, x_j))^+ = \begin{cases} f_{ij}(x_i, x_j), & \text{при } f_{ij}(x_i, x_j) > 0; \\ 0, & \text{при } f_{ij}(x_i, x_j) \leq 0. \end{cases} \quad (5.3.13)$$

$$x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max}, \quad i \in I. \quad (5.3.14)$$

Невязка ограничений для неравенств (5.3.14) в квадратичном виде определяем как:

$$E_x^2 = 0,5 \sum_{i=1}^n \left(\left((-x_i + x_i^{\min})^+ \right)^2 + \left((x_i - x_i^{\max})^+ \right)^2 \right). \quad (5.3.15)$$

Для регуляризации постановки задачи и корректного решения при неполной статистике введено дополнительно регуляризующее ограничение:

$$E_R^2 = 0,5 \sum_{i=1}^n (x_i - x_{Ri})^2. \quad (5.3.16)$$

Обобщенная штрафная функция, составленная для невязок решений неравенств (5.3.12), (5.3.15), (5.3.16) описываем в виде:

$$E_0^2 = E_{cb}^2 + \lambda E_x^2 + \alpha E_R^2. \quad (5.3.17)$$

Решение минимаксной задачи математического программирования находим как:

$$\min_{\{x_i \in I_y\}} \max_{\{x_i \in I_n\}} E_{cb}^2(\{x_i : i \in I\}). \quad (5.3.18)$$

$$x_{i,k+1} = x_{i,k} - \gamma \left(\frac{\partial E_{cb}^2}{\partial x_i} + \lambda \frac{\partial E_x^2}{\partial x_i} + \alpha \frac{\partial E_R^2}{\partial x_i} \right), \quad i \in I_y;$$

$$x_{i,k+1} = x_{i,k} - \gamma \left(-\frac{\partial E_{cb}^2}{\partial x_i} + \lambda \frac{\partial E_x^2}{\partial x_i} + \alpha \frac{\partial E_R^2}{\partial x_i} \right), \quad i \in I_n;$$

$$\frac{\partial E_{cb}^2}{\partial x_i} = f_{ii}^+ \frac{y_i}{\sigma_i^2} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n f_{ij}^+ \left(\frac{y_i}{\sigma_i^2} b_{ii}^{(11)} + \frac{y_j}{\sigma_j^2} b_{ji}^{(21)} \right) + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n f_{ki}^+ \left(\frac{y_k}{\sigma_k^2} b_{ki}^{(12)} + \frac{y_i}{\sigma_i^2} b_{ii}^{(22)} \right);$$

$$\frac{\partial E_x^2}{\partial x_i} = \left((-x_i + x_i^{\min})^+ + (x_i - x_i^{\max})^+ \right); \quad \frac{\partial E_R^2}{\partial x_i} = x_i - x_{Ri}.$$

Центральным моментом рассматриваемой методики является определение областей эффективных режимов. Область эффективных режимов выделяется в пространстве режимных параметров по совокупности показателей качества. Так как управление технологическим процессом носит динамический характер, то выделенная область должна быть устойчивой. Это означает, что время должно быть одной из координат пространства режимных параметров, а само пространство представлять собой обобщенное функциональное пространство. Элементами данного пространства являются реализации режимных параметров во времени. При этом временная развертка траекторий эволюции параметров служит оценки их устойчивой

принадлежности области эффективных режимов во времени. Именно реализации режимных параметров, устойчивые по эффективности, и включаются в область эффективных режимов функционального пространства.

В соответствии с методологией модельно-упреждающего управления область эффективных режимов функционального пространства представляет собой модель эволюции режимов технологического процесса. При этом выбор эффективного решения здесь осуществляется для первого такта эволюции эффективной области, так как последующие такты в соответствии с вышесказанным будут заведомо принадлежать области эффективных решений.

Выбор эффективного решения осуществляется для каждого кластера повышенного качества. Из полученного множества решений выбирается решение с минимальной вероятностью принятия неэффективного решения. В общем случае с точки зрения динамики процесса управления подобный подход приводит к выбору управляющих решений с переменной структурой.

Нахождение оптимального режима подразумевает нахождение совместного решения для значений всех рассматриваемых параметров с целью нахождения целевого режима с высокой производительностью и высоким качеством по тепловому состоянию. Нахождение целевой области рассчитывается при ограничениях на неуправляемые параметры. Следующим шагом является определение траектории движения к целевой области, которая решается методами оперативного управления.

Примеры нахождения целевого режима печи для различных параметров представлены на рис. 5.3.1. В качестве начальной точки расчета приняты данные за 07.12.2015 г.

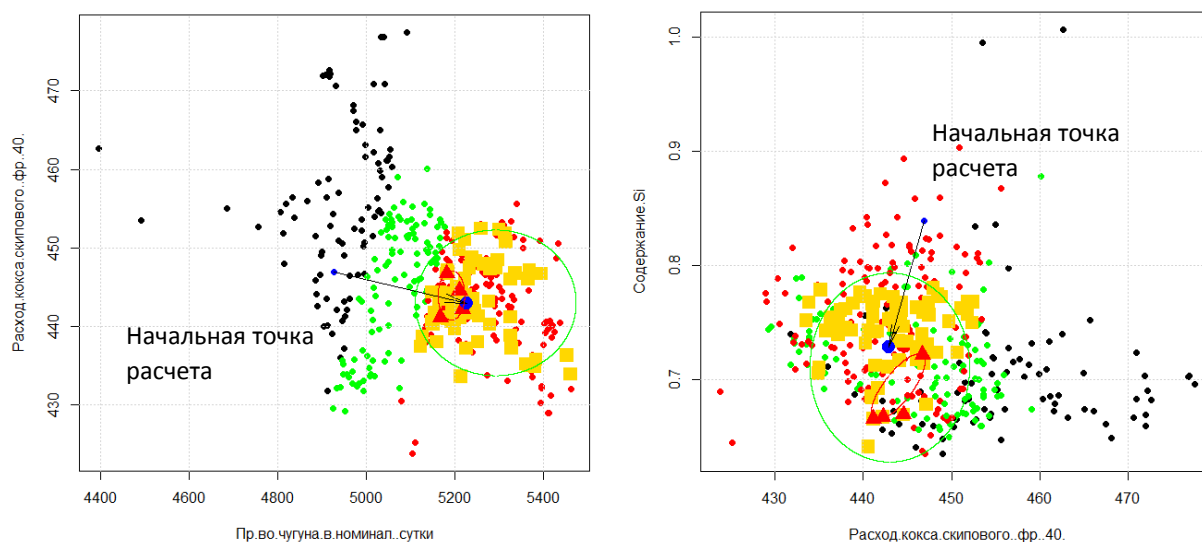


Рис. 5.3.1. Нахождение целевого режима работы доменной печи

Существующая схема управления режимными параметрами доменного процесса направлена на удержание значений параметров в допустимых пределах, определенных технологической инструкцией и заданными техническими условиями. Подобное управление можно назвать допустимым. При данном виде управления значения режимных параметров колеблются случайным образом в рамках допустимых пределов. Как показали исследования, проведенные на доменной печи (ДП), размах колебаний зачастую превышает границы эффективной области значений режимных параметров. Это приводит к снижению производительности печи и повышенному расходу кокса. Поэтому является актуальной задачей стабилизация колебаний режимных параметров в пределах эффективной области их значений с использованием современных методов модельно-упреждающего управления и интеллектуальных технологий.

Данная задача является весьма сложной, потому что разброс значений режимных параметров определяется множеством причин: таких как неполнота измеряемых факторов, действующих на доменный процесс, низкая точность измерений, невозможность измерения внутренних параметров доменного процесса, случайные колебания входных параметров шихты, дутья и т.д.

Учесть детально все эти факторы крайне сложно при современном уровне развития техники измерения и управления доменным процессом. Поэтому наиболее реалистичным является построение схемы эффективного управления доменным процессом на основе использования программных средств глубинного анализа статистических данных эксплуатации (Data Mining), таких как кластеризация на основе искусственных нейронных сетей.

5.4. Эффективное управление доменным процессом на основе методов модельно-упреждающего управления

5.4.1. Общая схема управления тепловым состоянием доменной печи

Исходные материалы для загрузки в печь (шихта) состоят из железорудной составляющей (ЖРС), кокса и корректирующих добавок. Указанные материалы загружаются в печь слоями. В нижней части печи через специальные фурмы подаются рабочие газы, такие как дутье, содержащее кислород; природный газ и водяной пар. Верхняя часть печи, в которую осуществляется засыпь шихты, называется колошником. Часть печи от колошника до фурм, где собственно и происходит выплавка чугуна, называется шахтой. Выплавленный чугун сливается в нижнюю часть печи, называемой горном.

По мере выплавки чугуна верхний уровень шихты снижается с определенной скоростью. Задача эксплуатационного персонала путем регулирования скорости подачи шихты удерживать уровень засыпи постоянным. Таким образом, переменной здесь является скорость подачи шихты, которая зависит от теплового состояния доменного процесса. Непосредственный контроль теплового состояния процесса здесь затруднен. Поэтому на практике для оценки текущего теплового состояния процесса используют специальные индикаторы, такие как содержание кремния в чугуне (y_{Si}), титановый модуль (y_{Ti}) и др. Эти данные предоставляет лаборатория на

основе анализа образцов выплавленного металла. Регулирование теплового состояния осуществляет мастер печи путем изменения содержания кокса и коксовой мелочи в подачах. По указанию технолога мастер печи может изменять параметры подачи газов через фурмы. Через фурмы ведется также визуальный контроль теплового состояния процесса.

Базовые связи параметров регулирования представлены на рис. 5.4.1.

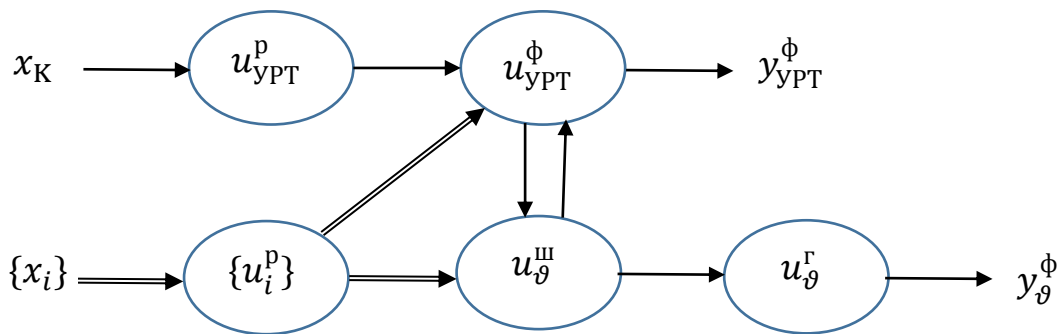


Рис. 5.4.1. Базовые связи параметров регулирования

Здесь x_K – подача кокса, $\{x_i\}$ – подачи корректирующих материалов, $u_{\text{УРТ}}^p$, $u_{\text{УРТ}}^\phi$, $y_{\text{УРТ}}^\phi$ – расчетное значение удельного расхода топлива (УРТ), фактическое значение УРТ и оценка значения УРТ по результатам плавки соответственно; $\{u_i^p\}$ – расчетные значения удельной подачи i -ых корректирующих материалов; $u_{\text{г}}^{\text{ш}}$ – значение индикатора теплового состояния процесса в шахте, $u_{\text{г}}^r$ – значение индикатора теплового состояния процесса в горне, $y_{\text{г}}^\phi$ – значение индикатора теплового состояния на выходе печи.

Стратегии регулирования

Прежде всего необходимо отметить, что все базовые параметры, приведенные на (рис. 5.4.1), характеризуются временем и величиной действия. Связи между параметрами характеризуются величинами транспортного и

инерционного запаздывания. Кроме того, основные позиции на схеме оперативного управления (рис. 5.4.1): команды на подачи, загрузку, слив чугуна, приход данных лаборатории и др., осуществляются в дискретные моменты времени. Эти моменты времени нечетко между собой согласованы, имеют переменные интервалы следования. Подобная асинхронность действий с учетом нестационарного характера запаздываний приводит к тому, что в системе регулирования в целом (мастер печи – доменный процесс) являются плохо-определенными коэффициенты передачи между задающими воздействиями и выходными параметрами процесса. В крайних случаях коэффициенты передачи могут изменяться в самых широких пределах вплоть до потери устойчивости системы и смены знака обратной связи с отрицательной на положительную. Например, когда мастер печи принимает решение по результатам текущих лабораторных данных, которые вследствие запаздывания действий в печи, отражают результаты прошлых воздействий. Эти воздействия к текущему моменту времени уже выполнены и не могут быть изменены. Все это может противоречить текущему состоянию печи, однако информация о текущем состоянии еще не пришла и придет с запаздыванием.

Поэтому не случайно одним из базовых положений технологических инструкций по ведению режимов доменной печи является требование, чтобы мастер печи после выполнения корректирующего мероприятия убедился, что действие мероприятия направлено в нужную сторону. Лишь после этого мастер печи может выполнить следующее корректирующее действие. Это условие является проверкой корректности знака действия. Но в системе в целом действие характеризуется не только знаком своего коэффициента передачи, но и его величиной. Неопределенность величины коэффициента передачи может приводить к низким запасам устойчивости в системе и возникновению автоколебаний, что и наблюдается на практике.

Выходом из данной ситуации является модельно-упреждающее управление. Стратегия модельно-упреждающего управления реализуется на

основе идентификации модели объекта управления на основе текущих данных и выработки на этой основе упреждающего управления. Модельно-упреждающее управление может быть реализовано с разной степенью детализации характеристик объекта управления.

Стратегия 1

Данная стратегия является наиболее простой и основана на средней выборке данных эксплуатации доменной печи за определенный период наблюдения, предшествующий периоду принятия решений. Например, периодом принятия решений может быть текущая рабочая смена обслуживания ДП, а периодом наблюдения – предыдущие рабочие смены.

По результатам наблюдения формируется выборка данных эксплуатации печи по критерию:

$$\{(u_{\text{УРТ},s}, y_{Si,s}); \forall s (|y_{Si,s} - y_{Si,s,n}| \leq \varepsilon)\}_n. \quad (5.4.1)$$

Здесь s – индекс наблюдений за процессом, ε – точность, с которой выходной параметр $y_{Si,s}$ совпадает с номинальным значением параметра $y_{Si,s,n}$.

Требуемое значение входного параметра $x_{K,s}$ определяется как математическое ожидание:

$$u_{\text{УРТ},s,n} = \frac{1}{N_n} \sum_{s \in I_{s,n}} u_{\text{УРТ},s}, \quad I_{s,n} = \{s; \forall s (|y_{Si,s} - y_{Si,s,n}| \leq \varepsilon)\}_n, \quad (5.4.2)$$

где N_n – число данных, удовлетворяющих критерию (5.4.1).

Обратим внимание, что формулы (5.4.1), (5.4.2) выполняют не просто функцию усреднения входных расчетных значений УРТ $x_{K,s}$. Их связь с выходными фактическими результатами $y_{Si,s}$ в соответствии с критерием (5.4.1) определяет единичную связь среднего значения входных данных с допустимыми выходными результатами. Поэтому, зная номинальное

расчетное УРТ $x_{K,s,n}$, полученное исходя из требуемого результирующего $y_{Si,s,n}$ на выходе, можно с заданной точностью ε рассчитать требуемый объем кокса в подаче и дополнительные добавки для периода регулирования.

Данный подход является простейшей реализацией модельно-упреждающего управления, где в качестве модельного представления о регулируемом процессе выступают соотношения (5.4.1), (5.4.2).

Стратегия 2

Данная стратегия уже основывается на всей статистике данных эксплуатации доменной печи.

Здесь с использованием предыдущего расчета сначала определяют отклонения режимных параметров от их номинальных значений:

$$\Delta u_{УРТ,s} = u_{УРТ,s} - u_{УРТ,s,n}, \quad \Delta y_{Si,s} = y_{Si,s} - y_{Si,s,n}. \quad (5.4.3)$$

Далее можно оценить коэффициент передачи по УРТ, например, по формуле:

$$a_K = \frac{(\Delta y_{Si}, \Delta u_{УРТ})_s}{(\Delta x_K, \Delta u_{УРТ})_s}, \quad (5.4.4)$$

где $\Delta u_{УРТ}$, Δy_{Si} – векторы статистических данных, $(\cdot, \cdot)$ – скалярное произведение векторов.

Формула (5.4.4) представляет собой статический расчет связи расчетного УРТ на входе и результирующего значения выходного параметра Δy_{Si} . Статический расчет будет справедлив, если статистические данные определялись при условии затухания переходного процесса в системе после изменения входного расчетного УРТ.

Недостатком приведенной выше формулы является не учет динамики транспортного запаздывания $\tau_{тр}$ выходного эффекта Δy_{Si} от входного фактора

Δx_K . С учетом транспортного запаздывания коэффициент передачи УРТ определится по формуле:

$$a_K = \max_{(\tau_{\text{TP}})} a_K(\tau_{\text{TP}}) = \frac{(\Delta y_{Si}(t_s + \tau_{\text{TP}}), \Delta u_{\text{УРТ}}(t_s))_s}{(\Delta u_{\text{УРТ}}(t_s), \Delta u_{\text{УРТ}}(t_s))_s}. \quad (5.4.5)$$

В итоге формула прогнозирования с опережением на величину транспортного запаздывания будет иметь вид:

$$\Delta y_{Si}(t_s + \tau_{\text{TP}}) = a_K \Delta u_{\text{УРТ}}(t_s). \quad (5.4.6)$$

Стратегия 3

Данная стратегия основывается на дополнительном учете инерционного запаздывания действий, а также нелинейных эффектов в системе регулирования. В этом случае связь входного расчетного УРТ $\Delta u_{\text{УРТ}}(t_s)$ с результирующим значением выходного параметра $\Delta y_{Si}(t_s)$ описывается в непрерывном случае динамическим оператором:

$$\Delta h_{Si}(t_s) = \int_0^\infty \Delta u_{\text{УРТ}}(t_s - \tau_{\text{TP}}^{\text{min}} - \lambda) w(\lambda) d\lambda, \quad (5.4.7a)$$

$$\int_0^\infty w(\lambda) d\lambda = 1, \quad (5.4.7b)$$

$$\Delta y_{Si}(t_s) = F(\Delta h_{Si}(t_s)). \quad (5.4.7c)$$

Здесь в явном виде выделена нелинейная статическая часть оператора (5.4.7c) и динамическая часть (5.4.7a) с единичным коэффициентом передачи (5.4.7b), где $w(\lambda)$ – весовая функция, $\tau_{\text{TP}}^{\text{min}}$ – минимальное значение транспортного запаздывания.

В дискретном варианте формулы (5.4.7) имеют вид:

$$\Delta h_{Si}(t_s) = \sum_k \Delta u_{\text{УРТ}}(t_s - \tau_{\text{TP}}^{\text{min}} - \lambda_k) w_k \Delta \lambda_k, \quad (5.4.8a)$$

$$\sum_k w_k \Delta \lambda_k = 1, \quad (5.4.8b)$$

$$\Delta y_{Si}(t_s) = F(\Delta h_{Si}(t_s)). \quad (5.4.7c)$$

В этом случае формула динамической связи, например, для инерционного процесса первого порядка, имеет вид:

$$\Delta h_K(T_{ин}; t_s) = \int_0^{T_h} \Delta u_{урт}(t_s - \lambda) \frac{1}{T_{ин}}, \quad (5.4.9)$$

где $T_{ин}$ – постоянная времени инерционного звена, T_h – интервал наблюдения.

Обозначим:

$$\Delta h_K(T_{ин}; t_s) = \int_0^{T_h} \Delta u_{урт}(t_s - \lambda) \frac{1}{T_{ин}} \exp\left(\frac{\lambda}{T_{ин}}\right) d\lambda. \quad (5.4.10)$$

Тогда формула прогноза с опережением на величину транспортного запаздывания будет иметь вид:

$$\Delta y_{Si}(t_s + \tau_{тр}) = a_K \Delta h_K(T_{ин}; t_s). \quad (5.4.11)$$

Коэффициент передачи по коксу определится на основе соотношения, аналогичного соотношению (5.4.7):

$$a_{урт} = \max_{(\tau_{тр}, T_{ин})} a_{урт}(\tau_{тр}, T_{ин}) = \frac{(\Delta y_{Si}(t_s + \tau_{тр}), \Delta h_K(T_{ин}; t_s))_s}{(\Delta h_{урт}(T_{ин}; t_s), \Delta h_{урт}(T_{ин}; t_s))_s}. \quad (5.4.12)$$

В более общем плане рассматриваемая стратегия реализуется для всех входных регулирующих воздействий на доменный процесс. Отличие состоит в том, что для многих регулирующих воздействий, имеющих газовую природу, запаздывание действия мало по величине по сравнению с подачей кокса, поэтому запаздыванием здесь можно пренебречь, что влечет за собой упрощение решения задачи идентификации.

Пример 1. Вариант процедуры прогнозирования на реальных данных

Рассмотрим расчетный вариант процедуры прогнозирования теплового состояния доменного процесса с иллюстрацией на реальных данных.

В рассматриваемой задаче тепловое состояние доменного процесса оценивается на основе прогноза траектории изменения кремния в чугуне в зависимости от удельного расхода топлива (УРТ). Прогноз УРТ используется для определения корректирующих подач кокса на основе процедуры модельно-упреждающего управления.

Процедура расчета.

1.1. Для определения связи колебаний y_{Si} с изменениями УРТ прежде всего найдем отклонения указанных величин Δy_{Si} и $\Delta u_{урт}$ от их номинальных значений. Для y_{Si} в качестве номинального значения примем величину $y_{Si} = 0.7\%$. Для УРТ в качестве номинального примем среднее достигнутое значение данного показателя за определенный период эксплуатации.

На рис. 5.4.2 приведены примерные графики фактических отклонений Δy_{Si} и $\Delta u_{урт}$ от их расчетных значений.

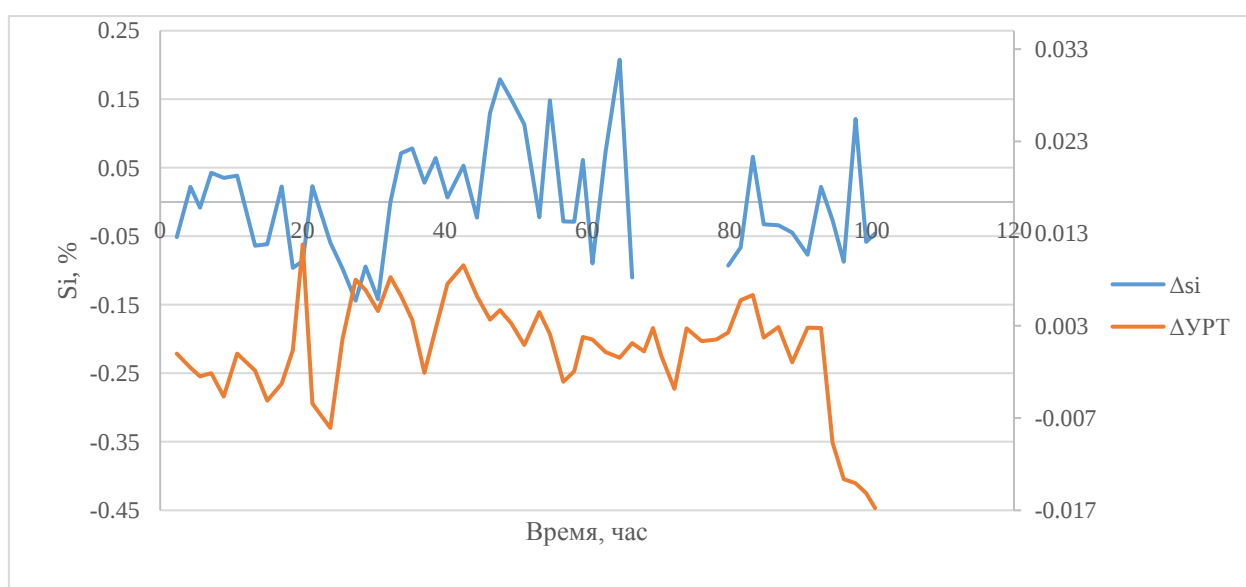


Рис. 5.4.2 Графики отклонений Δy_{Si} и $\Delta u_{урт}$ от номинальных значений

1.2. С целью проведения прогнозных расчетов синхронизируем графики Δu_{Si} и $\Delta u_{урт}$. Синхронизацию выполним путем учета физического запаздывания графика $\Delta u_{урт}$ от графика Δu_{Si} . В качестве базовой величины отсчета при этом выбирается минимальная величина запаздывания. Это обосновывается тем, что запаздывание в рамках решаемой задачи является переменным. В случае если в качестве величины запаздывания выбирается средняя величина, то отклонения от нее будут иметь положительные и отрицательные значения. При фактическом задании графика $\Delta u_{урт}$ в реальном времени, когда текущее время совпадает с началом времени расчета прогноза, положительные отклонения запаздывания от его среднего значения будут физически нереализуемыми. Поэтому для расчетов необходимо выбирать в качестве базового минимальное время запаздывания.

Ниже на рис. 5.4.3 приводится график $\Delta u_{урт}$, построенный на основе синхронизации с графиком Δu_{Si} с минимальным запаздыванием в 6 часов.

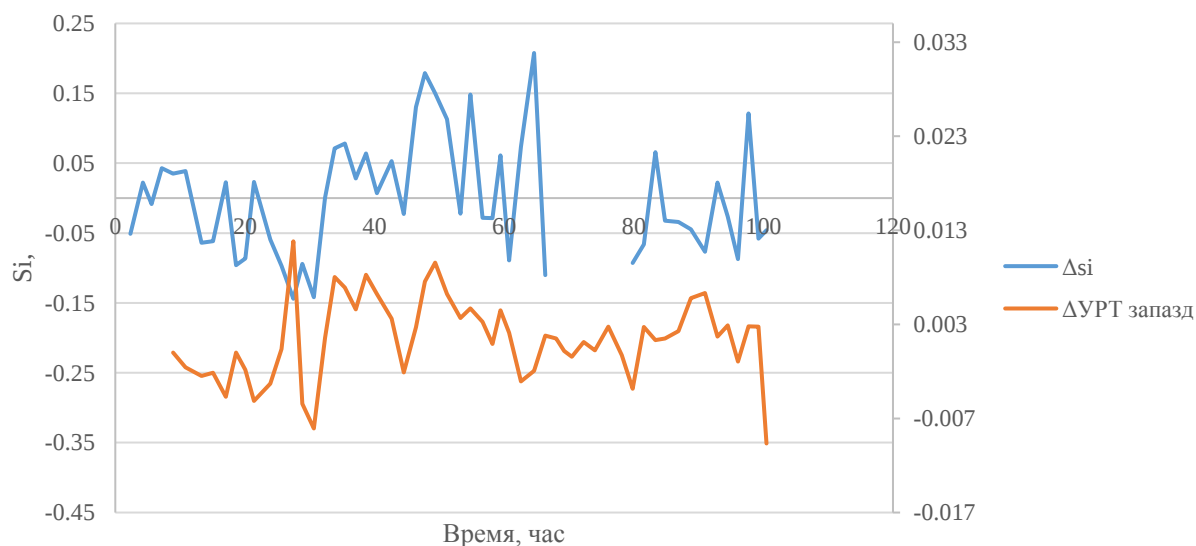


Рис. 5.4.3. Графики отклонений Δu_{Si} и $\Delta u_{урт}$ от расчетных значений с учетом запаздывания

1.3. Далее с целью решения задачи прогноза выполним следующие математические операции по обработке данных.

1⁰. Построим уточненную динамическую модель связи $\Delta y_{Si}(\Delta u_{урт})$ по формуле:

$$\Delta y_{Si}(t) \approx g_1 \Delta u_{урт}(t) + g_2 \Delta u_{урт}(t - \Delta \tau_1) + g_3 \Delta u_{урт}(t - \Delta \tau_2), \quad (5.4.13)$$

где $\Delta \tau_1, \Delta \tau_2$ – дискреты текущего уточнения времени запаздывания.

Эта задача решалась методом наименьших квадратов.

2⁰. Далее построим уточненную нелинейную модель связи $\Delta y_{Si}(\Delta u_{урт})$.

В качестве базовой модели здесь использовались полиномы различного порядка. Наиболее точный результат был достигнут на основе использования полинома:

$$\Delta y_{Si}(t) = b_0 + b_1 \Delta h(t) + b_3 \Delta h^3(t), \quad (5.4.14)$$

где

$$\Delta h(t) = g_1 \Delta u_{урт}(t) + g_2 \Delta u_{урт}(t - \Delta \tau_1) + g_3 \Delta u_{урт}(t - \Delta \tau_2). \quad (5.4.15)$$

1.4. На рис. 5.4.4 представлены графики реальной траектории $\Delta y_{Si}(t)$ и расчетной $\Delta y_{Si}(\Delta u_{урт})$ на интервалах решения задачи идентификации зависимостей (5.4.13)-(5.4.15).

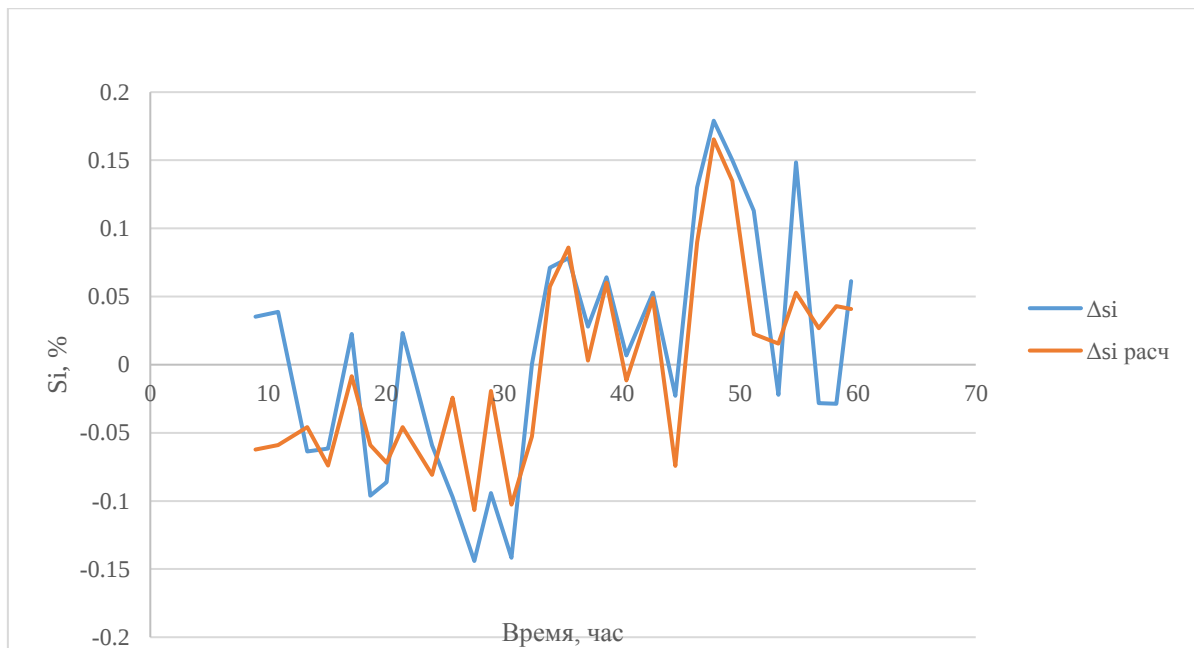


Рис. 5.4.4. Графики реальной траектории $\Delta y_{Si}(t)$ и расчетной $\Delta y_{Si}(\Delta u_{\text{упт}})$

На основе полученных формул решалась задача прогноза изменения траектории $\Delta y_{Si}(t)$ на 8 часов вперед. График прогнозной траектории представлен на рисунке 5.4.5.

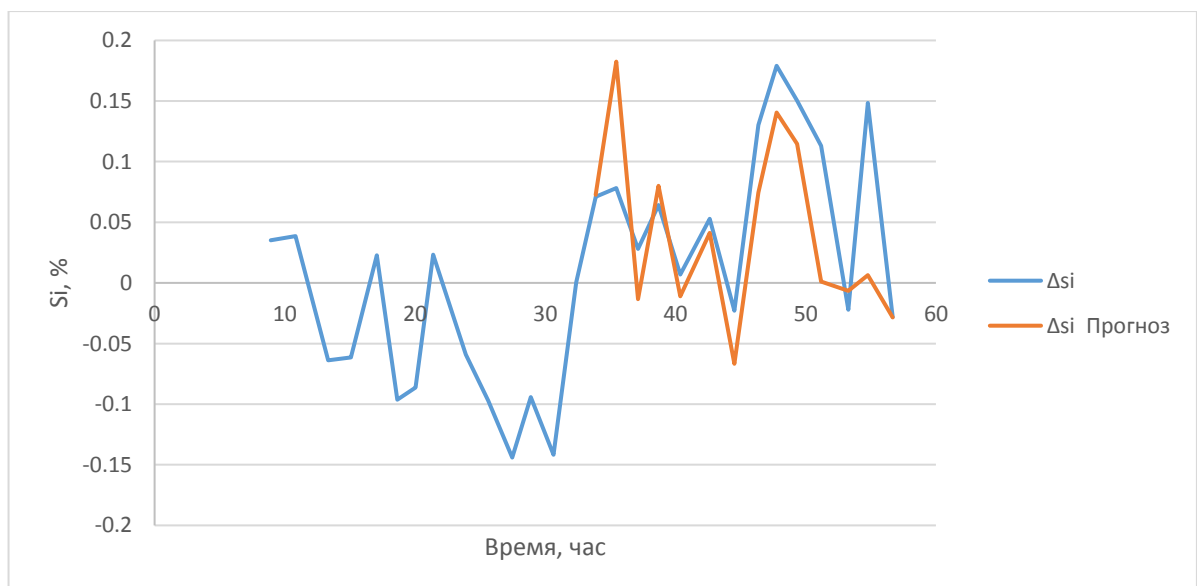


Рис. 5.4.5. График прогнозной траектории $\Delta y_{Si}(t)$

На рисунке 5.4.5 прогноз траектории $\Delta y_{Si}(t)$ указан только для тех участков, для которых формула прогноза была уже идентифицирована на основе предыдущих данных. На предыдущих участках решалась задача идентификации, поэтому точность расчета траектории здесь характеризуется точностью решения задачи идентификации в текущем времени (см. рис. 5.4.4).

Время прогноза на основе построенных зависимостей должно оцениваться от текущего момента времени, который связывается с временем изменения УРТ (подачи кокса). В этом смысле величина запаздывания траектории $\Delta u_{урт}$ от Δy_{Si} в реальном времени представляет собой интервал прогноза значений Δy_{Si} . Так как в наших расчетах величина запаздывания составляла 6 часов, кроме того, сам расчет выполнялся на 8 часов вперед, то общее время прогноза составило 14 часов вперед. На этом интервале прогноза точность решения задачи прогноза составляла до 30 %.

Пример 2. Расчет трендов режимных параметров

В общем случае траектории изменения во времени режимных параметров доменного процесса представляют собой с математической точки зрения нестационарные случайные процессы. Нестационарные математические ожидания этих процессов с технической точки зрения можно трактовать как тренды изменения во времени режимных параметров. Центрированные случайные составляющие процессов можно рассматривать как колебания вокруг трендов.

Рассмотрим зависимости трендов содержания кремния в чугуне y_{Si}^0 от трендов удельного расхода топлива $u_{урт}^0$ и теоретической температуры горения газов печи θ_T^0 , представленных ниже на рис. 5.4.6-5.4.8.

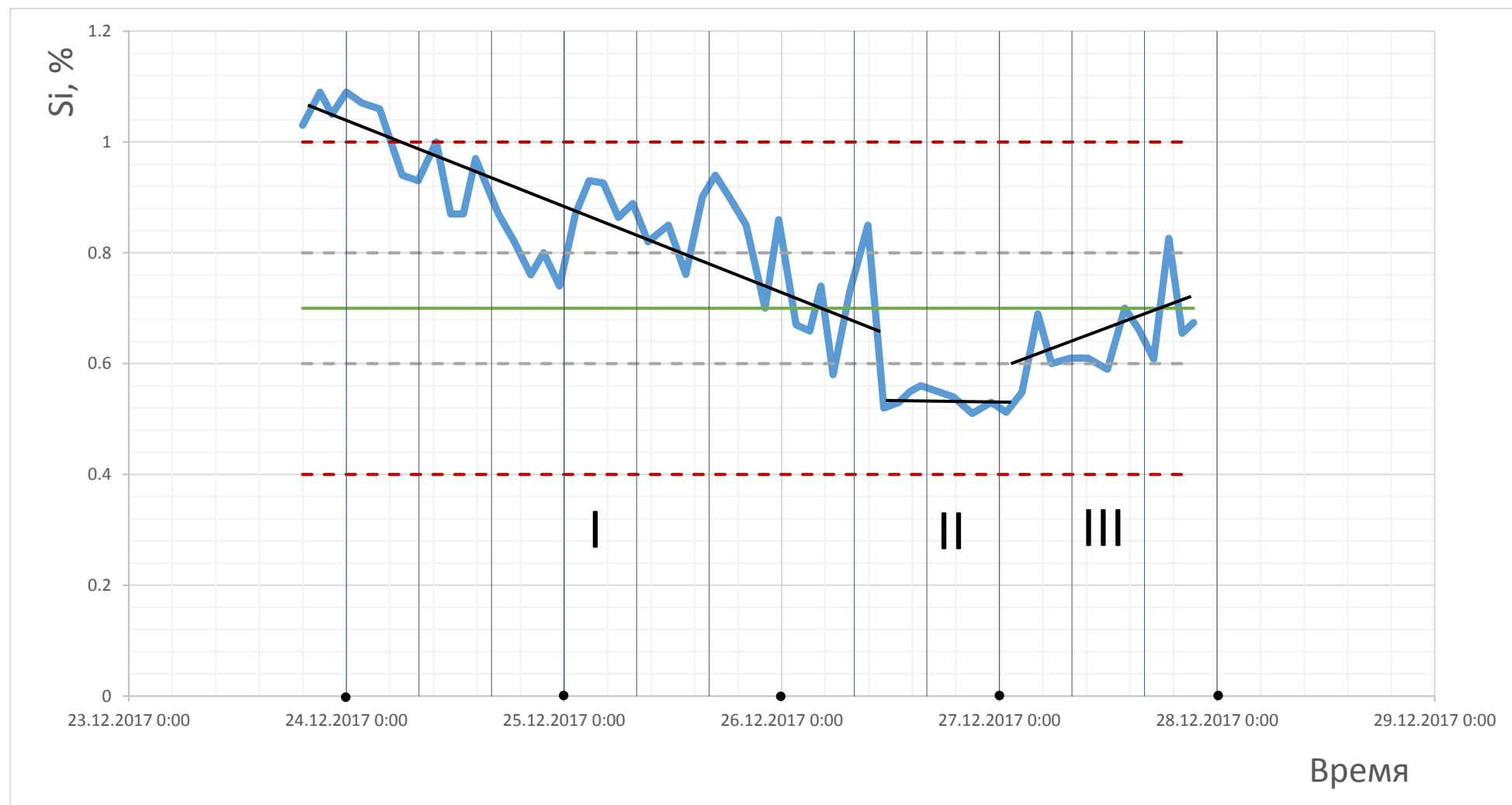


Рис. 5.4.6. Тренды изменения y_{Si}^0

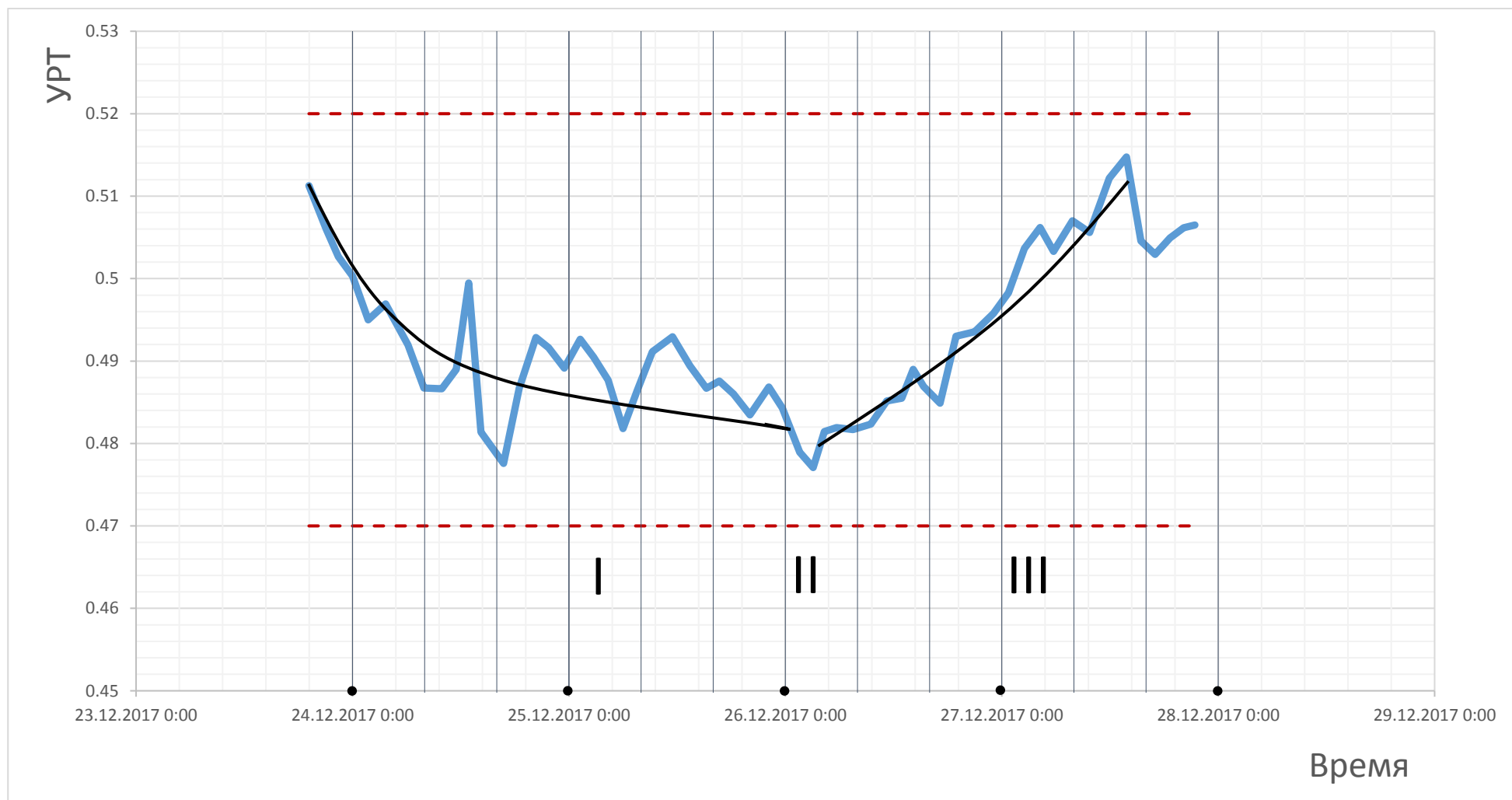


Рис. 5.4.7. Тренды изменения $u^0_{\text{урт}}$

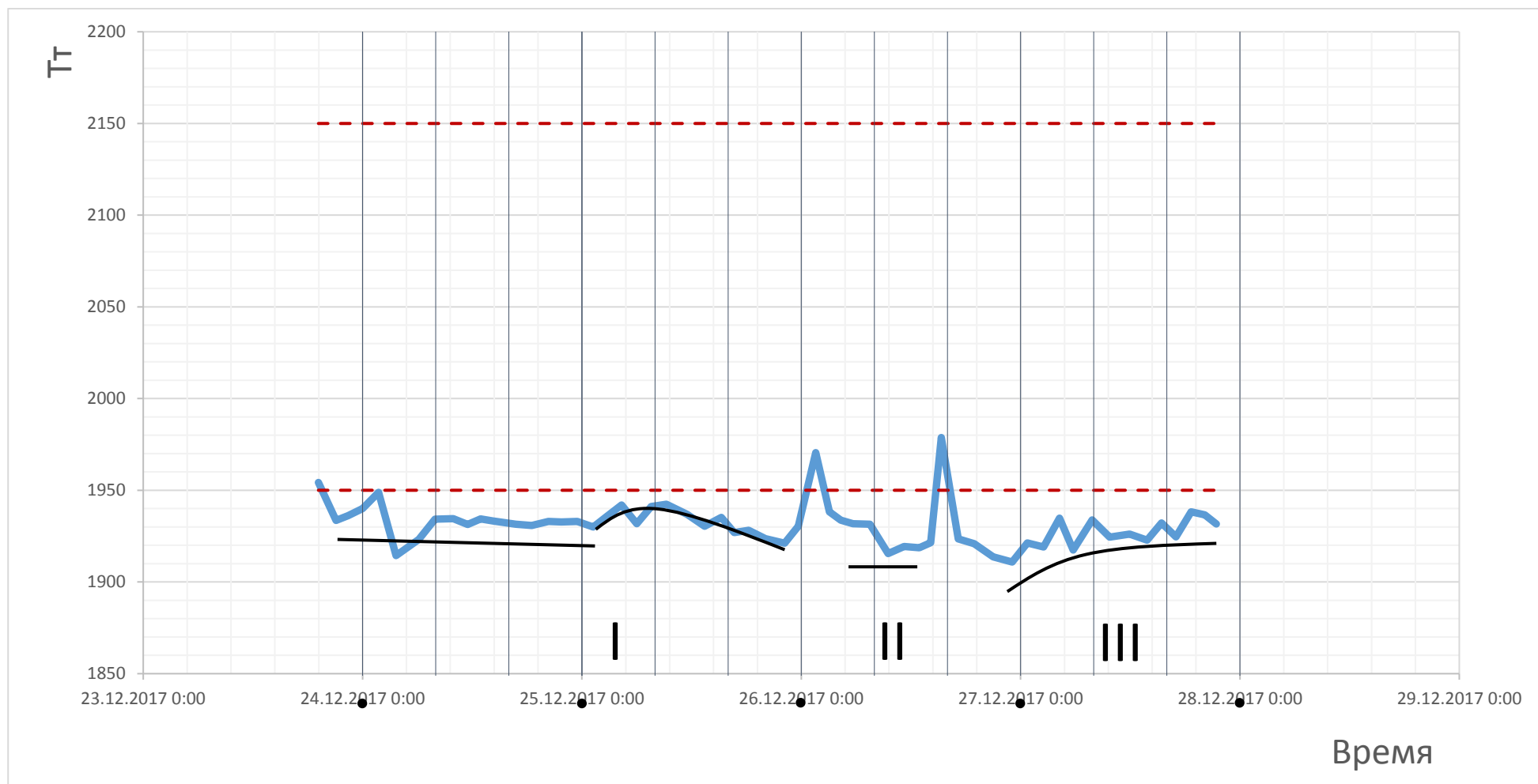


Рис 5.4.8. Тренды изменения θ_T^0

Анализ трендов, представленных на рисунках 5.4.6-5.4.8, показывает, что здесь можно выделить три участка изменения режимных параметров рассматриваемой траектории движения ДП.

Первый участок (I) характеризует последовательное снижение уровня y_{Si}^0 от высоких значений (1%) до номинальных (0,7-0,6%). Выделенный тренд носит регулярный характер и отражает физику процессов, при этом с линейным снижением содержания Si в чугуна уровень УРТ растет замедленно. Это объясняется тем, что при высоких температурах рабочих материалов снижается коэффициент теплопередачи между рабочими газами и материалами. В следствии этого для повышения температуры рабочих материалов при высоких уровнях Si, необходим больший рост значений УРТ по сравнению с номинальным уровнем Si. Соответственно, для снижения температуры рабочих материалов при высоких уровнях Si, необходимо большее снижение значений УРТ, по сравнению с номинальным уровнем Si. Указанная закономерность по аналогии свойственна также участку (III). Здесь с ростом УРТ растет уровень Si в чугуна. На основе анализа приведенных трендов достаточно просто можно оценить текущее значение коэффициента передачи $a_{урт}^0$ от $\Delta u_{урт}^0(t)$ к $\Delta y_{Si}^0(t)$:

$$a_{урт}^0(t_k) = \left(\frac{\Delta y_{Si}^0(t_k)}{\Delta t_k} \right) / \left(\frac{\Delta u_{урт}^0(t_k)}{\Delta t_k} \right). \quad (5.4.16)$$

Критическим участком здесь является участок II траекторий изменения режимных параметров. На этом участке происходит переключение траекторий изменения параметра Si с понижения на повышение. Данный участок не является столь регулярным как участки I и III поэтому проведем более детальный его анализ. С этой целью рассмотрим соответствующие действия мастеров печи по сменам.

1 смена: 0:00-8:00. Наблюдается прохождение траектории изменения уровня Si через номинальное значение 0,7 и дальнейшее его снижение в

сторону похолодания. В следствии этого мастер изменил направление изменения УРТ в стороны повышения. Для преломления инерции процесса снижения уровня Si был дан импульс изменения Тт в сторону повышения.

2 смена: 8:00-16:00. В следствии того, что мероприятия по перелому направления изменения Si были не точно просчитаны, следующая смена наблюдала пик возрастания уровня Si до 0,85%. Для парирования этого пика на 7 часов был снижен уровень Тт. При этом линейка роста кокса, начало которой было положено первой сменой, была продолжена. В результате уровень Si был снижен до 0,55%, что привело к охлаждению печи. Это вынудило в конце смены для парирования охлаждения печи подать положительный пик Тт.

3 смена: 16:00-24:00. В течении смены, несмотря на охлаждение печи, уровень Тт был понижен, тем самым был компенсирован положительный пик Тт, организованный предыдущей сменой. В результате в течении всей третьей смены значение индикатора Si было аномально низким на уровне 0,55%.

На следующий день.

1 смена: 0:00-8:00. Обнаружив низкий уровень значение Si данная смена начала подъем величины Тт. Линейка роста кокса, которой придерживались предыдущие смены, данной сменной была продолжена. В результате начался положительный рост содержания Si в чугуна.

2 смена: 8:00-16:00. Был продолжен рост УРТ, который был начат предыдущими сменами. Уровень Тт поддерживался на постоянном уровне несколько ниже, чем был на участке I. В результате уровень роста УРТ был выше, чем на участке I. В течении этой смены было достигнуто номинальное значение Si равное 0,7%.

В целом необходимо отметить, что действия смен по перелому направления движения Si с понижения в сторону повышения были не точны, особо следует отметить действия 3 смены. Поэтому действия смен по

перелому направлений движения S_i требуют упорядочения с целью более четкой организации данного процесса.

Критическим моментом данных схем является преломление трендов. Угол преломления трендов непосредственно зависит от вторых разностных производных трендов. Здесь необходимо указать т.к. в качестве базовых траекторий изменения S_i приняты линейные изменения, то для них разностные производные второго порядка равны 0. Поэтому ненулевые разностные производные второго порядка характеризуют преломления базовых линейных траекторий. Схема преломления представлена на рисунке 5.4.9.

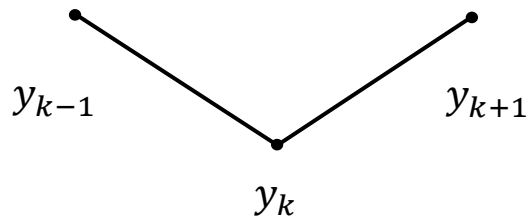


Рис. 5.4.9. Схема преломления трендов

Для схемы преломления трендов (рис. 5.4.9) справедливы следующие отношения:

$$\Delta y_{k+1} = y_{k+1} - y_k$$

$$\Delta y_k = y_k - y_{k-1}$$

$$y_{k+1} = y_k + \frac{\Delta y_{k+1}}{\Delta t_{k+1}} \Delta t_{k+1} \quad (5.4.17a)$$

$$\frac{\Delta y_{k+1}}{\Delta t_{k+1}} = \frac{\Delta y_k}{\Delta t_k} + \frac{\Delta^2 y_{k+1}}{\Delta t_{k+1}} \Delta t_{k+1} \quad (5.4.17b)$$

$$\frac{\Delta^2 y_{k+1}}{\Delta t_{k+1}} = \frac{\frac{\Delta y_{k+1}}{\Delta t_{k+1}} - \frac{\Delta y_k}{\Delta t_k}}{\Delta t_{k+1}} \quad (5.4.17c)$$

В линейном случае в соответствии с ТАУ реакция системы на импульсное воздействие описывается соотношением:

$$y(t) = S_{\text{имп}} \int_0^{\infty} \delta(t - \lambda) \omega(\lambda) d\lambda = S_{\text{имп}} \omega(t), \quad (5.4.18)$$

где $\omega(t)$ – импульсная переходная функция, $S_{\text{имп}}$ – площадь импульса.

В случае инерционной системы первого порядка импульсная переходная функция имеет следующий вид:

$$\omega(t) = \begin{cases} 0, & t < \tau_{\text{зап}} \\ K_{\text{имп}} S_{\text{имп}} \exp\left(-\frac{t - \tau_{\text{зап}}}{T_{\text{ин}}}\right), & t \geq \tau_{\text{зап}} \end{cases} \quad (5.4.19)$$

где $K_{\text{имп}}$ – коэффициент передачи импульса, $T_{\text{ин}}$ – постоянная времени инерции системы, $\tau_{\text{зап}}$ – запаздывание действия импульса на систему.

В настоящее время для доменного процесса динамика действия импульсов по фактору T_t недостаточно исследована. Параметры импульсов T_t могут не измеряться. Поэтому на практике можно поступать следующим образом.

При необходимости импульсной коррекции теплового состояния ДП, например, при переохлаждении подается два импульса T_t . Первый импульс носит пробный характер. По результатам подачи данного импульса можно оценить искомые параметры $K_{\text{имп}}$, $S_{\text{имп}}$ и $T_{\text{ин}}$. Зная данные параметры, можно уже рассчитать величину второго импульса, который скорректирует неточность действия первого импульса на тепловое состояние печи.

Корректирующее действие импульса T_t можно описать формулой:

$$y_{k+1} = y_k + \Delta y_{k+1}. \quad (5.4.20)$$

Полагая, что корректирующее действие импульса рассчитывается в соответствии с формулой (5.4.19), получим:

$$\Delta y_{k+1} = \begin{cases} 0, & t < \tau_{\text{зап}} \\ K_{\text{имп}} S_{\text{имп}} \exp(-\frac{t-\tau_{\text{зап}}}{T_{\text{ин}}}), & t \geq \tau_{\text{зап}} \end{cases} \quad (5.4.21)$$

С учетом сказанного рассмотрим поведение графиков y_{Si} и u_{Tt} на участке II, где представлено преломление трендов. Общая схема данных участков представлена на рисунке 5.4.10.

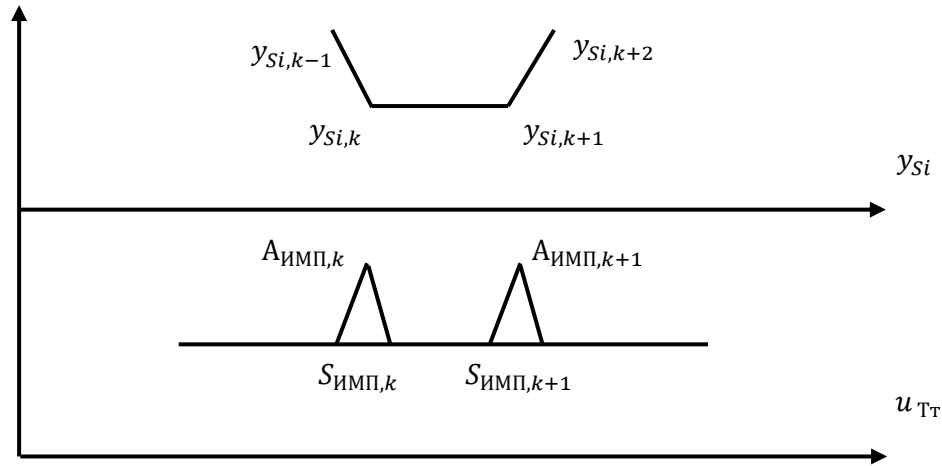


Рис. 5.4.10. Схема преломления трендов

Основные соотношения для схемы преломления трендов (рис. 5.4.10) следующие. Соотношения для вторых производных для моментов времени t_{k+1} и t_{k+2} здесь имеют вид:

$$\frac{\dot{y}_{k+1} - \dot{y}_k}{\Delta t_{k+1}} = K_{\text{имп}} S_{\text{имп},k} \quad (5.4.22a)$$

$$\frac{\dot{y}_{k+2} - \dot{y}_{k+1}}{\Delta t_{k+2}} = K_{\text{имп}} S_{\text{имп},k+1}. \quad (5.4.22b)$$

Площадь импульса в общем случае сложно измерить. Для упрощения задачи будем считать, что площадь импульса пропорциональна их амплитудам:

$$S_{\text{имп},k} \sim A_{\text{имп},k}$$

$$S_{\text{имп},k+1} \sim A_{\text{имп},k+1}$$

Тогда по аналогии можем описать следующие формулы:

$$\frac{\dot{y}_{k+1} - \dot{y}_k}{\Delta t_{k+1}} = K_{\text{имп}} A_{\text{имп},k}$$

$$\frac{\dot{y}_{k+2} - \dot{y}_{k+1}}{\Delta t_{k+2}} = K_{\text{имп}} A_{\text{имп},k+1}.$$

По результатам подачи первого пробного импульса определяется коэффициент передачи импульса:

$$K_{\text{имп}} = \frac{\dot{y}_{k+1} - \dot{y}_k}{\Delta t_{k+1} A_{\text{имп},k}}$$

Задание по перелому тренда формально можно записать как задание $\dot{y}_{k+2}$. На основе этого задания можно определить амплитуду импульса, необходимую для заданного преломления тренда

$$A_{\text{имп},k+1} = \frac{\dot{y}_{k+2} - \dot{y}_{k+1}}{\Delta t_{k+2} K_{\text{имп}}} . \quad (5.4.23)$$

Пример 3. Оперативная коррекция траектории изменения y_{Si} на основе модельно-упреждающего управления

Как показывают приведенные выше примеры, следующие проблемы препятствуют успешному решению задачи управления режимным параметром y_{Si} на основе подачи топлива.

1⁰. Так согласно расчетам, проведенных в *примере 1*, ошибка прогноза y_{Si} может достигать 30 %. Это говорит о том, что доменный процесс находится под воздействием *неопределенных возмущающих факторов*. В соответствии с теорией автоматического управления преодоление влияния неопределенных возмущений на объект управления в этих условиях может осуществляться на основе закона регулирования близкого к *релейному*. Такой закон имеет *зону*

нечувствительности характеристики регулирования в начале координат и определенную величину *коэффициента усиления*, необходимых для *преодоления неопределенности*. При таких условиях процесс регулирования неизбежно носит *колебательный характер*.

2⁰. Прохождение действия подачи топлива $u_{урт}$ до выходной реакции объекта управления, измеряемой индикатором y_{Si} (канал связи $u_{урт} \rightarrow y_{Si}$), характеризуется ярко выраженными *нестационарными временными характеристиками*. К таким характеристикам следует отнести: транспортные и инерционные запаздывания прохождения действия топлива по технологическим этапам в колошнике, шахте и горне домны, а также на этапе лабораторных исследований. Кроме того, необходимо учитывать переменные интервалы дискретных действий: засыпи шихты, выпуска металла, лабораторных измерений и др. При решении задачи анализа результатов подач все это затрудняет оценку воздействия конкретной подачи топлива на соответствующий результат вследствие отсутствия их точной *динамической синхронизации*. Однако в случае колебательного характера подач подобную синхронизацию можно выполнить: сначала на основе оценки числа периодов колебаний, затем более точно на основе оценки фазового сдвига колебаний. Тем самым можно осуществить совмещение в текущем времени амплитуды подачи топлива и амплитуды соответствующего выходного результата. Это дает возможность на основе решения задачи анализа оценить статические коэффициенты передачи канала связи $u_{урт} \rightarrow y_{Si}$. Один из способов решения данной задачи приведен выше в *примере 1*.

3⁰. Статические коэффициенты передачи канала $u_{урт} \rightarrow y_{Si}$ являются нелинейными. При снижении разности температур газов и рабочих материалов в печи теплообмен между ними падает и соответствующий коэффициент передачи падает. И наоборот, при увеличении разности температур газов и материалов коэффициент теплообмена растет и соответственно коэффициент передачи также растет. Один из способов учета

нелинейности коэффициента передачи канала $u_{урт} \rightarrow y_{Si}$ приведен выше в *примере 1*.

В целом расчетная схема оперативной коррекции траектории изменения y_{Si} на основе модельно-упреждающего управления представлена на рис. 5.4.11.

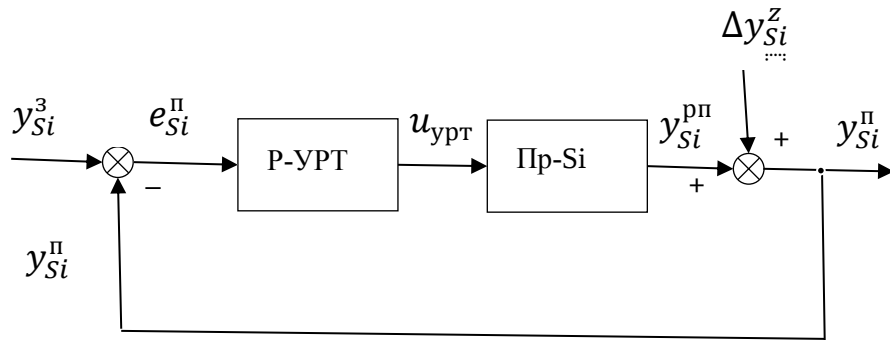


Рис. 5.4.11. Расчетная схема оперативной коррекции y_{Si}

Здесь y_{Si}^3 – заданное значение y_{Si} ; $y_{Si}^п = y_{Si}^п(t_k + \tau_{пр})$ – прогнозное значение y_{Si} , где t_k – текущее значение физического времени, $\tau_{пр}$ – интервал прогноза; $e_{Si}^п = e_{Si}^п(t_k + \tau_{пр})$ – прогнозное значение ошибки регулирования y_{Si} ; $u_{урт} = u_{урт}(t_k)$ – текущее значение оценки удельного расхода топлива в подаче; $y_{Si}^{пп} = y_{Si}^{пп}(t_k + \tau_{пр})$ – регулярная составляющая прогнозного значения $y_{Si}^п$; $y_{Si}^z = y_{Si}^z(t_k + \tau_{пр})$ – случайная составляющая прогнозного значения $y_{Si}^п$.

Базовыми блоками расчетной схемы рис. 5.4.11 являются: Пр-Si – процедура прогноза траектории изменения y_{Si} , исходя из заданной траектории изменения $u_{урт}$; Р-УРТ – процедура расчета допустимой траектории изменения $u_{урт}$, обеспечивающей ошибку регулирования y_{Si} не более заданной величины e_{Si}^3 .

Что касается процедуры Пр-Si – прогноза траектории изменения y_{Si} , то данная задача была уже рассмотрена выше как составляющая приведенных стратегий регулирования, так и в численных *примерах 1, 2*. Поэтому остановимся более подробно на процедуре Р-УРТ – расчета допустимой траектории изменения $u_{урт}$.

Расчет допустимой траектории изменения $u_{урт}$ можно формализовано выполнить на основе решения системы несовместных взвешенных неравенств:

$$-e_{Si}^3 \leq y_{Si}^3 - y_{Si}^n(t_k + \Delta t_{k+l} + \tau_{пр}) \leq e_{Si}^3; \mu_{k+l}; \alpha_{k+l};$$

$$y_{Si}^{пр}(t_k + \Delta t_{k+l} + \tau_{пр}) = \text{PrSi}(u_{урт}(t_k + \Delta t_{k+l}));$$

$$y_{Si}^n = y_{Si}^{пр}(t_k + \Delta t_{k+l} + \tau_{пр}) + y_{Si}^z(t_k + \Delta t_{k+l} + \tau_{пр});$$

$$|u_{урт}(t_k + \Delta t_{k+l}) - u_{урт}(t_k + \Delta t_{k+l-1})| \leq \Delta u_{урт}^{max};$$

$$l = 1, 2, \dots, n.$$

Решение данной системы неравенств осуществляется по критерию:

$$\max_{\{l\}} C = \sum_{l=1}^n \alpha_{k+l} \mu_{k+l};$$

где μ_{k+l} – булева переменная, которая служит индикатором выполнения $(k + l)$ -го неравенства, α_{k+l} – вес $(k + l)$ -го неравенства: веса являются нормированными, сумма весов дает относительную оценку числа выполненных неравенств.

В результате решения представленной выше задачи Р-УРТ определяется допустимая траектория изменения $u_{урт}(t_k + \Delta t_{k+l})$, обеспечивающая регулирование выходного параметра с заданной точностью e_{Si}^3 . В соответствии с общим подходом модельно-упреждающего управления в качестве рекомендуемого решения принимается один шаг вперед по

допустимой траектории. После этого снова проводится полный цикл решения задачи по обновленным данным на один шаг вперед.

В заключении необходимо отметить, что рассмотренная процедура расчета коррекции траектории изменения УРТ позволяет экономить топливо при ведении доменного процесса, не нарушая заданного теплового режима процесса.

5.4.2. Примеры реализации модельно-упреждающего управления тепловым состоянием доменной печи

На рис. 5.4.12-5.4.13 показаны графики переходных процессов влияния удельного расхода кокса на показатели ведения доменной плавки.

На рис. 5.4.12 показан график переходного процесса влияния изменения удельного расхода кокса на показатель теплового состояния доменной печи – содержание кремния в чугуне.

На рис. 5.4.13 показан график переходного процесса влияния изменения удельного расхода кокса на показатель теплового состояния доменной печи – температуру горна доменной печи.

На рис. 5.4.14 показан график переходного процесса влияния изменения удельного расхода кокса на показатель теплового состояния доменной печи – температуру шахты доменной печи.

На рис. 5.4.15 показан график переходного процесса влияния изменения удельного расхода кокса на показатель теплового состояния доменной печи – титановый модуль.

Приведенные графики визуализируют в АСДУ «ПолиТЭР» реальные переходные процессы, которые наблюдает оператор печи по результатам управляющих воздействий. На основе указанных данных соответствующая программа АСДУ «ПолиТЭР» осуществляет идентификацию в реальном времени коэффициентов передаточных функций по каналам воздействий.

Далее с использованием программы прогнозирования осуществляется расчет установившихся значений параметров режимов, к которым стремятся переходные процессы. Если прогнозируемые установившиеся значения параметров не совпадают с целевыми установками оператора, то оператор вводит дополнительные корректирующие воздействия с целью достижения желаемых значений режимных параметров.

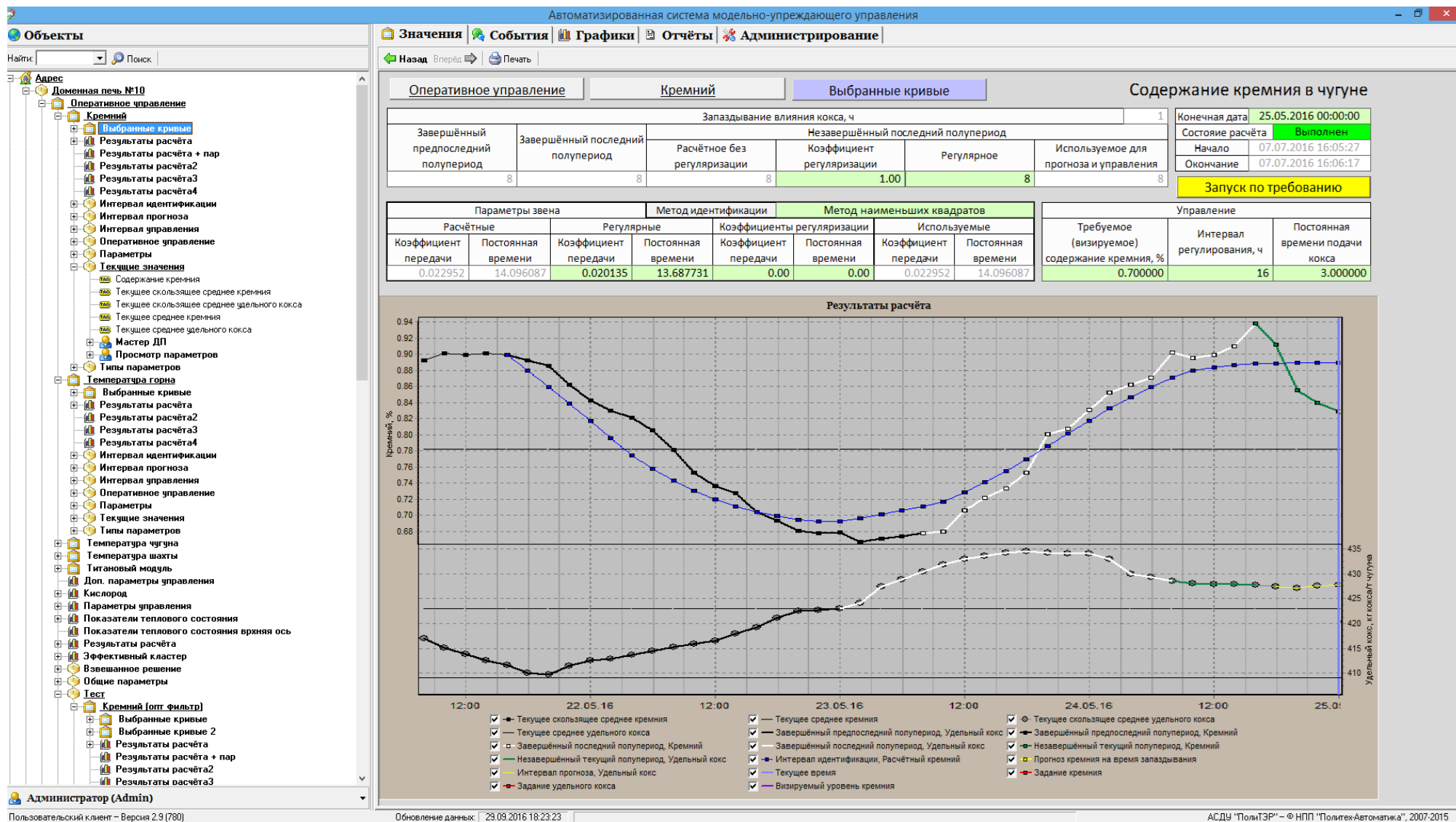


Рис. 5.4.12. График переходного процесса влияния изменения удельного расхода кокса на показатель теплового состояния доменной печи – содержание кремния в чугуне

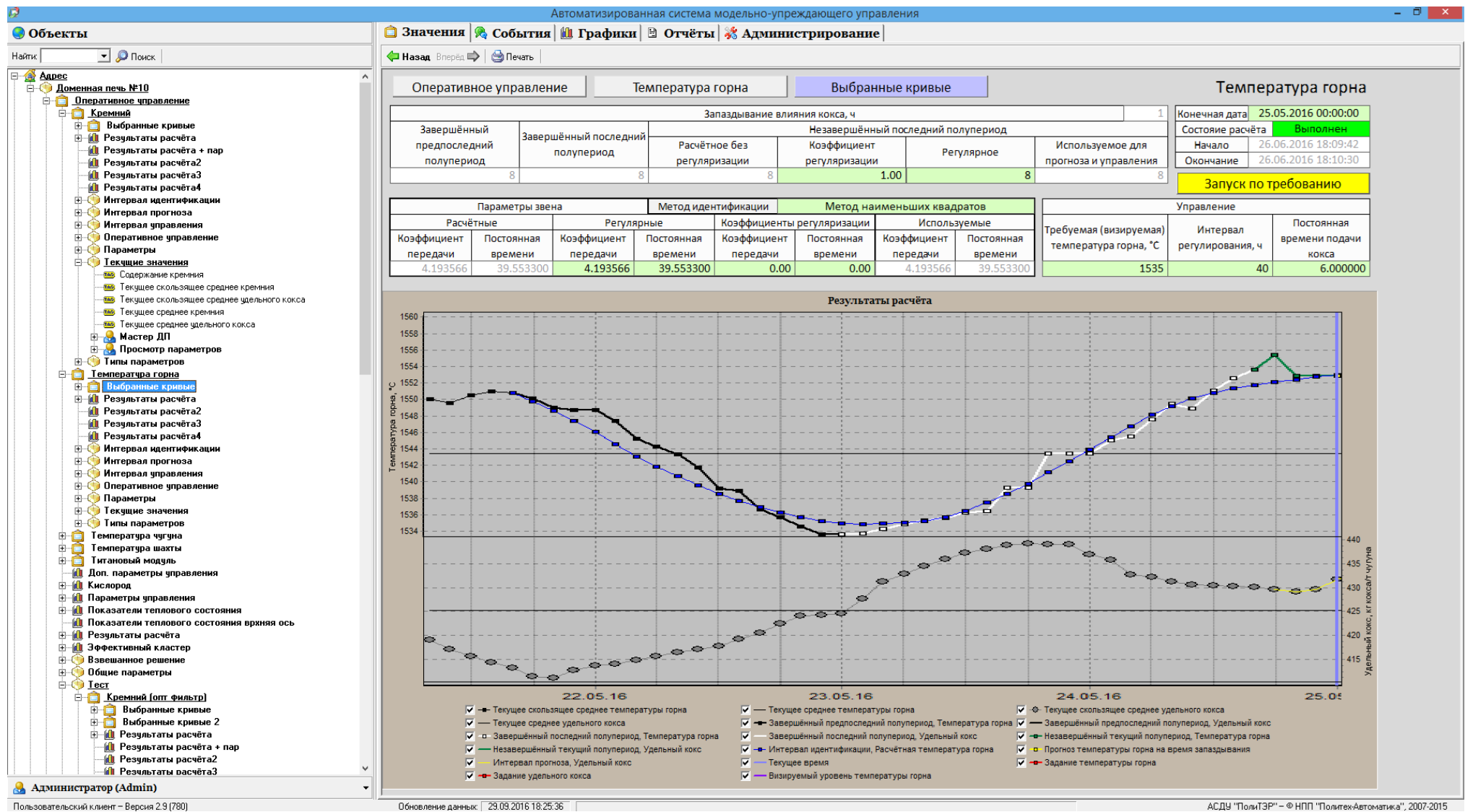


Рис. 5.4.13. График переходного процесса влияния изменения удельного расхода кокса на показатель теплового состояния доменной печи – температуру горна ДП

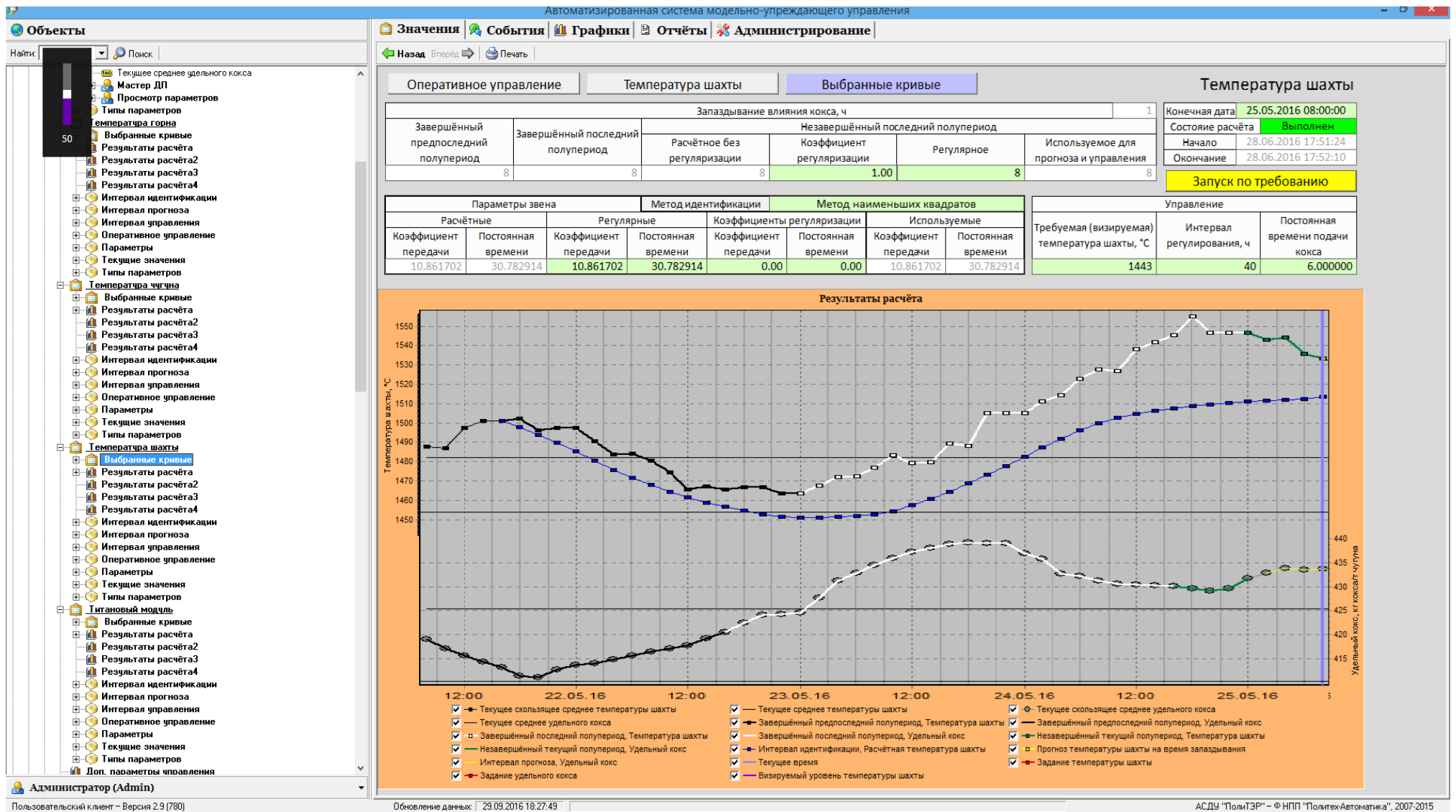


Рис. 5.4.14. График переходного процесса влияния изменения удельного расхода кокса на показатель теплового состояния доменной печи – температуру шахты ДП

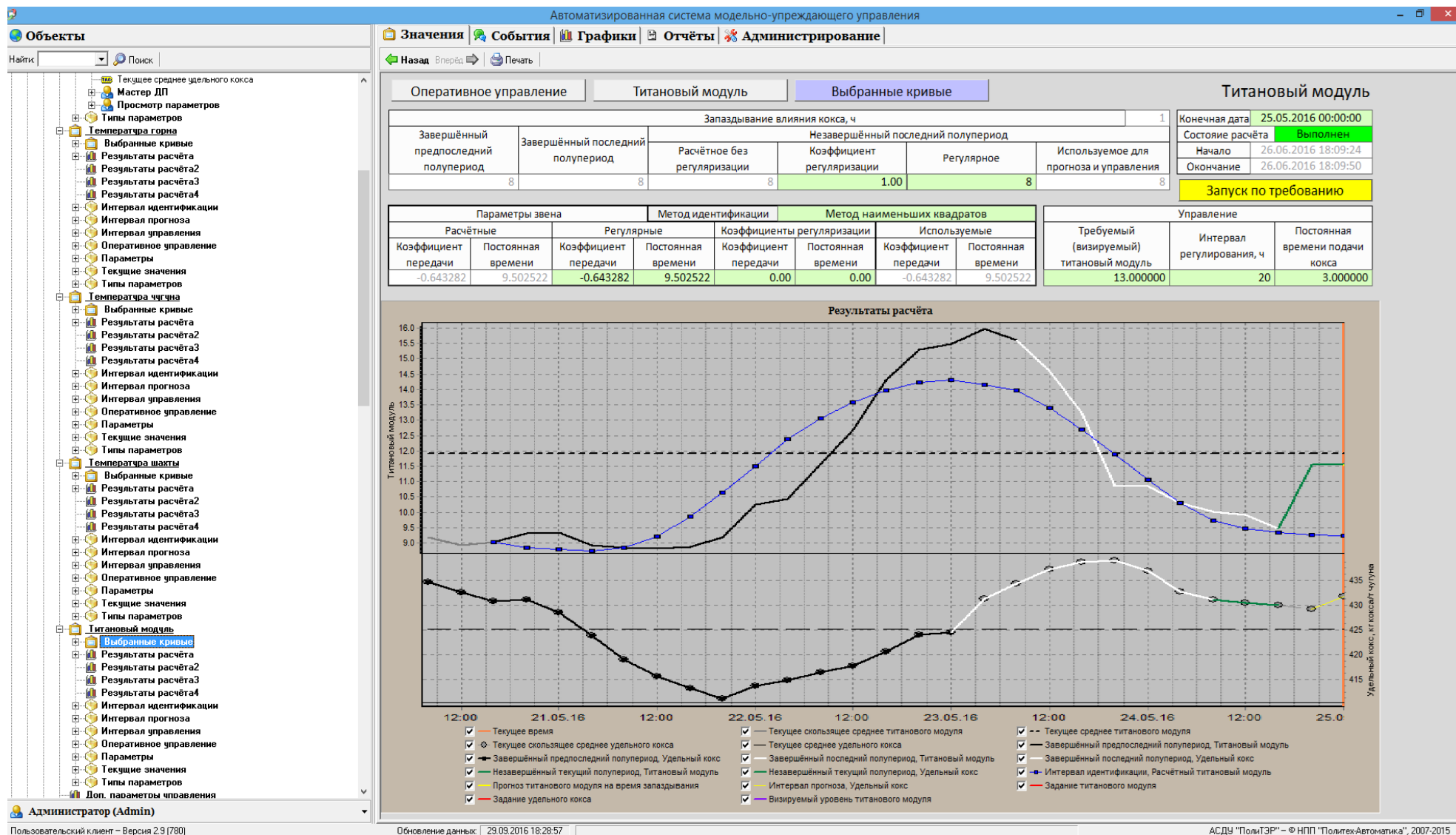


Рис. 5.4.15. График переходного процесса влияния изменения удельного расхода кокса на показатель теплового состояния доменной печи – титановый модуль

5.5. Анализ данных по эффективности доменных процессов при использовании в режиме советчика АСУ «ПолиТЭР»

В работе разработано программное обеспечение определения оптимальных значений технологических параметров доменной плавки для решения задач максимизации выработки чугуна, минимизации потребления кокса, минимизации себестоимости чугуна и стали.

В состав функциональной структуры автоматизированной системы управления эффективностью доменным процессом (оптимальный адаптивный и технико-экономический уровень) входят следующие основные модули (вычислительные процедуры):

- инициализация текущего режима работы ДП;
- расчет экономического эффекта при изменении основных технологических параметров;
- оптимизация качества кокса ($M10$) по критерию максимума производительности;
- оптимизация качества кокса ($M10$) по критерию минимума удельного расхода кокса;
- оптимизация качества кокса ($M10$) по критерию минимума себестоимости чугуна;
- оптимизация качества кокса ($M10$) по критерию минимума себестоимости стали;
- оптимизация доли агломерата в шихте по критерию максимума производительности;
- оптимизация доли агломерата в шихте по критерию минимума удельного расхода кокса;
- оптимизация доли агломерата в шихте по критерию минимума себестоимости чугуна;
- оптимизация доли агломерата в шихте по критерию минимума себестоимости стали;

- оптимизация отношения удельного природного газа и технологического кислорода по критерию максимума производительности;
- оптимизация отношения удельного удельного природного газа и технологического кислорода по критерию минимума удельного расхода кокса;
- расчет факторных коэффициентов влияния изменений параметров на расход кокса в подачу и производительность чугуна ДП.

Выполнение оптимизационных процедур и расчет экономического эффекта происходит по запросу пользователя. Остальные функции выполняются автоматически при запуске web-приложения.

После прохождения процесса авторизации происходит загрузка стартовой страницы приложения (рисунок 5.5.1).

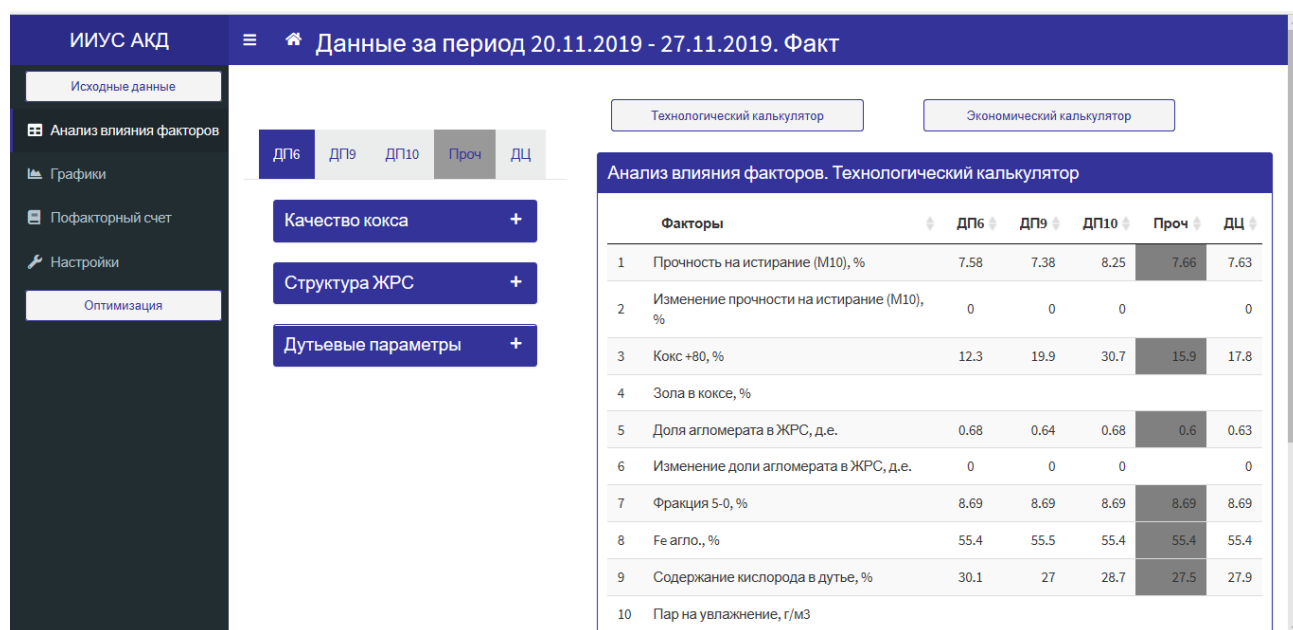


Рис. 5.5.1. Мнемосхема стартовой страницы приложения

Для переключения основных страниц используется основное меню программы (рисунок 5.5.2).

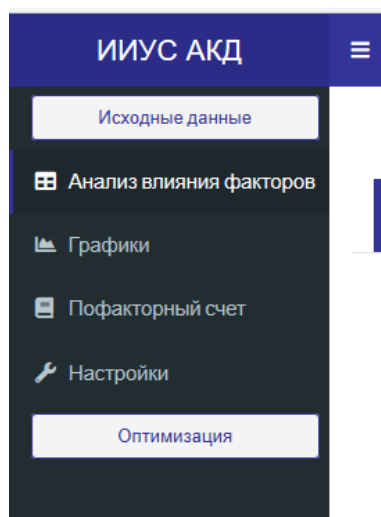


Рис. 5.5.2. Мнемосхема основного меню программы

На рисунке 5.5.3. представлена мнемосхема выбора периода анализа и настройки набора анализируемых статистических данных.

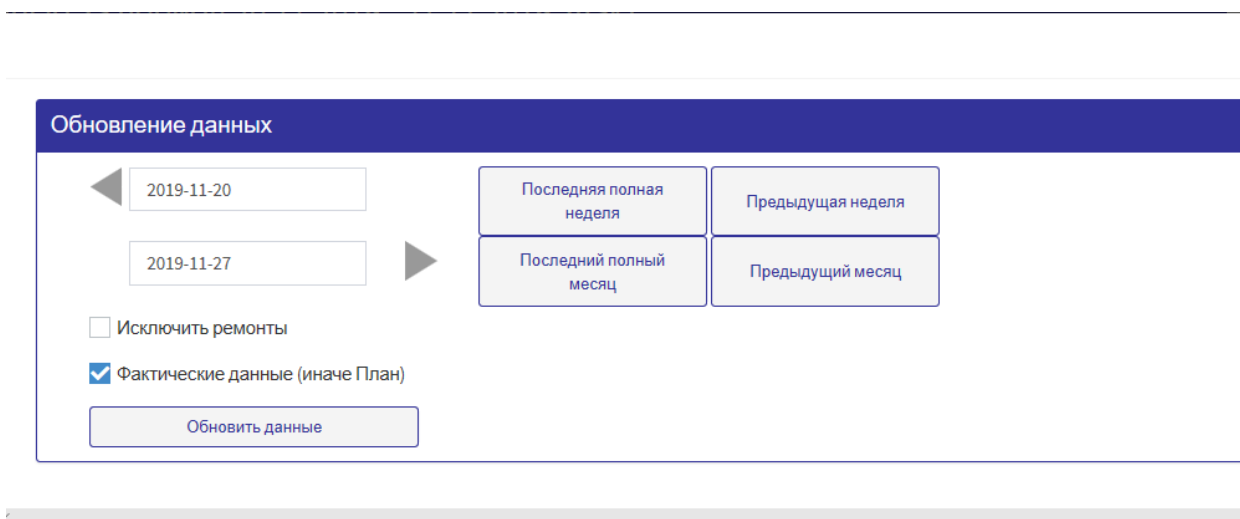


Рис. 5.5.3. Мнемосхема выбора периода анализа и настройки набора анализируемых статистических данных

На рисунке 5.5.4 представлено окно с возможностью выбора критерия оптимизации технологических параметров доменного процесса с целью нахождения оптимальных значений, а именно максимума производительности, минимума удельного расхода кокса, минимума себестоимости чугуна, минимума себестоимости стали.



Рис. 5.5.4. Мнемосхема окна оптимизации технологических параметров

Пример результатов оптимизации технологических параметров по критерию максимума производительности приведен на рисунке 5.5.5.

Результаты оптимизации по критерию максимума производительности (M10)						
Факторы	ДП6	ДП9	ДП10	Проч	ДЦ	
1 Прочность на истирание (M10), %	7.5	7.3	8.17	7.39	7.55	
2 Изменение прочности на истирание (M10), %	-0.08	-0.08	-0.08		-0.08	
3 Доля агломерата в ЖРС, д.е.	0.68	0.64	0.68	0.6	0.63	
4 Изменение доли агломерата в ЖРС, д.е.	0	0	0		0	
5 Изменение УРК, кг/т	-0.6	-0.9	-1	0	-0.8	
6 Изменение производительности, т/сут	7.41	12.9	9.13	0	29.4	

Рис. 5.5.5. Мнемосхема окна оптимизации технологических параметров по критерию максимума производительности

На рисунке 5.5.6 приведена мнемосхема анализа влияния факторов на экономические показатели доменной плавки – «Экономический калькулятор».

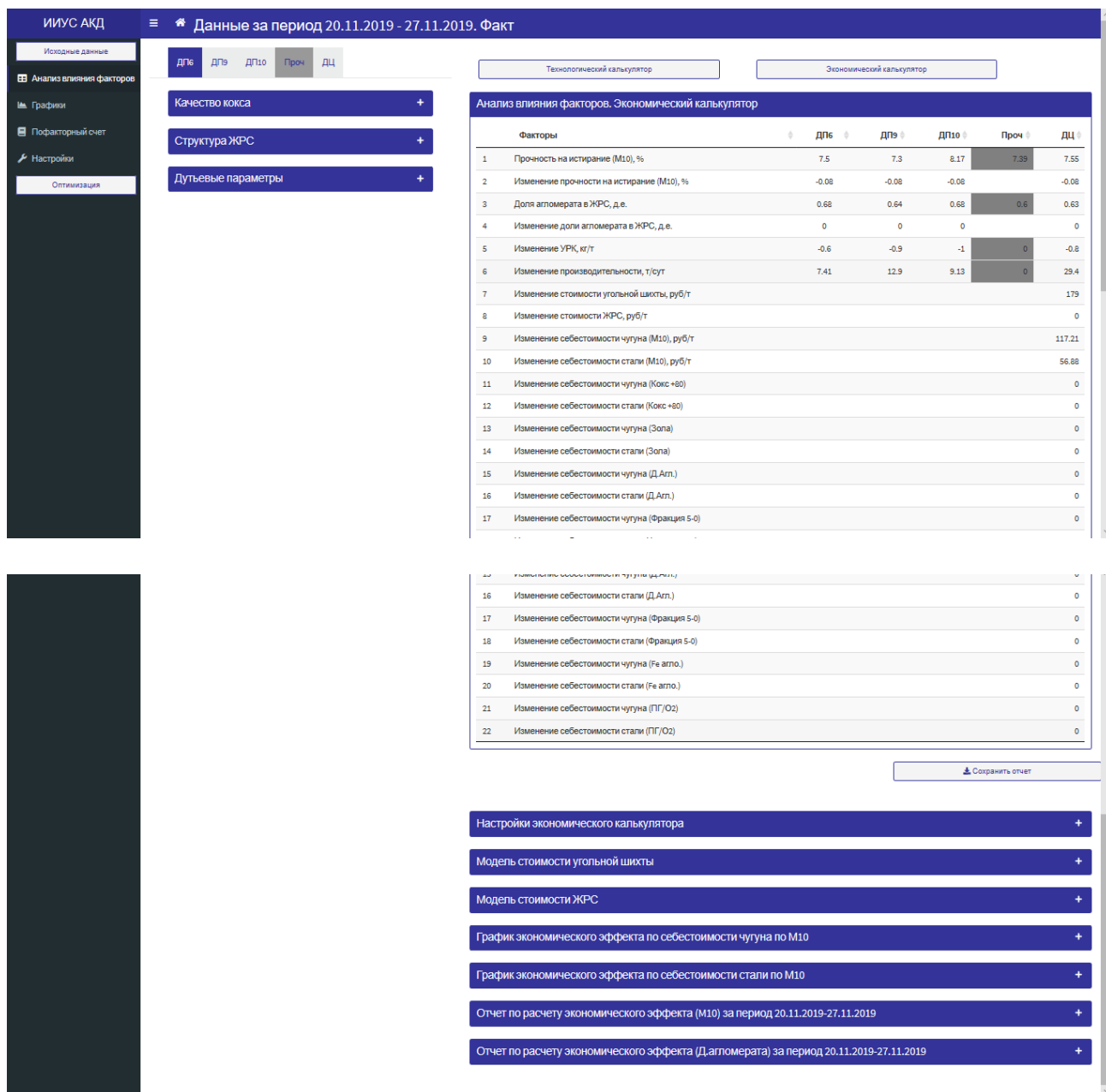


Рис. 5.5.6. Мнемосхема «Экономический калькулятор»

Для анализа текущего режима работы доменных печей в разработанном программном обеспечении используется вывод в графическом виде рабочего кластера с математической зависимостью влияния выбранного технологического параметра на производительность и удельный расход кокса. На вкладке «Графики» пользователю доступен просмотр статистических данных работы печей, а также текущие режимы работы (рисунок 5.5.7).

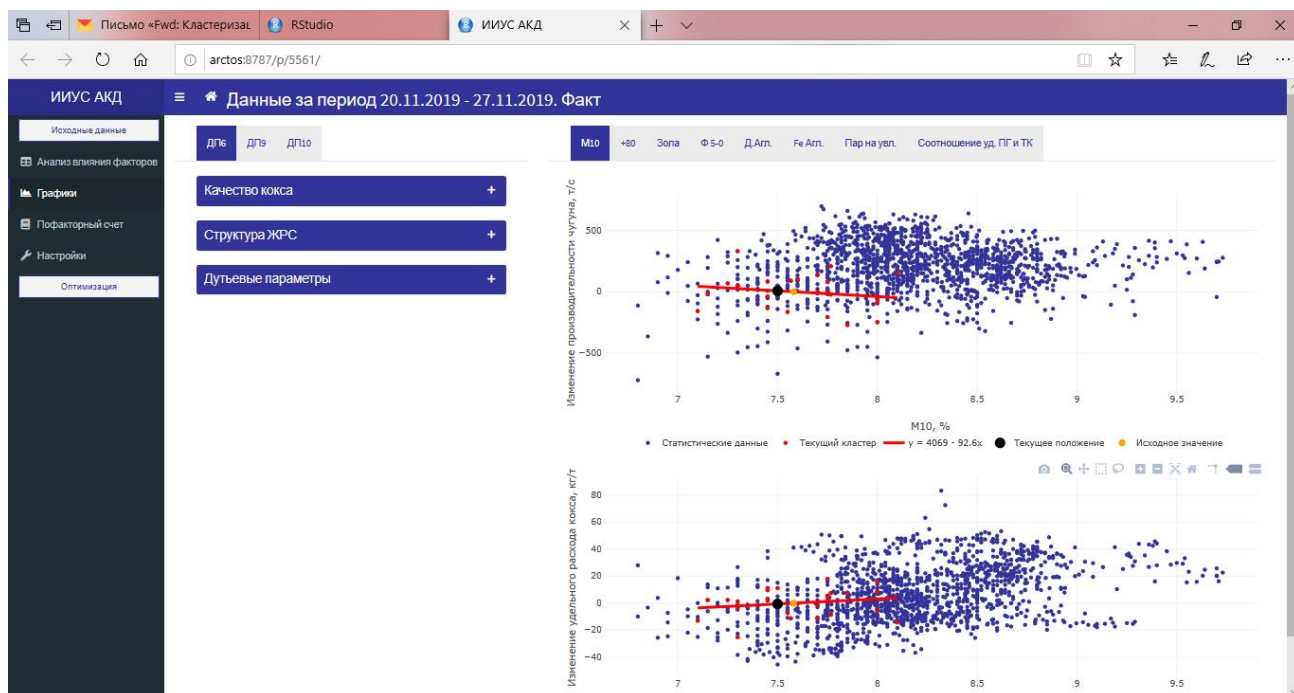


Рис. 5.5.7. Мнемосхема вкладки «Графики»

Разработанное программное обеспечение позволяет динамически определять коэффициенты влияния технологических параметров на производительность и удельный расход кокса в зависимости от режима работы доменных печей. Пример расчета основных коэффициентах пофакторного счета приведен на рисунке 5.5.8.

Мероприятия	Изменение расхода кокса, %	Изменение производительности, %
1 Уменьшение истираемости кокса по M10 на 1%	-1.7	2.75
2 Увеличение массовой доли кокса фракции +80 на 1%	0.15	-0.17
3 Снижение массовой доли мелочи (фракции 0 – 5 мм) в рудной сыпи на 1%	-1.28	0.44
4 Увеличение массовой доли железа в агломерате на 1%	-1.07	2.05
5 Увеличение массовой доли агломерата в ЖРС на 1%	0.1	-0.21

Рис. 5.5.8. Мнемосхема вкладки «Пофакторный счет»

Также разработанное программное обеспечение позволяет в имитационном режиме отследить влияние изменения входных технологических параметров на эффективность доменной плавки.

На рисунках 5.5.9-5.5.15 приведены примеры определения технико-экономической эффективности изменения технологических параметров, а именно влияние изменения одного либо совокупности технологических параметров на себестоимость стали и чугуна.

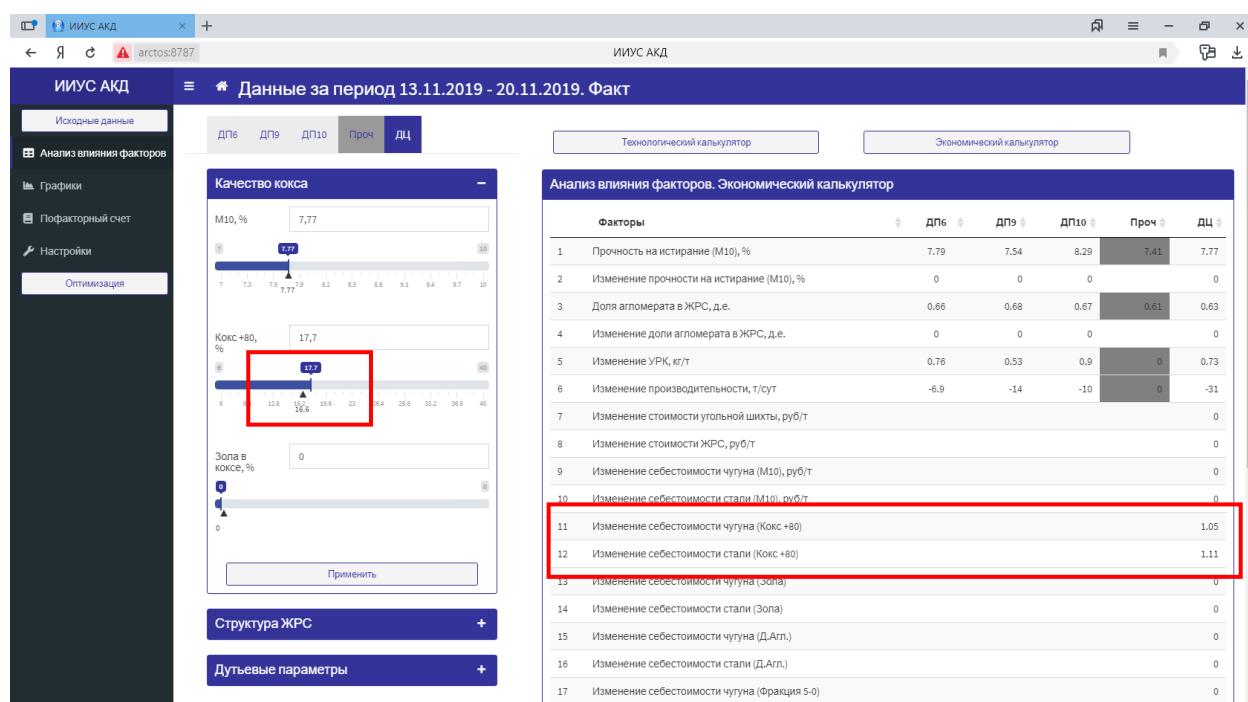


Рис. 5.5.9. Изменение показателя «Кокс +80» по цеху на 1% привело к изменению себестоимости чугуна на 1.05 р/т, а себестоимости стали на 1.11 р/т

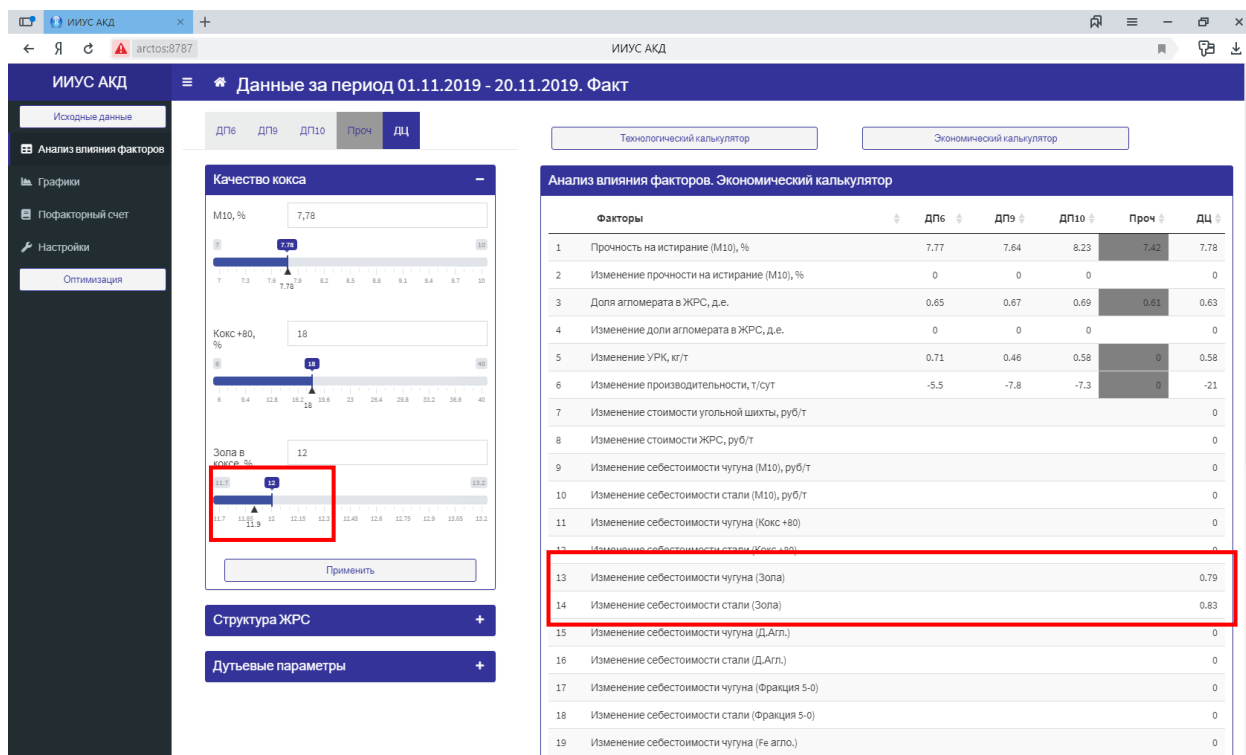


Рис. 5.5.10. Изменение показателя «Зола в коксе» по цеху на 0.1% привело к изменению себестоимости чугуна на 0,79 р/т, а себестоимости стали на 0,83 р/т

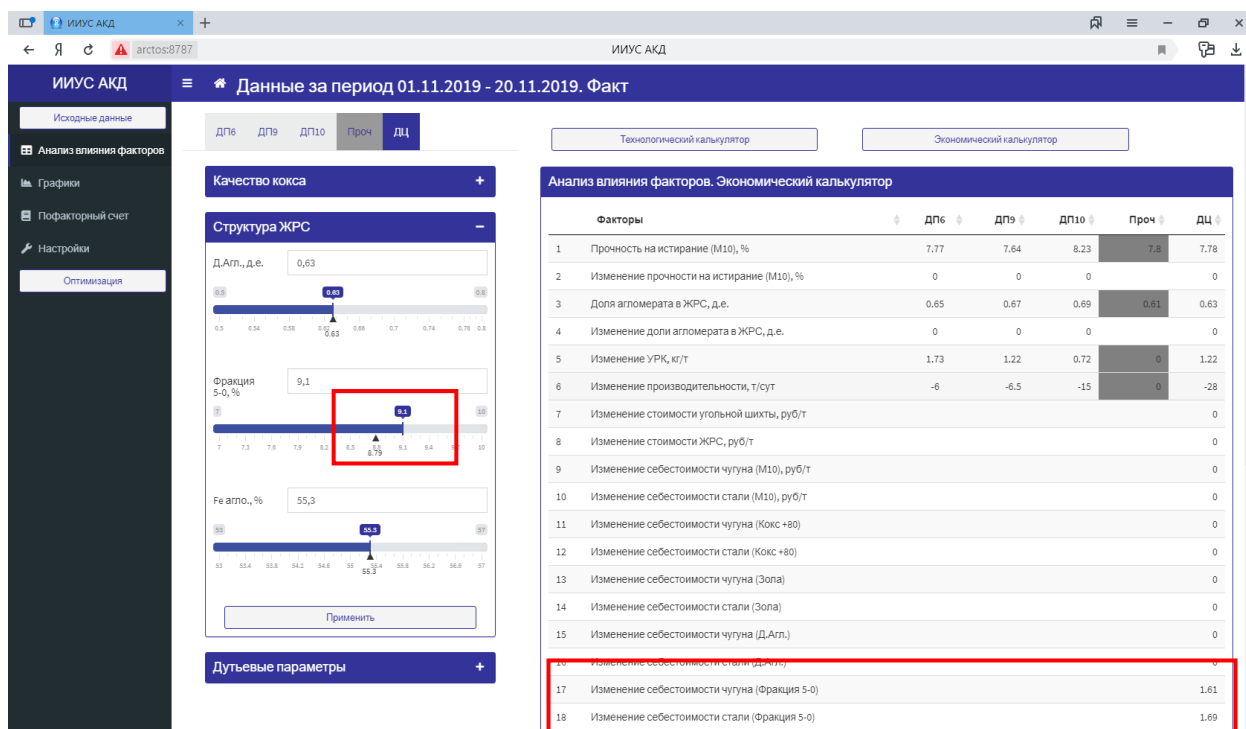


Рис. 5.5.11. Изменение показателя «Фракция 5-0» по цеху на 0.3% привело к изменению себестоимости чугуна на 1,61 р/т, а себестоимости стали на 1,69 р/т

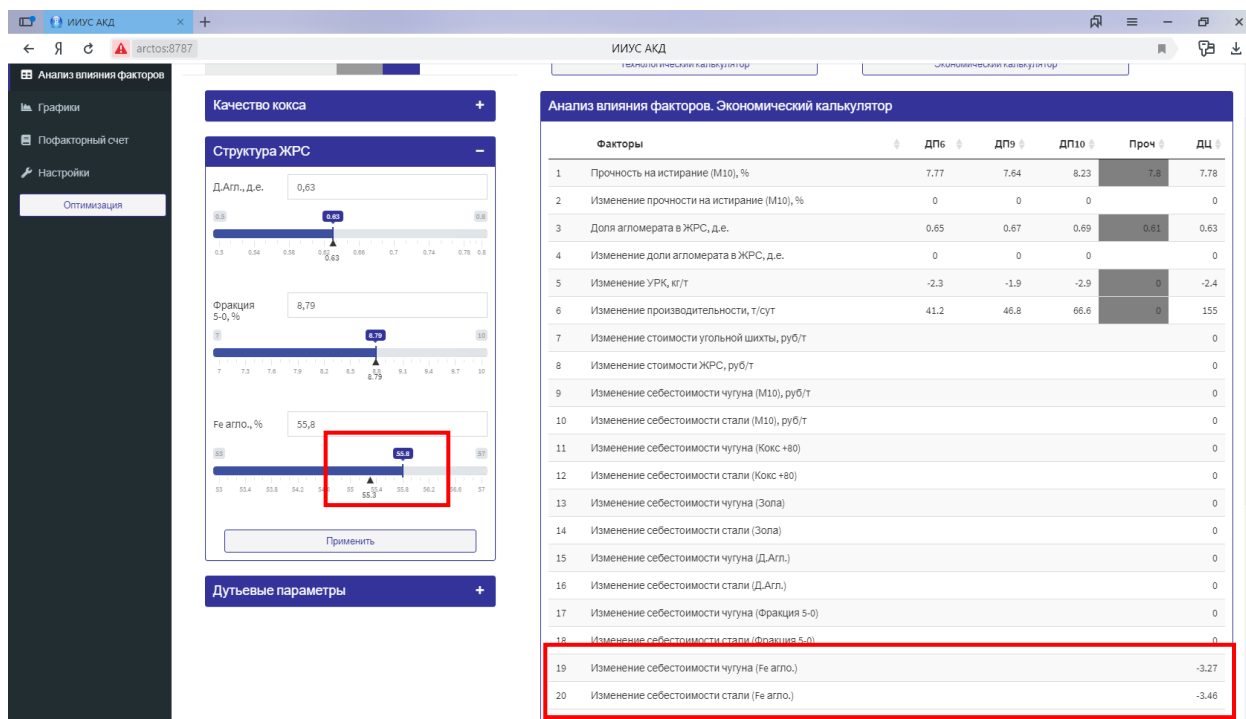


Рис. 5.5.12. Изменение показателя «Fe агло.» по цеху на 0.4% привело к изменению себестоимости чугуна на -3.27 р/т, а себестоимости стали на -3.46 р/т

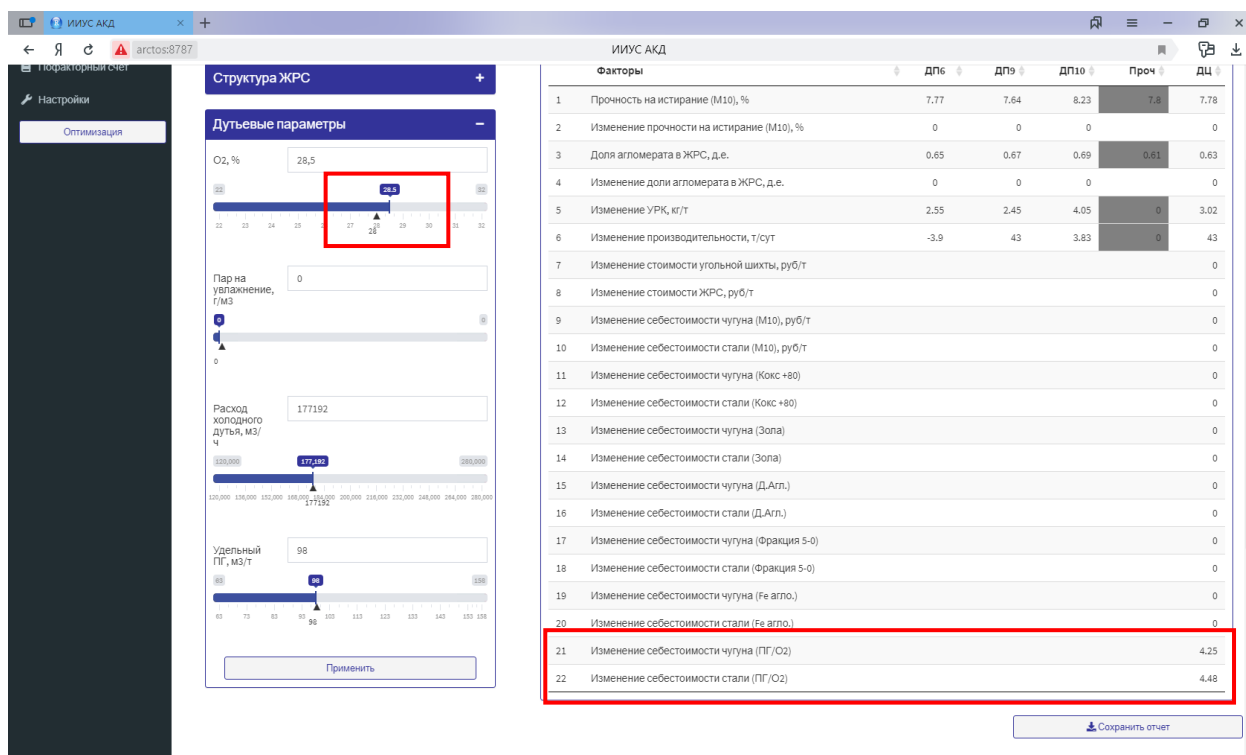


Рис. 5.5.13. Изменение показателя «O2» по цеху на 0.5% привело к изменению себестоимости чугуна на 4.25 р/т, а себестоимости стали на 4.48 р/т

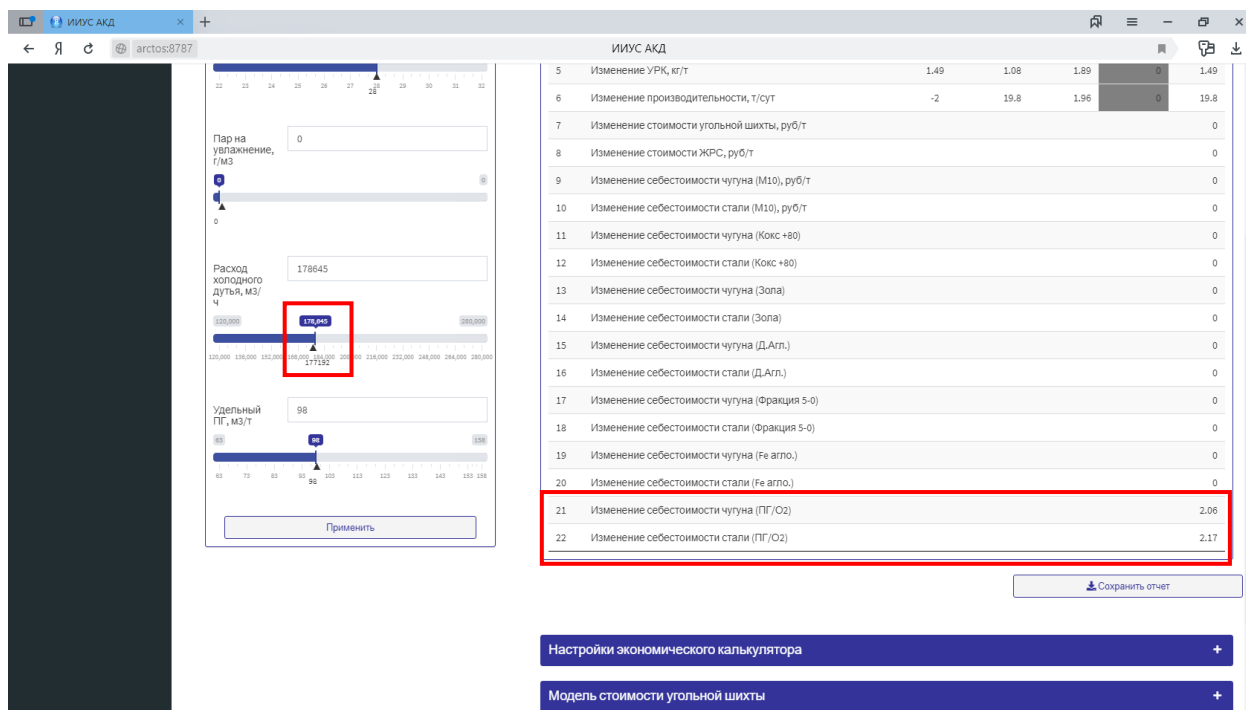


Рис. 5.5.14. Изменение показателя «Расход холодного дутья» по цеху на 1000 м³/ч привело к изменению себестоимости чугуна на 2.06 р/т, а себестоимости стали на 2.17 р/т

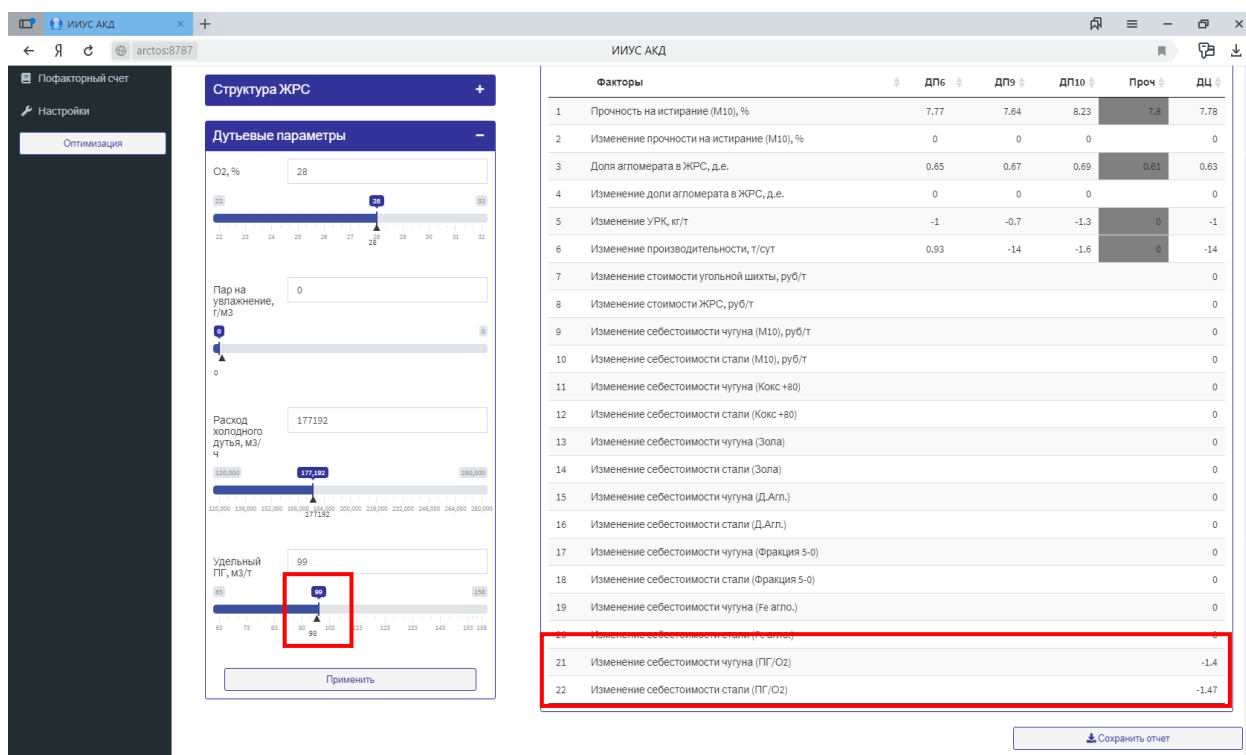


Рис. 5.5.15. Изменение показателя «Удельный ПГ» по цеху на 1 м³/т привело к изменению себестоимости чугуна на -1.4 р/т, а себестоимости стали на -1.47 р/т

Расчет оптимального значения холодной прочности кокса по показателю $M10$

Проведен расчет оптимального значения холодной прочности кокса по показателю $M10$ на основе ИИУС АКД (оптимальный адаптивный и технико-экономический уровень) и модели оптимизации привоза и потребления угольного сырья.

На рисунке 5.5.16 представлен пример модели стоимости угольной шихты. На рисунке 5.5.17 представлен график экономического эффекта по себестоимости стали по $M10$.



Рис. 5.5.16. Модель стоимости угольной шихты

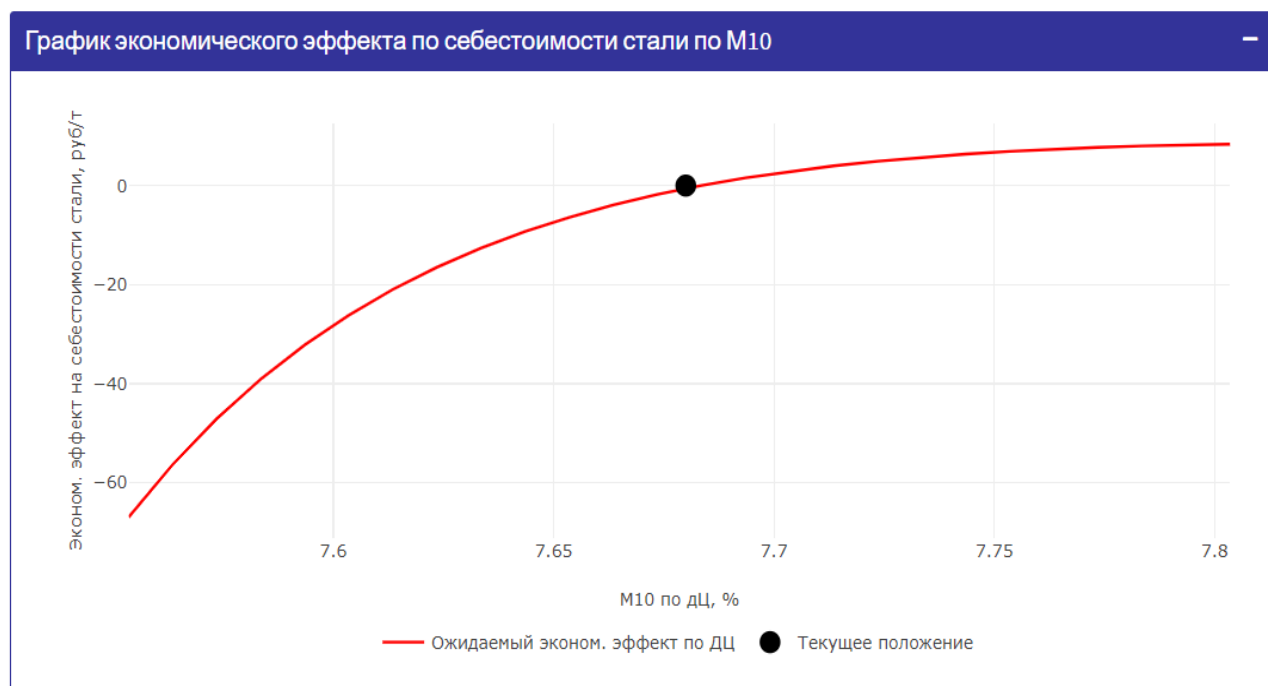


Рис. 5.5.17. График экономического эффекта по себестоимости стали по М10

Результаты расчета приведены на рисунках 5.5.18-5.5.19.

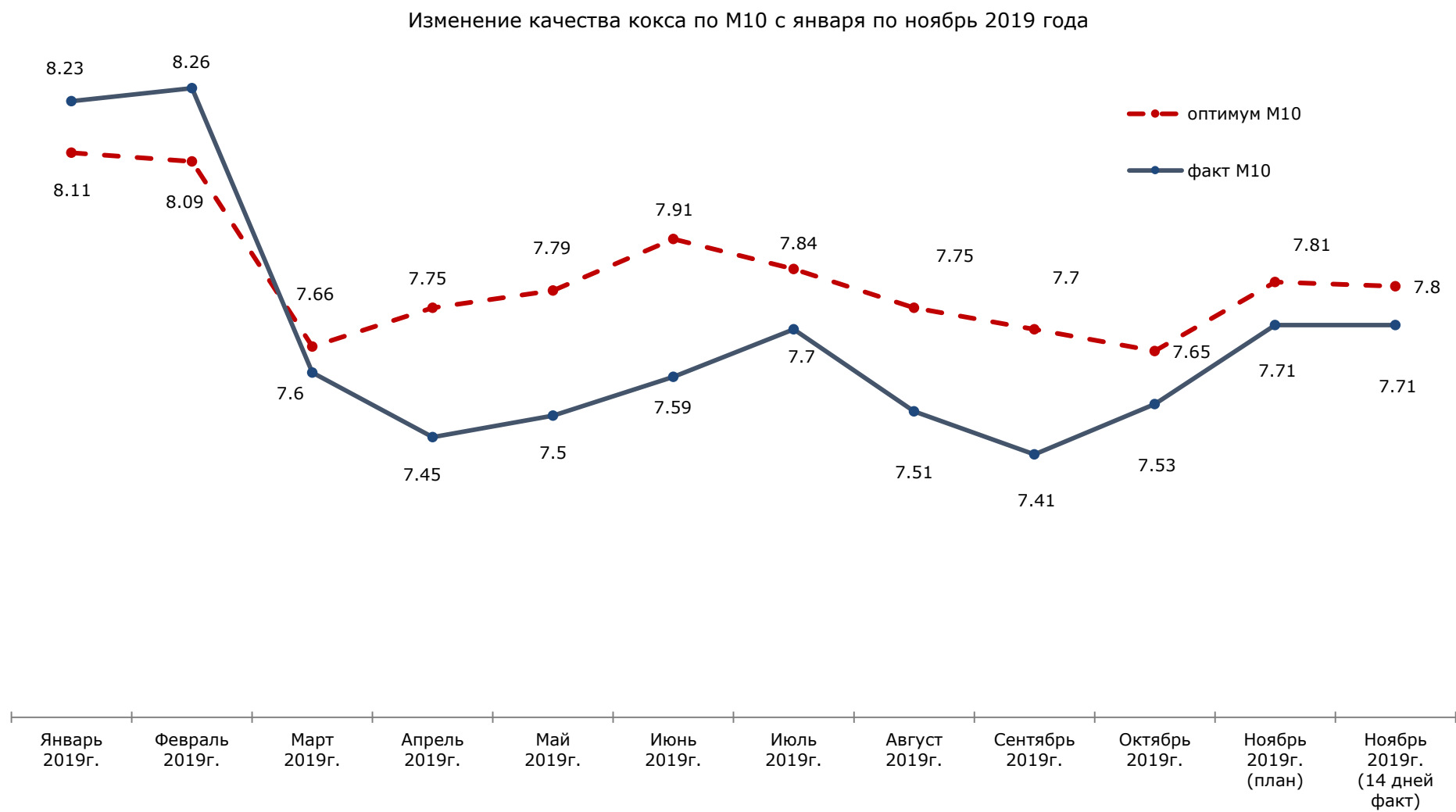


Рис. 5.5.18. Изменение качества кокса по M10

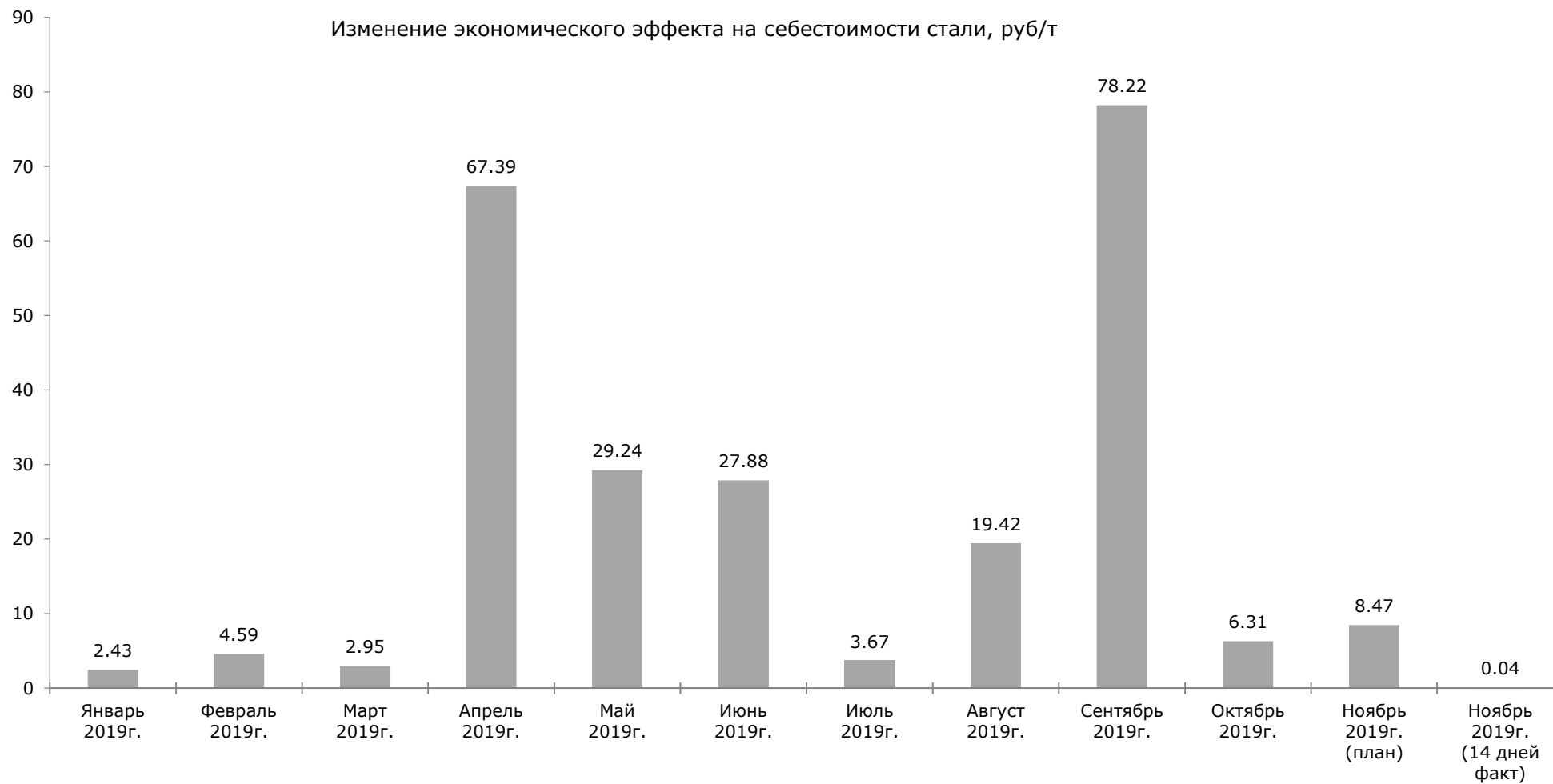


Рис. 5.5.19. Изменение экономического эффекта на себестоимости стали

Оптимальное значение показателя холодной прочности кокса по показателю M10 по критерию минимума себестоимости стали составляет около 7,7-7,8%. Оценочный расчет проводился по фактическим данным эксплуатации доменных печей №6,9,10, с учетом рыночной конъюнктуры в 2019 года.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 5

1. Сложность эффективного управления доменным процессом обуславливают такие факторы как:

- неполная наблюдаемость и управляемость процессов;
- необходимость стабилизации процессов в экстремальных граничных условиях;
- неполнота знаний о текущих состояниях процессов вследствие их сложности.

Современный подход к управлению подобными сложными технологическими комплексами является методология модельно-упреждающего управления.

2. Параметры режимов доменной печи являются случайными процессами, которые зависят от большого количества факторов. Таких факторов насчитывается до 70 параметров. В этих условиях обычные детерминированные методы управления режимами работы печи не позволяют достичь оптимальных значений режимных параметров в следствии большого статистического разброса их значений.

3. Для повышения эффективности технологического процесса в рамках ограничений технологического регламента в работе предлагается метод принятия решений по управлению технологическими процессами на основе выделения целевых областей значений режимных параметров, на основе использования искусственных сетей Кохонена и оригинального метода декомпозиции точной области на двумерные сечения, аналитически описываемые эллиптическими областями 2-го порядка.

4. Проведённые исследования показывают, что применение современных достижений в области интеллектуального анализа данных, основанных на применение самоорганизующихся карт режимов, принципиально позволяет строить наглядные диаграммы взаимосвязей режимов доменного процесса в виде топографических изображений областей уровней значений параметров. Подобное представление реалистично

отображает сложную структуру процессов, реально происходящих в доменной печи с учетом неопределенности их характеристик.

5. Для доменного производства в работе предложено методическое, алгоритмическое и программное обеспечение экспертной системы, реализующей поддержку принятия решений по управлению технологическими процессами на основе построения областей повышенной эффективности в пространстве режимных параметров.

6. В работе разработано программное обеспечение определения оптимальных значений технологических параметров доменной плавки для решения задач максимизации выработки чугуна, минимизации потребления кокса, минимизации себестоимости чугуна или стали металлургического производственного комплекса на основе построения областей повышенной эффективности в пространстве режимных параметров. Данное программное обеспечение внедрено в практику интегрированного управления эффективностью металлургического комплекса ПАО «ММК».

7. Проведенный оценочный расчет по фактическим данным эксплуатации доменных печей №6,9,10, с учетом рыночной конъюнктуры в 2019 года показал, что оптимальное значение показателя холодной прочности кокса по показателю M10 по критерию минимума себестоимости стали составляет около 7,7-7,8%.

ГЛАВА 6. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПЛАНИРОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ ЭНЕРГОЁМКОСТИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА

6.1. Автоматизированная система планирования и контроля энергоёмкости производственных процессов на основе комплексного анализа данных энергетических обследований и данных эксплуатации

На технико-экономическом уровне интегрированное планирование и управление энергетической эффективностью в металлургическом комплексе осуществляют специальные подразделения – Центр энергосберегающих технологий (ЦЭСТ) ПАО «ММК». Общая схема взаимодействия Центра энергосберегающих технологий (ЦЭСТ) с производственными подразделениями приведена на рисунке 6.1.1.

Управление сложными технологическими процессами предполагает централизованное планирование и контроль энергоёмкости составляющих частных процессов. Одной из проблем централизованного планирования и контроля энергоёмкости в сложных технологических комплексах является получение достоверных моделей зависимостей энергоёмкости технологических процессов от текущего уровня производительности. Данные зависимости могут быть получены на основе технологических испытаний и проведения энергетического обследования оборудования. Однако подобный подход для крупных предприятий, содержащий сотни и тысячи технологических объектов является весьма трудоемким. В следствие этого получение достоверных данных часто является не реализуемым в полном объеме. Для восполнения недостающих сведений используется статистика текущих данных эксплуатации, накопленная в результате измерений в АСУ ТП. Данные экспертиз и статистические данные в общем случае являются противоречивыми, для разрешения данного противоречия **в шестой главе** ставится задача проведения системного анализа данных энергетических обследований и статистических данных эксплуатации.

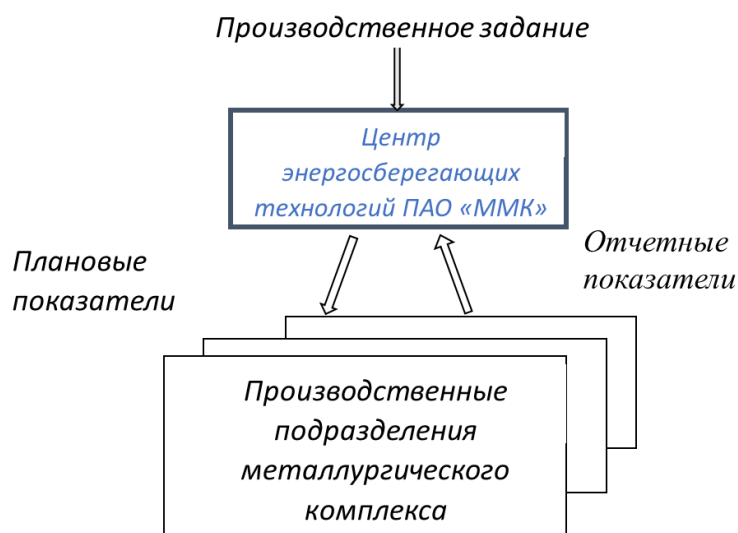


Рис. 6.1.1. Интегрированное планирование и управление энергетической эффективностью в металлургическом комплексе

Планирование и контроль энергоэффективности технологическими процессами крупного промышленного осуществляется в рамках единой организационной многоуровневой структуры управления.

В общем случае на уровне производственных подразделений энергетические характеристики описываются зависимостями $W_i = F_i(\Pi_i, \mathbf{y}_{ti}; \mathbf{u}_i, \mathbf{v}_i, \mathbf{z}_i, \mathbf{y}_i)$ [31].

где W_i – объем энергетических ресурсов i -ого технологического процесса; Π_i – объем выпущенной продукции; $\mathbf{y}_{ti}$ – уставка для каждого режимного параметра; $\mathbf{u}_i$ – набор управляемых параметров; $\mathbf{v}_i$ – набор измеряемых неуправляемых параметров; $\mathbf{z}_i$ – набор неизмеряемых неуправляемых параметров; $\mathbf{y}_i$ – набор выходных параметров.

При этом ставится задача минимизации потребления энергетических ресурсов каждого технологического процесса при сохранении требуемого уровня выпуска продукции.

Расчет энергоемкости каждого технологического производства производится с учетом данных среднеквадратичных ошибок отклонений от

фактических данных по энергоемкости данных текущей эксплуатации и среднеквадратичных ошибок отклонений от данных проведенных технологических испытаний:

Среднеквадратичная ошибка отклонений от фактических данных по энергоемкости данных текущей эксплуатации:

$$E_C^2(\mathbf{c}_i) = \frac{1}{H_i} \sum_{s=1}^{N_i} (b_{is} - \varphi_i(\mathbf{c}_i; \Pi_{is}))^2,$$

H_i – количество статистических параметров;

$\mathbf{c}_i$ –структурные параметры зависимости $\varphi_i(\cdot)$ энергоемкости технологического производства b_i от выпуска продукции Π_i ;

Среднеквадратичная ошибка отклонений от данных проведенных технологических испытаний:

$$E_{\mathcal{G}}^2(\mathbf{c}_i) = \frac{1}{M_i} \sum_{k=1}^{M_i} (b_{ik} - \varphi_i(\mathbf{c}_i; \Pi_{is}))^2,$$

M_i –количество технологических испытаний и энергетических обследований;

$\mathbf{c}_i$ –структурные параметры зависимости $\varphi_i(\cdot)$ энергоемкости технологического производства b_i от выпуска продукции Π_i ;

Квадратичное уклонение искомого вектора параметров $\mathbf{c}_i$ от базового значения $\mathbf{c}_{ip}$, на основе которого осуществляется регуляризация постановки задачи идентификации зависимости:

$$E_P^2(\mathbf{c}_i) = (\mathbf{c}_i - \mathbf{c}_{ip})^2.$$

Линейная свертка рассмотренных уклонений:

$$E_o^2(\mathbf{c}_i) = \alpha E_C^2(\mathbf{c}_i) + \beta E_{\mathcal{G}}^2(\mathbf{c}_i) + \gamma E_P^2(\mathbf{c}_i); \quad \alpha, \beta, \gamma \geq 0; \quad \alpha + \beta + \gamma = 1, \quad (6.1.1)$$

где α, β, γ – весовые коэффициенты.

Искомый вектор $\mathbf{c}_i$ определяется как решение экстремальной задачи

$$\min_{\{c_i\}} E_o^2(c_i) \quad (6.1.2)$$

На основе решения задачи минимизации линейной свертки рассмотренных уклонений (6.1.1) разработано программное обеспечение контроля и прогнозирования потребления энергетических ресурсов промышленным предприятия в целом.

6.2. Результаты прогнозирования электропотребления станций ПАО «ММК»

6.2.1. Результаты расчетов для ТЭЦ ПАО «ММК»

Исходные данные использования электроэнергии ТЭЦ ПАО «ММК», на основе которых решалась задача минимизации общей ошибки прогнозирования потребления электрической энергии, приведены в приложении В.1.

Для ТЭЦ в соответствии с вырабатываемой продукцией систему уравнений можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} y_{1t}^{TЭЦ} &= a_{01}^{TЭЦ*} + a_{11}^{TЭЦ} P_{1t}^{TЭЦ}; \\ y_{2t}^{TЭЦ} &= a_{02}^{TЭЦ*} + a_{12}^{TЭЦ} P_{2t}^{TЭЦ}; \\ y_{3t}^{TЭЦ} &= a_{03}^{TЭЦ*} + a_{13}^{TЭЦ} P_{3t}^{TЭЦ}; \\ y_{4t}^{TЭЦ} &= a_{04}^{TЭЦ*} + a_{14}^{TЭЦ} P_{4t}^{TЭЦ}; \\ y_{5t}^{TЭЦ} &= a_{05}^{TЭЦ*} + a_{15}^{TЭЦ} P_{5t}^{TЭЦ}, \end{aligned} \quad (6.2.1)$$

где $y_{1t}^{TЭЦ} = \ln(w_{1t}^{TЭЦ})$ - преобразованный удельный расход электроэнергии на выработку электроэнергии за t -ый интервал времени;

$y_{2t}^{TЭЦ} = \ln(w_{2t}^{TЭЦ})$ - преобразованный удельный расход электроэнергии на выработку тепла с острым паром ККП за t -ый интервал времени;

$y_{3t}^{TЭЦ} = \ln(w_{3t}^{TЭЦ})$ - преобразованный удельный расход электроэнергии на выработку тепла с горячей водой за t -ый интервал времени;

$y_{4t}^{TЭЦ} = \ln(w_{4t}^{TЭЦ})$ - преобразованный удельный расход электроэнергии на химводоочистку за t -ый интервал времени;

$y_{5t}^{TЭЦ} = \ln(w_{5t}^{TЭЦ})$ - преобразованный удельный расход электроэнергии береговой насосной за t -ый интервал времени;

$P_{1t}^{TЭЦ}$ - выработка электроэнергии за t -ый интервал времени, кВт·ч;

$P_{2t}^{TЭЦ}$ - выработка тепла с острым паром ККП за t -ый интервал времени, ГКал;

$P_{3t}^{TЭЦ}$ - выработка тепла с горячей водой за t -ый интервал времени, ГКал;

$P_{4t}^{TЭЦ}$ - химводоочистка за t -ый интервал времени, м³ воды;

$P_{5t}^{TЭЦ}$ - водозабор, 1000 м³ т/воды;

$a_{01}^{TЭЦ*}$, $a_{02}^{TЭЦ*}$, $a_{03}^{TЭЦ*}$, $a_{04}^{TЭЦ*}$, $a_{05}^{TЭЦ*}$ - коэффициенты, определяемые по соотношению

$$a_{0i}^{TЭЦ*} = \ln(a_{0i}^{TЭЦ});$$

$a_{11}^{TЭЦ}$, $a_{12}^{TЭЦ}$, $a_{13}^{TЭЦ}$, $a_{14}^{TЭЦ}$, $a_{15}^{TЭЦ}$ - коэффициенты.

Уравнения (6.2.1) решались отдельно для зимнего и летнего периодов: соответственно с октября по март и с апреля по сентябрь.

Решением системы уравнений (6.2.1) являются значения коэффициентов $a_{0i}^{TЭЦ}$, $a_{1i}^{TЭЦ}$, приведенные в таблице 6.2.1. Кроме того, в таблице 6.2.1 приведены значения ошибок по каждому виду продукции.

Таблица 6.2.1

Значения коэффициентов $a_{0i}^{TЭЦ}$, $a_{1i}^{TЭЦ}$ и частных ошибок $(E_i^{TЭЦ})^2$

Наименование показателя	Зимний период	Летний период
1	2	3
$a_{01}^{TЭЦ}$	0,0620	0,0480
$a_{11}^{TЭЦ}$	-6,34E-10	1,32E-09
$(E_1^{TЭЦ})^2$	0,003911	0,003943
$a_{02}^{TЭЦ}$	23,8891	21,9456
$a_{12}^{TЭЦ}$	-8,05E-07	-2,41E-07
$(E_2^{TЭЦ})^2$	0,000925	0,002803
$a_{03}^{TЭЦ}$	47,7981	41,1699
$a_{13}^{TЭЦ}$	-8,39E-07	4,00E-07
$(E_3^{TЭЦ})^2$	1,59E-03	9,76E-03
$a_{04}^{TЭЦ}$	1,1133	1,1328
$a_{14}^{TЭЦ}$	2,45E-08	-1,20E-07
$(E_4^{TЭЦ})^2$	5,53E-05	1,33E-03
$a_{05}^{TЭЦ}$	136,9996	136,9999
$a_{15}^{TЭЦ}$	7,41E-11	-3,81E-18
$(E_5^{TЭЦ})^2$	2,47E-11	1,93E-28

В таблице 6.2.2 приведены сумма квадратов частных ошибок $\sum_{i=1}^{Np} (E_i^{TЭЦ})^2$ и квадрат общей ошибки прогнозирования потребления электрической энергии по ТЭЦ в целом в соответствии с соотношением (6.2.7).

Таблица 6.2.2

Значения ошибок

Наименование показателя	Зимний период	Летний период
$\sum_{i=1}^{Np} (E_i^{TЭЦ})^2$	0,0065	0,0178
$(E_0^{TЭЦ})^2$	120,1330	127,1075

Далее решалась задача минимизации общей ошибки прогнозирования потребления электрической энергии по ТЭЦ в целом согласно алгоритму, приведенному в п. 6.1.3 настоящего отчета.

Результатом решения указанной задачи являются значения коэффициентов $a_{0i}^{TЭЦ}$, $a_{1i}^{TЭЦ}$, при которых квадрат общей ошибки является минимальным. Итоговые значения коэффициентов $a_{0i}^{TЭЦ}$, $a_{1i}^{TЭЦ}$ приведены в таблице 6.2.3. Здесь же приведены частные ошибки $(E_i^{TЭЦ})^2$.

Таблица 6.2.3

Значения коэффициентов $a_{0i}^{TЭЦ}$, $a_{1i}^{TЭЦ}$ и частных ошибок $(E_i^{TЭЦ})^2$

Наименование показателя	Зимний период	Летний период
1	2	3
$a_{01}^{TЭЦ}$	0,0070	0,0057
$a_{11}^{TЭЦ}$	-7,07E-10	7,49E-10
$(E_1^{TЭЦ})^2$	4,8091	5,0881
$a_{02}^{TЭЦ}$	2,6118	2,1872
$a_{12}^{TЭЦ}$	-6,25E-07	1,74E-07
$(E_2^{TЭЦ})^2$	4,8061	5,0870
$a_{03}^{TЭЦ}$	5,1288	4,3075
$a_{13}^{TЭЦ}$	-6,58E-07	4,34E-07

Продолжение таблицы 6.2.3

$(E_3^{TЭЦ})^2$	4,8068	5,0939
$a_{04}^{TЭЦ}$	0,1249	0,1183
$a_{14}^{TЭЦ}$	-1,61E-08	-6,14E-08
$(E_4^{TЭЦ})^2$	4,8053	5,0854
$a_{05}^{TЭЦ}$	15,0613	13,8061
$a_{15}^{TЭЦ}$	9,72E-07	2,26E-06
$(E_5^{TЭЦ})^2$	4,8052	5,0842

В таблице 6.2.4 приведены сумма квадратов частных ошибок $\sum_{i=1}^{Np} (E_i^{TЭЦ})^2$ и квадрат общей ошибки прогнозирования потребления электрической энергии по ТЭЦ в целом после решения задачи минимизации общей ошибки.

Таблица 6.2.4

Значения ошибок

Наименование показателя	Зимний период	Летний период
$\sum_{i=1}^{Np} (E_i^{TЭЦ})^2$	24,0325	25,4387
$(E_0^{TЭЦ})^2$	0,0024	0,0027

Из сравнения значений, приведенных в таблицах 6.2.3, 6.2.4, видно, что общая ошибка прогнозирования потребления электрической энергии по ТЭЦ в целом уменьшилась с 120,1330 до 0,0024 для зимнего периода и с 127,1075 до 0,0027 для летнего периода.

6.2.2. Результаты расчетов для ЦЭС ПАО «ММК»

Исходные данные использования электроэнергии ЦЭС ПАО «ММК», на основе которых решалась задача минимизации общей ошибки прогнозирования потребления электрической энергии, приведены в Приложении В.2.

Для ЦЭС в соответствии с вырабатываемой продукцией систему уравнений можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned}y_{1t}^{ЦЭС} &= a_{01}^{ЦЭС*} + a_{11}^{ЦЭС} P_{1t}^{ЦЭС}; \\y_{2t}^{ЦЭС} &= a_{02}^{ЦЭС*} + a_{12}^{ЦЭС} P_{2t}^{ЦЭС}; \\y_{3t}^{ЦЭС} &= a_{03}^{ЦЭС*} + a_{13}^{ЦЭС} P_{3t}^{ЦЭС}; \\y_{4t}^{ЦЭС} &= a_{04}^{ЦЭС*} + a_{14}^{ЦЭС} P_{4t}^{ЦЭС},\end{aligned}\tag{6.2.2}$$

где $y_{1t}^{ЦЭС} = \ln(w_{1t}^{ЦЭС})$ - преобразованный удельный расход электроэнергии на выработку электроэнергии за t -ый интервал времени;

$y_{2t}^{ЦЭС} = \ln(w_{2t}^{ЦЭС})$ - преобразованный удельный расход электроэнергии на выработку тепла с горячей водой за t -ый интервал времени;

$y_{3t}^{ЦЭС} = \ln(w_{3t}^{ЦЭС})$ - преобразованный удельный расход электроэнергии на выработку тепла с паром за t -ый интервал времени;

$y_{4t}^{ЦЭС} = \ln(w_{4t}^{ЦЭС})$ - преобразованный удельный расход электроэнергии на химводоочистку за t -ый интервал времени;

$P_{1t}^{ЦЭС}$ - выработка электроэнергии за t -ый интервал времени, кВт·ч;

$P_{2t}^{ЦЭС}$ - выработка тепла с горячей водой за t -ый интервал времени, ГКал;

$P_{3t}^{ЦЭС}$ - выработка тепла с паром за t -ый интервал времени, ГКал;

$P_{4t}^{ЦЭС}$ - химводоочистка за t -ый интервал времени, м³ отпущен. ХОВ;

$a_{01}^{ЦЭС*}$, $a_{02}^{ЦЭС*}$, $a_{03}^{ЦЭС*}$, $a_{04}^{ЦЭС*}$ - коэффициенты, определяемые по соотношению

$$a_{0i}^{ЦЭС*} = \ln(a_{0i}^{ЦЭС});$$

$a_{11}^{ЦЭС}$, $a_{12}^{ЦЭС}$, $a_{13}^{ЦЭС}$, $a_{14}^{ЦЭС}$ - коэффициенты.

Уравнения (6.2.2) решались отдельно для зимнего и летнего периодов: соответственно с октября по март и с апреля по сентябрь.

Решением системы уравнений (6.2.2) являются значения коэффициентов $a_{0i}^{ЦЭС}$, $a_{1i}^{ЦЭС}$, приведенные в таблице 6.2.5. Здесь же приведены значения ошибок по каждому виду продукции.

Таблица 6.2.5

Значения коэффициентов $a_{0i}^{ЦЭС}$, $a_{1i}^{ЦЭС}$ и частных ошибок $(E_i^{ЦЭС})^2$

Наименование показателя	Зимний период	Летний период
1	2	3
$a_{01}^{ЦЭС}$	0,0587	0,0920
$a_{11}^{ЦЭС}$	2,75E-11	-2,90E-09
$(E_1^{ЦЭС})^2$	0,002362	0,000567
$a_{02}^{ЦЭС}$	31,4084	35,6260
$a_{12}^{ЦЭС}$	-1,53E-06	-2,51E-06
$(E_2^{ЦЭС})^2$	0,004893	0,01626
$a_{03}^{ЦЭС}$	15,4097	13,6046
$a_{13}^{ЦЭС}$	-2,15E-06	1,00E-06
$(E_3^{ЦЭС})^2$	0,007808	1,85E-02
$a_{04}^{ЦЭС}$	1,9313	1,8841
$a_{14}^{ЦЭС}$	-9,65E-07	-8,00E-07
$(E_4^{ЦЭС})^2$	0,008134	7,15E-03

В таблице 6.2.6 приведены сумма квадратов частных ошибок $\sum_{i=1}^{Np} (E_i^{ЦЭС})^2$ и квадрат общей ошибки прогнозирования потребления электрической энергии по ЦЭС в целом в соответствии с соотношением (1.7).

Таблица 6.2.6

Значения ошибок

Наименование показателя	Зимний период	Летний период
$\sum_{i=1}^{Np} (E_i^{ЦЭС})^2$	0,0232	0,0424
$(E_0^{ЦЭС})^2$	33,0421	39,0246

Далее решалась задача минимизации общей ошибки прогнозирования потребления электрической энергии по ЦЭС в целом согласно алгоритму, приведенному в п. 6.1.3.

Результатом решения указанной задачи являются значения коэффициентов $a_{0i}^{ЦЭС}$, $a_{1i}^{ЦЭС}$, при которых квадрат общей ошибки является минимальным. Итоговые значения коэффициентов $a_{0i}^{ЦЭС}$, $a_{1i}^{ЦЭС}$ приведены в таблице 6.2.7. Здесь же приведены частные ошибки $(E_i^{ЦЭС})^2$.

Таблица 6.2.7

Значения коэффициентов $a_{0i}^{ЦЭС}$, $a_{1i}^{ЦЭС}$ и частных ошибок $(E_i^{ЦЭС})^2$

Наименование показателя	Зимний период	Летний период
1	2	3
$a_{01}^{ЦЭС}$	0,0132	0,0182
$a_{11}^{ЦЭС}$	4,24E-10	-2,48E-09
$(E_1^{ЦЭС})^2$	2,06678811	2,4382
$a_{02}^{ЦЭС}$	6,6278	6,9716
$a_{12}^{ЦЭС}$	-8,71E-07	-1,32E-06
$(E_2^{ЦЭС})^2$	2,06978935	2,4552
$a_{03}^{ЦЭС}$	3,5689	2,8766
$a_{13}^{ЦЭС}$	-1,61E-06	7,80E-07
$(E_3^{ЦЭС})^2$	2,072309914	2,4561

Продолжение таблицы 6.2.7

$a_{04}^{ЦЭС}$	0,4378	0,3638
$a_{14}^{ЦЭС}$	-6,99E-07	-2,66E-07
$(E_4^{ЦЭС})^2$	2,072700323	2,4452

В таблице 6.2.8 приведены сумма квадратов частных ошибок $\sum_{i=1}^{Np} (E_i^{ЦЭС})^2$

и квадрат общей ошибки прогнозирования потребления электрической энергии по ЦЭС в целом в соответствии с соотношением (1.7) после решения задачи минимизации общей ошибки.

Таблица 6.2.8

Значения ошибок

Наименование показателя	Зимний период	Летний период
$\sum_{i=1}^{Np} (E_i^{ЦЭС})^2$	8,2816	9,7947
$(E_0^{ЦЭС})^2$	0,0065	0,0109

Из сравнения значений, приведенных в таблицах 6.2.6, 6.2.8, видно, что общая ошибка прогнозирования потребления электрической энергии по ЦЭС в целом уменьшилась с 33,0421 до 0,0065 для зимнего периода и с 39,0246 до 0,0109 для летнего периода.

6.2.3. Результаты расчетов для ПВЭС ПАО «ММК»

Исходные данные использования электроэнергии ПВЭС ПАО «ММК», на основе которых решалась задача минимизации общей ошибки прогнозирования потребления электрической энергии приведены в Приложении В.3.

Для ПВЭС в соответствии с вырабатываемой продукцией систему уравнений можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned}
y_{1t}^{ПВЭС} &= a_{01}^{ПВЭС*} + a_{11}^{ПВЭС} P_{1t}^{ПВЭС}; \\
y_{2t}^{ПВЭС} &= a_{02}^{ПВЭС*} + a_{12}^{ПВЭС} P_{2t}^{ПВЭС}; \\
y_{3t}^{ПВЭС} &= a_{03}^{ПВЭС*} + a_{13}^{ПВЭС} P_{3t}^{ПВЭС}; \\
y_{4t}^{ПВЭС} &= a_{04}^{ПВЭС*} + a_{14}^{ПВЭС} P_{4t}^{ПВЭС},
\end{aligned} \tag{6.2.3}$$

где $y_{1t}^{ПВЭС} = \ln(w_{1t}^{ПВЭС})$ - преобразованный удельный расход электроэнергии на выработку электроэнергии за t -ый интервал времени;

$y_{2t}^{ПВЭС} = \ln(w_{2t}^{ПВЭС})$ - преобразованный удельный расход электроэнергии на выработку дутья за t -ый интервал времени;

$y_{3t}^{ПВЭС} = \ln(w_{3t}^{ПВЭС})$ - преобразованный удельный расход электроэнергии на выработку отпущенного тепла за t -ый интервал времени;

$y_{4t}^{ПВЭС} = \ln(w_{4t}^{ПВЭС})$ - преобразованный удельный расход электроэнергии на собственные нужды котельной за t -ый интервал времени;

$P_{1t}^{ПВЭС}$ - выработка электроэнергии за t -ый интервал времени, кВт·ч;

$P_{2t}^{ПВЭС}$ - выработка дутья за t -ый интервал времени, м³;

$P_{3t}^{ПВЭС}$ - тепло отпущенное за t -ый интервал времени, ГКал;

$P_{4t}^{ПВЭС}$ - собственные нужды котельной за t -ый интервал времени;

$a_{01}^{ПВЭС*}$, $a_{02}^{ПВЭС*}$, $a_{03}^{ПВЭС*}$, $a_{04}^{ПВЭС*}$ - коэффициенты, определяемые по соотношению

$$a_{0i}^{ПВЭС*} = \ln(a_{0i}^{ПВЭС});$$

$a_{11}^{ПВЭС}$, $a_{12}^{ПВЭС}$, $a_{13}^{ПВЭС}$, $a_{14}^{ПВЭС}$ - коэффициенты.

Уравнения (6.2.3) решались отдельно для зимнего и летнего периодов: соответственно с октября по март и с апреля по сентябрь.

Решением системы уравнений (6.2.3) являются значения коэффициентов $a_{0i}^{ПВЭС}$, $a_{1i}^{ПВЭС}$, приведенные в таблице 6.2.9. Здесь же приведены значения ошибок по каждому виду продукции.

Таблица 6.2.9

Значения коэффициентов $a_{0i}^{ПВЭС}$, $a_{1i}^{ПВЭС}$ и частных ошибок $(E_i^{ПВЭС})^2$

Наименование показателя	Зимний период	Летний период
1	2	3
$a_{01}^{ПВЭС}$	0,059505	0,053216
$a_{11}^{ПВЭС}$	-6,34E-09	-4,50E-09
$(E_1^{ПВЭС})^2$	0,003202	0,002756
$a_{02}^{ПВЭС}$	2,365478	1,892604
$a_{12}^{ПВЭС}$	-1,01E-07	2,01E-08
$(E_2^{ПВЭС})^2$	0,002516	0,00139
$a_{03}^{ПВЭС}$	19,08698	15,1621
$a_{13}^{ПВЭС}$	-1,41E-06	-3,46E-07
$(E_3^{ПВЭС})^2$	0,003705	0,00203
$a_{04}^{ПВЭС}$	14,28646	14,02848
$a_{14}^{ПВЭС}$	1,88E-07	1,46E-06
$(E_4^{ПВЭС})^2$	0,00474	0,001981

В таблице 6.2.10 приведены сумма квадратов частных ошибок $\sum_{i=1}^{Np} (E_i^{ПВЭС})^2$ и квадрат общей ошибки прогнозирования потребления электрической энергии по ПВЭС в целом.

Таблица 6.2.10

Значения ошибок

Наименование показателя	Зимний период	Летний период
$\sum_{i=1}^{Np} (E_i^{ПВЭС})^2$	0,0142	0,0082
$(E_0^{ПВЭС})^2$	21,4644	21,6945

Далее решалась задача минимизации общей ошибки прогнозирования потребления электрической энергии по ПВЭС в целом согласно алгоритму, приведенному в п. 6.1.

Результатом решения указанной задачи являются значения коэффициентов $a_{0i}^{ПВЭС}$, $a_{1i}^{ПВЭС}$, при которых квадрат общей ошибки является минимальным.

Итоговые значения коэффициентов $a_{0i}^{ПВЭС}$, $a_{1i}^{ПВЭС}$ приведены в таблице 6.2.11. Здесь же приведены частные ошибки $(E_i^{ПВЭС})^2$.

Таблица 6.2.11

Значения коэффициентов $a_{0i}^{ПВЭС}$, $a_{1i}^{ПВЭС}$ и частных ошибок $(E_i^{ПВЭС})^2$

Наименование показателя	Зимний период	Летний период
1	2	3
$a_{01}^{ПВЭС}$	0,019641	0,01831
$a_{11}^{ПВЭС}$	-7,07E-09	-5,98E-09
$(E_1^{ПВЭС})^2$	1,344076	1,358511
$a_{02}^{ПВЭС}$	0,673748	0,561223
$a_{12}^{ПВЭС}$	-4,60E-08	4,53E-08
$(E_2^{ПВЭС})^2$	1,343639	1,357033
$a_{03}^{ПВЭС}$	5,486241	4,764446
$a_{13}^{ПВЭС}$	-9,69E-07	-3,88E-07
$(E_3^{ПВЭС})^2$	1,34463	1,357657
$a_{04}^{ПВЭС}$	4,53307	4,363176
$a_{14}^{ПВЭС}$	-3,88E-07	1,69E-06
$(E_4^{ПВЭС})^2$	1,345571	1,357609

В таблице 6.2.12 приведены сумма квадратов частных ошибок $\sum_{i=1}^{Np} (E_i^{ПВЭС})^2$ и квадрат общей ошибки прогнозирования потребления

электрической энергии по ПВЭС в целом после решения задачи минимизации общей ошибки.

Таблица 6.2.12

Значения ошибок

Наименование показателя	Зимний период	Летний период
$\sum_{i=1}^{Np} (E_i^{ПВЭС})^2$	5,3780	5,4308
$(E_0^{ПВЭС})^2$	0,0080	0,0035

Из сравнения значений, приведенных в таблицах 6.2.10, 6.2.12, видно, что общая ошибка прогнозирования потребления электрической энергии по ПВЭС в целом уменьшилась с 21,4644 до 0,0080 для зимнего периода и с 21,6945 до 0,0035 для летнего периода.

6.2.4. Результаты расчетов для электростанций ПАО «ММК»

Исходные данные использования электроэнергии электростанциями ПАО «ММК»: ТЭЦ, ЦЭС, ПВЭС, на основе которых решалась задача минимизации общей ошибки прогнозирования потребления электрической энергии приведены в Приложениях В.1-В.3.

Для электростанций в соответствии с вырабатываемой продукцией систему уравнений можно записать в следующем виде (6.2.4).

Уравнения (6.2.4) решались отдельно для зимнего и летнего периодов: соответственно с октября по март и с апреля по сентябрь.

Решением системы уравнений (6.2.4) являются значения коэффициентов:

- $a_{0i}^{ТЭЦ}, a_{1i}^{ТЭЦ};$
- $a_{0i}^{ЦЭС}, a_{1i}^{ЦЭС};$
- $a_{0i}^{ПВЭС}, a_{1i}^{ПВЭС}.$

$$\begin{aligned}
y_{1t}^{TЭЦ} &= a_{01}^{TЭЦ*} + a_{11}^{TЭЦ} P_{1t}^{TЭЦ}; \\
y_{2t}^{TЭЦ} &= a_{02}^{TЭЦ*} + a_{12}^{TЭЦ} P_{2t}^{TЭЦ}; \\
y_{3t}^{TЭЦ} &= a_{03}^{TЭЦ*} + a_{13}^{TЭЦ} P_{3t}^{TЭЦ}; \\
y_{4t}^{TЭЦ} &= a_{04}^{TЭЦ*} + a_{14}^{TЭЦ} P_{4t}^{TЭЦ}; \\
y_{5t}^{TЭЦ} &= a_{05}^{TЭЦ*} + a_{15}^{TЭЦ} P_{5t}^{TЭЦ}; \\
y_{1t}^{ЦЭС} &= a_{01}^{ЦЭС*} + a_{11}^{ЦЭС} P_{1t}^{ЦЭС}; \\
y_{2t}^{ЦЭС} &= a_{02}^{ЦЭС*} + a_{12}^{ЦЭС} P_{2t}^{ЦЭС}; \\
y_{3t}^{ЦЭС} &= a_{03}^{ЦЭС*} + a_{13}^{ЦЭС} P_{3t}^{ЦЭС}; \\
y_{4t}^{ЦЭС} &= a_{04}^{ЦЭС*} + a_{14}^{ЦЭС} P_{4t}^{ЦЭС}; \\
y_{1t}^{ПВЭС} &= a_{01}^{ПВЭС*} + a_{11}^{ПВЭС} P_{1t}^{ПВЭС}; \\
y_{2t}^{ПВЭС} &= a_{02}^{ПВЭС*} + a_{12}^{ПВЭС} P_{2t}^{ПВЭС}; \\
y_{3t}^{ПВЭС} &= a_{03}^{ПВЭС*} + a_{13}^{ПВЭС} P_{3t}^{ПВЭС}; \\
y_{4t}^{ПВЭС} &= a_{04}^{ПВЭС*} + a_{14}^{ПВЭС} P_{4t}^{ПВЭС}.
\end{aligned} \tag{6.2.4}$$

В таблице 6.2.13 приведены сумма квадратов частных ошибок $\sum_{i=1}^{Np} (E_i^{\text{ЭС}})^2$

и квадрат общей ошибки прогнозирования потребления электрической энергии по электростанциям (ТЭЦ, ЦЭС, ПВЭС) в целом.

Таблица 6.2.13

Значения ошибок

Наименование показателя	Зимний период	Летний период
$\sum_{i=1}^{Np} (E_i^{\text{ЭС}})^2$	0,0438	0,0684
$(E_0^{\text{ЭС}})^2$	295,6210	319,2038

Далее решалась задача минимизации общей ошибки прогнозирования потребления электрической энергии по электростанциям ПАО «ММК» в целом согласно алгоритму, приведенному в п. 6.1.

Результатом решения указанной задачи являются значения коэффициентов $a_{0i}^{TЭЦ}$, $a_{1i}^{TЭЦ}$, $a_{0i}^{ЦЭС}$, $a_{1i}^{ЦЭС}$, $a_{0i}^{ПВЭС}$, $a_{1i}^{ПВЭС}$, при которых квадрат

общей ошибки является минимальным. Значения указанных коэффициентов приведены в таблице 6.2.14. Здесь же приведены частные ошибки $(E_i^{\text{эс}})^2$.

Таблица 6.2.14

Значения коэффициентов $a_{0i}^{TЭЦ}$, $a_{1i}^{TЭЦ}$, $a_{0i}^{ЦЭС}$, $a_{1i}^{ЦЭС}$, $a_{0i}^{ПВЭС}$, $a_{1i}^{ПВЭС}$ и частных ошибок $(E_i^{\text{эс}})^2$

Наименование показателя	Зимний период	Летний период
1	2	3
$a_{01}^{TЭЦ}$	0,0149	0,0124
$a_{11}^{TЭЦ}$	-2,02E-10	1,20E-09
$(E_1^{TЭЦ})^2$	1,7565	1,8964
$a_{02}^{TЭЦ}$	6,3096	5,5894
$a_{12}^{TЭЦ}$	-7,41E-07	-3,06E-07
$(E_2^{TЭЦ})^2$	1,7535	1,8953
$a_{03}^{TЭЦ}$	12,0046	10,1989
$a_{13}^{TЭЦ}$	-5,78E-07	6,64E-07
$(E_3^{TЭЦ})^2$	1,7543	1,9023
$a_{04}^{TЭЦ}$	0,2999	0,2801
$a_{14}^{TЭЦ}$	-8,63E-08	1,51E-07
$(E_4^{TЭЦ})^2$	1,7526	1,8938
$a_{05}^{TЭЦ}$	36,0824	35,0162
$a_{15}^{TЭЦ}$	6,36E-07	-6,50E-07
$(E_5^{TЭЦ})^2$	1,7526	1,8925
$a_{01}^{ЦЭС}$	0,0140	0,0226
$a_{11}^{ЦЭС}$	7,71E-10	-2,68E-09
$(E_1^{ЦЭС})^2$	1,7550	1,8930

Продолжение таблицы 6.2.14

1	2	3
$a_{02}^{ЦЭС}$	7,8749	8,8503
$a_{12}^{ЦЭС}$	-1,20E-06	-2,22E-06
$(E_2^{ЦЭС})^2$	1,7576	1,9088
$a_{03}^{ЦЭС}$	4,0862	3,4672
$a_{13}^{ЦЭС}$	-2,07E-06	7,48E-07
$(E_3^{ЦЭС})^2$	1,7604	1,9109
$a_{04}^{ЦЭС}$	0,5032	0,4665
$a_{14}^{ЦЭС}$	-8,47E-07	-6,70E-07
$(E_4^{ЦЭС})^2$	1,7607	1,8996
$a_{01}^{ПВЭС}$	0,0152	0,0128
$a_{11}^{ПВЭС}$	-5,69E-09	-3,73E-09
$(E_1^{ПВЭС})^2$	1,7558	1,8952
$a_{02}^{ПВЭС}$	0,6090	0,4845
$a_{12}^{ПВЭС}$	-8,21E-08	1,36E-08
$(E_2^{ПВЭС})^2$	1,7551	1,8938
$a_{03}^{ПВЭС}$	4,6762	3,6003
$a_{13}^{ПВЭС}$	-1,00E-06	4,48E-08
$(E_3^{ПВЭС})^2$	1,7564	1,8945
$a_{04}^{ПВЭС}$	3,7729	3,5392
$a_{14}^{ПВЭС}$	6,25E-07	1,56E-06
$(E_4^{ПВЭС})^2$	1,7573	1,8944

В таблице 6.2.15 приведены сумма квадратов частных ошибок $\sum_{i=1}^{N_p} (E_i^{ЭС})^2$

и квадрат общей ошибки прогнозирования потребления электрической энергии по электростанциям (ТЭЦ, ЦЭС, ПВЭС) после решения задачи минимизации общей ошибки.

Таблица 6.2.15

Значения ошибок

Наименование показателя	Зимний период	Летний период
$\sum_{i=1}^{Np} (E_i^{\text{эс}})^2$	22,8277	24,6707
$(E_0^{\text{эс}})^2$	0,0172	0,0106

Из сравнения значений, приведенных в таблицах 6.2.13, 6.2.15, видно, что общая ошибка прогнозирования потребления электрической энергии по электростанциям (ТЭЦ, ЦЭС, ПВЭС) в целом уменьшилась с 295,6210 до 0,0172 для зимнего периода и с 319,2038 до 0,0106 для летнего периода.

6.3. Заключительная диаграмма потоков сэкономленных ресурсов

Подводя итог проведенным исследованиям, отметим, что в данной работе в качестве основополагающего принципа системного анализа при интегрированном планировании и управлении энергетическими ресурсами была принята концепция потоков сэкономленных ресурсов. Поэтому является естественным в заключительной части работы привести пример суммарной диаграммы потоков сэкономленных энергетических ресурсов, интегрально включающий результаты исследований и энергосберегающих мероприятий, проведенных в рамках данной работы.

Данный расчетный пример представлен на рисунке 6.3.1. Приведенная диаграмма позволяет проследить прохождение локально сэкономленных ресурсов по всей технологической схеме производства. Общий технико-экономический эффект по энергетической подсистеме оценивается на энергосберегающей станции в виде суммарной экономии природного газа и потока пара, направленного на буферную станцию ST-3 для дополнительной выработки электрической энергии.

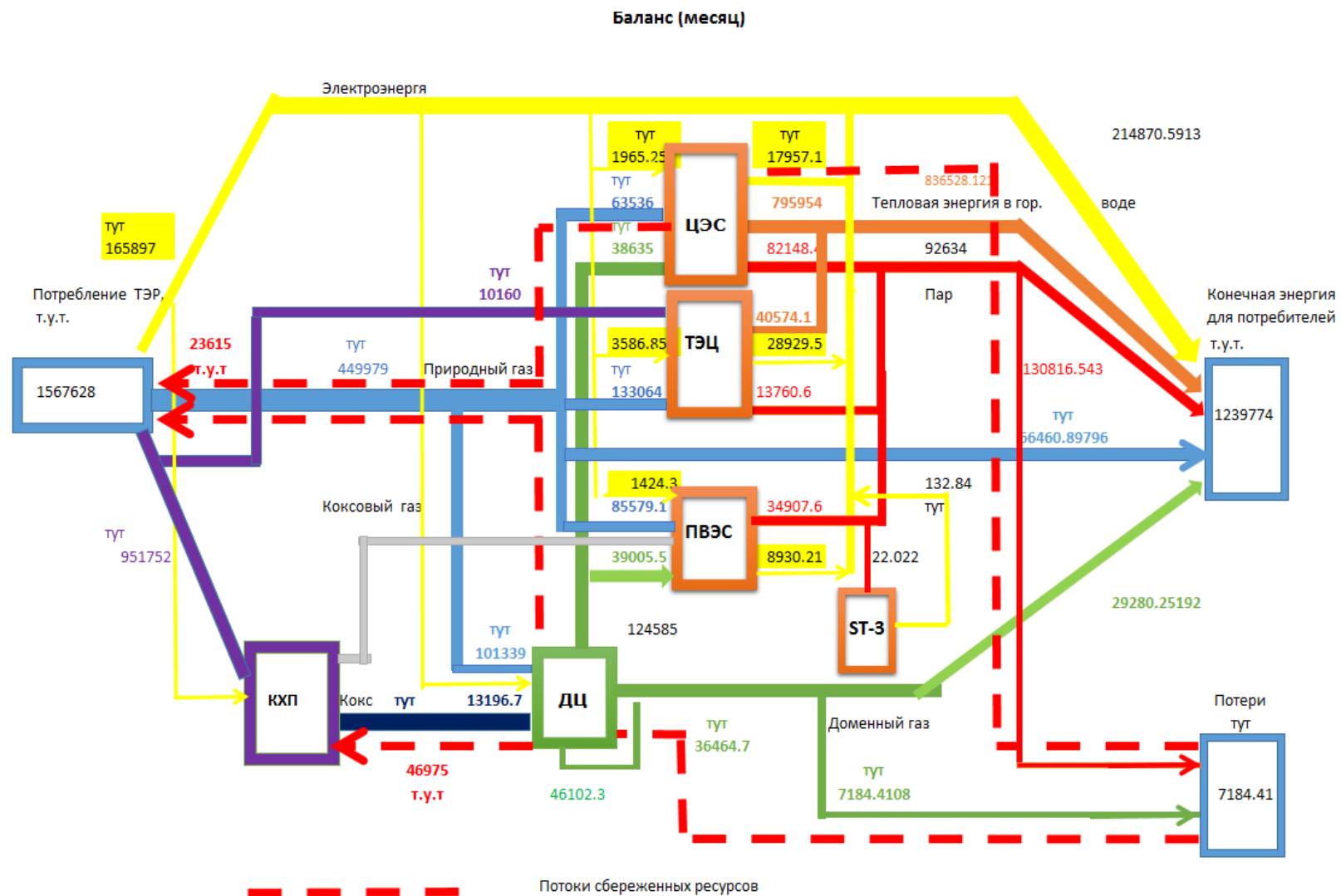


Рис. 6.3.1. Диаграмма потоков сбереженных энергетических ресурсов

Таким образом, диаграмма потоков сэкономленных ресурсов для сложных технологических комплексов позволяет системно рассмотреть связи локальных задач энергосбережения.

Подобные расчеты выполняются на уровне Центра энергосберегающих технологий и согласуются с технологическим управлением и производственными цехами. Фактические данные и аналитические расчеты на их основе выполняются в соответствии с нормативной документацией предприятия и данных эксплуатации. В основе расчетов лежит энергетический баланс для каждого узла, на основе которого оцениваются объемы потребляемых ресурсов. При планировании энергосберегающих мероприятий утверждаются нормативы снижения потребления ресурсов. Построение диаграммы потоков сэкономленных энергетических ресурсов позволяет оценить влияние локальных эффектов от энергосбережения на общие показатели энергометаллургического технологического комплекса.

Что касается экономии кокса, то фрагмент подобного плана для доменного цеха приведен на рисунке 6.3.2.

Наименование	Ед. изм.	Ключевые технические и экономические показатели											
		ДП-6			ДП-9			ДП-10			Итого по ДП-6,9,10		
		База	Факт	Δ	База	Факт	Δ	База	Факт	Δ	База	Факт	Δ
		13.09.2019 - 20.10.2019	21.10.2019- 20.11.2019		27.09.2019 - 20.10.2019	21.10.2019- 20.11.2019		26.09.2019 - 20.10.2019	21.10.2019- 20.11.2019				
Содержание Si в чугуне	%	0,80	0,72	-0,08	0,73	0,70	-0,03	0,76	0,69	-0,07	0,76	0,70	-0,058
Стабильность содержания Si в чугуне (СКО)	%	0,151	0,125	-0,027	0,118	0,113	-0,005	0,135	0,097	-0,038	0,133	0,110	-0,023
Производство чугуна	т/сутки	3 252			4 669			4 924			12 845		
Изменение производства*	т/сутки	4,2			2,2			5,5			11,9		
Расход кокса (кокс сухой скиповый)	кг/т	411,15			401,98			410,05			407,39		
Изменение расхода кокса*	кг/т	-0,5			-0,2			-0,5			-0,4		
Себестоимость чугуна (сентябрь 2019г.)	руб/т											16 417,11	
Цена лома (сентябрь 2019г.)	руб/т											17 115,10	
Цена кокса (сентябрь 2019г.)	руб/т											10 656,94	
Изменение себестоимости за счет изменения производства	руб./сутки											-8 319	
Изменение себестоимости за счет изменения расхода кокса	руб./сутки											-51 744	
Экономический эффект (-убыток, + прибыль)	руб./сутки											60 063	

*Доля влияния результатов внедрения НИОКР принята 20%

Рис. 6.3.2. Фрагмент расчетного плана технико-экономических показателей доменного цеха

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 6

1. Крупное металлургическое предприятие имеет сложную многоуровневую структуру управления потреблением энергетических ресурсов. При этом для предприятия в целом на верхнем уровне общее потребление электрической энергии определяется по высокоточным приборам коммерческого учета. На нижнем уровне – уровне технологических объектов, как правило, реализуется технологический учет потребления электрической энергии с пониженной точностью. Кроме того, разнообразие режимов технологического оборудования приводит к различным уровням потребления энергии в разных режимах, что усложняет задачу прогнозирования и нормирования потребления энергии технологическим оборудованием. Повышенный уровень неопределенности потребления энергии на технологическом уровне обуславливает определенный небаланс при учете потребления энергии на основе данных технологического учета, которые используются для решения задачи прогнозирования и нормирования потребления. Здесь необходимо найти рациональный баланс оценок высокой точности на уровне предприятия в целом и технологическим учетом потребления электрической энергии отдельными технологическими объектами предприятия.

2. Планирование и контроль энергоэффективности технологических процессов целесообразно осуществлять через интегрированное планирование и управлению энергоемкостью технологических процессов исходя из статистических данных, данных технологических испытаний и энергетических экспертиз.

3. Для согласования коммерческого учета потребления электрической энергии с технологическим учетом потребления электрической энергии отдельными технологическими объектами предприятия необходимо решать задачу корректировки расчетного суммарного потребления

электрической энергии на уровне отдельных технологических объектов. В работе предложена процедура оптимального решения задачи согласования оценок объемов потребления электрической энергии на уровне технологических объектов и объемов потребления электрической энергии на уровне данных коммерческого учета для всего предприятия в целом.

4. Для планирования и управления показателями энергетической эффективности подразделений металлургического комплекса предложен новый алгоритм решения задачи идентификации энергетических характеристик объектов металлургического комплекса на основе определения значения частных и общей ошибок прогноза потребления удельного расхода энергетического ресурса.

5. Разработанное программное обеспечения интегрированного планирования и управления энергоемкостью технологических объектов внедрено в практику управления эффективностью энергометаллургического производственного комплекса ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

6. Разработана диаграмма потоков сэкономленных энергетических ресурсов, позволяющая проследить как локально сэкономленные ресурсы проходят по всей технологической схеме производства и концентрируются в местах, где оценивается общий технико-экономический эффект от энергосбережения. Это позволяет для сложных технологических комплексов системно рассмотреть связи локальных задач энергосбережения, построить системную диаграмму связей и провести системный анализ всего комплекса задач с целью достижения максимального технико-экономического эффекта во всем технологическом комплексе в целом.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Для повышения энергетической эффективности энергометаллургических технологических комплексов, содержащих в своем составе развитые энергетические системы, в работе предложено для планирования и управления процессами энергосбережения использовать интегрированный подход с использованием концепции ресурсосберегающей станции.

2. На основе данной концепции на примере промышленной площадки ПАО «ММК» в работе проведен системный анализ целей и задач интегрированного планирования и управления энергетической эффективностью энергометаллургического технологического комплекса.

3. В качестве ресурсосберегающей станции металлургического производства целесообразно использовать электрическую станцию, как центральное звено, использующую в т.ч. вторичные энергетические ресурсы, куда сводятся все локальные эффекты от энергосберегающих мероприятий. В работе предложены структура и функциональные алгоритмы автоматизированной системы управления эффективностью ресурсосберегающей станции.

4. Интегральный эффект экономии объема потребления природного газа в рамках предложенной концепции ресурсосберегающей станции в рассматриваемом металлургическом производственном комплексе базируется на системной организации локальных задач энергосбережения, а именно: оптимизации текущего КПД станции и максимизации потребления вторичных энергетических ресурсов металлургического производства; оптимизации нагрузки теплоэнергетических агрегатов; минимизации потерь энергетических ресурсов на «свече» доменного газа; минимизации потерь энергетических ресурсов на «свече» технологического пара за счет максимального аккумулирования вторичного технологического пара; минимизации потребления кокса за счет оптимизации режимов ведения доменной плавки; контроля энергоемкости технологических процессов.

5. Для решения задач оперативного управления эффективностью пароснабжения потребителей в работе разработаны сигнально-ориентированные макромодел технологических паровых систем и сетей металлургического производства, представляющие балансовые связи параметров моделей элементов, что позволяет осуществлять оперативное макро моделирование динамики сложных паровых систем и сетей. Разработанные динамические макромодел распределенных технологических сетей тепло- и пароснабжения внедрены в практику оперативно-диспетчерского управления сетями промышленной площадки ПАО «ММК».

6. Для доменного производства в работе предложено методическое, алгоритмическое и программное обеспечение экспертной системы, реализующей поддержку принятия решений по управлению технологическими процессами на основе построения областей повышенной эффективности в многомерном пространстве режимных параметров, предложены стратегии управления доменным процессом с целью снижения потребления кокса и повышения производительности доменного процесса.

7. Экономический эффект на уровне оперативного управления достигается за счет снижения кремния в чугуна при стабилизации теплового состояния доменной печи (оценивается по показателю среднеквадратического отклонения содержания кремния в чугуна в результате применения рекомендательного сервиса мастерами доменной печи составляет 60 тыс. руб. в сутки за счет снижения удельного расхода кокса на 0,4 кг/т., что за год оценивается до 19 млн. руб. с коэффициентом простоя 0,1.

Проведен расчет оптимального диапазона значений показателя холодной прочности кокса на основе показателя M10 по критерию минимума себестоимости стали, который составил 7,7-7,8%. В соответствии с актом внедрения, приведенным в приложении к диссертации, оценка экономического эффекта за счет снижения себестоимости стали на предприятии за период 10 месяцев 2019 года потенциально составляет до 196 млн. рублей.

8. Разработанный подход к интегрированному планированию и управлению энергоемкостью технологических процессов внедрен в практику управления эффективностью металлургического комплекса металлургического производства ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Технический эффект, полученный на экономии природного газа составляет 0,5 м³/ час, что при цене природного газа 3900 тыс. руб. за 1 куб м газа составляет 17 млн. руб. в год согласно приведенным актам внедрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеев, В.П. Идентификация промышленных объектов с учетом нестационарностей и обратных связей / В.П. Авдеев, Т.М. Даниелян, П.Г. Белоусов. Новокузнецк: СибМИ, 1984. – 88с.
2. Автоматизация крупных тепловых электростанций / под ред. М.П. Шальмана. – М.: Энергия, 1974. – С. 100-105.
3. Асенчик, О.Д. Проектирование визуальных приложений для моделирования электрических сетей с использованием пакетов VisSim и Simulink // Асенчик, О.Д., Стародубцев Е.Г., Токочаков В.И., Exponenta Pro. – 2003. – № 3. - С. 4-7.
4. Ахметзянов, А.В. Балансовые и вариационные методы моделирования нестационарных потоков в сложных газотранспортных системах. - Тр. ин-та проблем управления РАН, – 2005. – С. 103-120.
5. Барбасова, Т. А. Автоматизированная система энергетического менеджмента промышленного предприятия / Т. А. Барбасова, А. А. Захарова // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2013. – № 2 (30). – С. 23-28.
6. Барбасова, Т. А. Введение системы энергетического менеджмента предприятий для повышения энергетической эффективности челябинской области / Т. А. Барбасова, А. А. Захарова // Экономика промышленности. – 2012. – № 3. – С. 42-46.
7. Барбасова, Т. А. Интегрированное планирование и управление процессами энергосбережения в теплоэнергетическом комплексе металлургического предприятия / Т. А. Барбасова // Автоматизация и управление промышленными предприятиями: доклады научно-технической конференции всероссийского форума «Информационное общество – 2015: вызовы и задачи». – Челябинск. Издательский центр ЮУрГУ. 2015. – С. 72-90.

8. Баскаков, А. П. Реальные возможности повышения энергетической эффективности газовых отопительных котельных / А. П. Баскаков, В. А. Мунц, Н. Ф. Филипповский, Е. В. Черепанова // Промышленная энергетика. – 2005. – № 9. – С. 22-26.

9. Башмаков, И. А. Российская система учета повышения энергоэффективности и экономии энергии / И. А. Башмаков, А. Д. Мышак. – М.: ЦЭНЭФ, 2012. – 81 с.

10. Башмаков, И. А. Интегрированное планирование энергетических ресурсов в электроэнергетике / И. А. Башмаков // Энергосбережение. – 2009. – № 7. – С. 20-30.

11. Боллигер, М. Оптимизаторы энергопотребления. Как регулировать потребление энергии при производстве цемента / М. Боллигер, Э. Галлестей, Г. Кросли, М. Киенер // АББ Ревью 2/2007. – 2007. – С. 53-57.

12. Вайцзеккер, Э. Фактор четыре. Затрат – половина, отдача – двойная. Новый доклад Римскому клубу / Э. Вайцзеккер, Э. Ловинс, Л. Ловинс; перевод А. П. Заварницына и В. Д. Новикова под ред. академика Г. А. Месяца. – М.: Academia, 2000. – 400 с.

13. Галлестей, Э. Новые подходы в цементной промышленности / Э. Галлестей, Д. Кастаньоли, К. Колберт // АББ Ревью 2/2004. – 2004. – С. 13-19.

14. Герман, М. Л. Система оптимизации распределения нагрузок котлов и турбин Гродненской ТЭЦ-2 / М. Л. Герман, В. И. Щербич, С. Л. Пекарчик, В. В. Словик // Электрические станции. – 2010. – №2. – С. 10-15.

15. Горнштейн, В. М. Методы оптимизации режимов энергосистем / В. М. Горнштейн, Б. П. Мирошниченко, А. В. Пономарев. – М.: Энергоиздат, 1981. – 336 с.

16. Готлиб, А. Д. О принципе М. А. Павлова / А. Д. Готлиб // Исследование доменного процесса: Сборник трудов. – М.: Изд. АН СССР. – 1957. – С. 24-32.

17. Готлиб, А. Д. Основы автоматического регулирования доменного процесса / А. Д. Готлиб, Г. Г. Ефименко, А. А. Гиммельфарб // В кн.: Доменный процесс по новейшим исследованиям. – М.: Metallurgizdat, 1963. – С. 285-295.
18. Ексаев А.Р., Вайсфельд В.А. Гидравлические расчеты инженерных сетей как объектов геоинформационных систем. - <http://www.citycom.ru/publications/jul-1998.php>
19. Житаренко, В. М. Диаграммы оптимального распределения нагрузок между котлами ТЭЦ / В. М. Житаренко // Вестник Приазовского Державного Технического Университета. – 2014. – № 28 – С. 118-123.
20. Жеребин, Б.Н. Практика ведения доменной печи / Б.Н. Жеребин. М.: Metallurgiya, 1980. – 248с.
21. Иванов, В.И. Математическая модель потребления топлива электростанциями / В.И. Иванов // Нефтегазовое дело. Электронный научный журнал. – <http://www.ogbus.ru/energetika.shtml>. – С. 3 – 15.
22. Использование сигнала по тепловосприятию топочных экранов для оценки теплонапряженности поверхностей нагрева барабанного котла / Лесничук А.Н., Лошкарев В.А., Плетнев Г.П., Горбачев А.С., Поляков А.И. – Вестник МЭИ. – 1999. – №3. – С. 56-60.
23. Кабальнов, Ю. С. Структурные методы динамической координации процессов при управлении многосвязными объектами / Ю. С. Кабальнов, И. В. Кузнецов, А. В. Маргамов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2009. – № 7. – С. 3-10.
24. Казаринов, Л. С. Автоматизированная информационная система поддержки принятия решений по контролю и планированию потребления энергетических ресурсов / Л. С. Казаринов., Т. А. Барбасова., А. А. Захарова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2012. – № 23. – С. 118-122.

25. Казаринов, Л. С. Автоматизированные системы управления в энергосбережении (опыт разработки): монография / Л. С. Казаринов, Д. А. Шнайдер, О. В. Колесникова, Т. А. Барбасова и др. под ред. Л. С. Казаринова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, издатель Т. Лурье, 2010. – 228 с.
26. Казаринов, Л. С. Автоматизированные системы управления энергоэффективным освещением: монография / Л. С. Казаринов, Д. А. Шнайдер, Т. А. Барбасова, Е. В. Вставская и др. под ред. Л. С. Казаринова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, издатель Т. Лурье, 2011. – 208 с.
27. Казаринов, Л. С. Возможные механизмы финансирования энергосберегающих проектов / Л. С. Казаринов, И. В. Белавкин, П. Л. Самсонов, Т. А. Барбасова // Вестник энергосбережения Южного Урала – 2005. – № 4. – С.12-14.
28. Казаринов, Л. С. Интегрированное планирование и управление процессами энергосбережения в теплоэнергетическом комплексе металлургического предприятия / Л. С. Казаринов, Т. А. Барбасова // Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах (ПУТС-2015). Материалы конференции. Санкт-Петербург. 28-30 октября 2015 г. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. – С. 169-173.
29. Казаринов, Л. С. Интегрированное управление энергоемкостью металлургического производства / Л. С. Казаринов, Т. А. Барбасова // Вестник Южно-Уральского государственного университета Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2015. – № 15. – С. 121-124.
30. Казаринов, Л. С. Метод многоуровневого нормирования и оптимального прогноза объемов потребления электрической энергии промышленным предприятием / Л. С. Казаринов, Т. А. Барбасова, О. В. Колесникова, А. А. Захарова // Автоматика и вычислительная техника. – 2014. – № 6. – С. 20-32.

31. Казаринов, Л. С. Метод планирования и контроля энергоемкости производственных процессов на основе комплексного анализа данных энергетических обследований и данных эксплуатации / Л. С. Казаринов, Т. А. Барбасова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2015. – № 2. – С. 121-124.

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

33. Казаринов, Л. С. Метод прогнозирующего управления энергетической эффективностью промышленного предприятия / Л. С. Казаринов, Т. А. Барбасова, А. А. Захарова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2013. – № 1. – С. 12-24.

34. Казаринов, Л. С. Метод эллиптических центроидов в управлении эффективностью технологических процессов / Л. С. Казаринов, Т. А. Барбасова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2015. – № 1. – С. 152-155.

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

36. Казаринов, Л. С. Регуляризация некорректно поставленных задач упреждающего управления в энергосберегающих технологиях /

Л. С. Казаринов, Т. А. Барбасова // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2013. – № 1. – С. 5-16.

37. Казаринов, Л. С. Система диспетчеризации и оперативного управления энергетическими потоками в теплоэнергетическом комплексе металлургического предприятия / Л. С. Казаринов, Т. А. Барбасова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2013. – № 2. – С. 53-63.

38. Казаринов, Л. С. Система управления энергетическими потоками в теплоэнергетическом комплексе металлургического предприятия / Л. С. Казаринов, Т. А. Барбасова // Вестник Южно-Уральского Государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2012. – № 23. – С. 21-25.

39. Казаринов, Л.С. Системы. Управление и познание: аналитические очерки / Л.С. Казаринов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. – 2017. – 496 с.

40. Казаринов, Л. С. Управление теплоэнергетическим комплексом промышленного предприятия на основе концепции энергосберегающей станции / Л. С. Казаринов, Т. А. Барбасова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2014. – № 3. – С. 103-106.

41. Казаринов, Л. С. Упреждающее управление энергетической эффективностью предприятий / Л. С. Казаринов, Т. А. Барбасова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2012. – № 35 (294). – С. 85-98.

42. Карасев Н.И., Томилова Н.И. Математическая модель узловых напоров для задач потокораспределения в теплоснабжающих системах мегаполисов // Труды университета. – Караганда. – 2008. – Вып. 1. – С.75-77.

43. Карасев Н.И., Фольгарт В.И. и др. Моделирование установившихся гидравлических режимов больших теплоснабжающих систем

с дроссельным управлением // Электронное моделирование. – 1990. - №1. - С.72-76.

44. Карманов, В. С. Оптимизация режимов функционирования ТЭЦ как способ повышения энергетической эффективности / В. С. Карманов, Б. Н. Мошкин, Ю. А. Секретарев, Т. В. Чекалина, К. Н. Яковченко // Энергетика Татарстана. – 2013. – № 3 (31). – С. 61-67.

45. Клер, А. М. Математическое моделирование и оптимизация режимов работы ТЭЦ / А. М. Клер, Н. П. Деканова, З. Р. Корнеева и др. // Новые технологии и научные разработки в энергетике (эксплуатация, ремонт, нетрадиционные источники энергии): Тезисы докладов. – Новосибирск: Союз научных и инженерных обществ СССР. Новосибирское областное управление Всесоюзного научно-технического общества энергетиков и электротехников, 1994. – № 2. – С. 27-29.

46. Копцев, Л.А. Моделирование потребления топлива в ОАО «ММК» / Л.А. Копцев, И.А. Япрынцева // Промышленная энергетика. – Москва: НТФ «Прогресс» – 2004. – Вып. № 5. – С. 2-6.

47. Копцев, Л.А. Повышение эффективности использования энергии при производстве, распределении и потреблении сжатого воздуха /Л.А. Копцев, В.Н. Михайловский, Д.В. Майсюков, И.А. Япрынцева //Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ. – 2003. – Вып. 2, №.4(20) – С.126-128.

48. Копцев, Л.А.. Статистический подход к анализу и управлению технологическими процессами при выплавке чугуна в доменном цехе с целью экономии топлива / Л.А. Копцев, И.А. Япрынцева, А.В. Павлов //Промышленная энергетика. – Москва: НТФ «Прогресс», 2006 – Вып.№2. – С.2-5.

49. Крицкий, Г.Г. Эффективные решения для систем теплоснабжения/ Крицкий Г.Г., Аширов А.А. // Теплоэффективные технологии, 2003. - JSfel. - С. 36-39.

50. Кудрин, Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий: Учебник для студентов высших учебных заведений / Б. И. Кудрин. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005. – 672 с.
51. Левенталь, Г. Б. Оптимизация теплоэнергетических установок / Г. Б. Левенталь, Л. С. Попырин. – М.: Энергия, 1970. – 352 с.
52. Либерзо, Л.М. Системы экстремального регулирования / Либерзон Л.М., Родов А.Б. . – М.: Энергия, 1965.
53. Липовка, Ю.Л. Анализ потоков тепловой энергии в гидравлических цепях: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. - Красноярск, 2002.
54. Липовка, А.Ю. Совершенствование методов расчета тепловых сетей с иерархическим принципом построения: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Красноярск, 2012.
55. Лисиенко, В. Г. Хрестоматия энергосбережения: Справочное издание: в 2-х книгах. Книга 1 / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Ладыгичев под ред. В. Г. Лисиенко. – М.: Теплоэнергетик, 2002. – 688 с.
56. Лисиенко, В. Г. Хрестоматия энергосбережения: Справочное издание: В 2-х книгах. Книга 2 / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Ладыгичев под ред. В. Г. Лисиенко. – М.: Теплоэнергетик, 2002. – 768 с.
57. Литвак, В. В. Оптимизация режимов работы турбоустановок тепловых электрических станций с использованием характеристик относительных приростов / В. В. Литвак, А. С. Матвеев, С. А. Шевелев // Известия Томского политехнического университета. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – № 4. – С. 21-23.
58. Макаров, А. А. Методы исследования и оптимизации энергетического хозяйства. / А. А. Макаров, Л. А. Мелентьев. – Новосибирск: Наука, 1973. – 274 с.
59. Максимов, В. Применение средств имитационного моделирования работы ТЭС при внедрении ИСУ ПП / В. Максимов, В. Ларин. – 2010. – № 07-08 (79). – С. 66-67.

60. Меренков, А.П. Теория гидравлических цепей / Меренков А.П., Хасилев В.Я. - М.: Наука, 1985. – 279 с.
61. Мерцалов, А. Повышение эффективности ТЭС с помощью аналитики ICONICS / А. Мерцалов, О. Киселева, В. Рогов // Современные технологии автоматизации. – 2013. – № 2 – С. 54-62.
62. Месарович, М. Д. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Д. Месарович, Д. Мако, И. Такахара. – М.: Мир, 1973. – 344 с.
63. Мовчан, В. А. Некоторые направления повышения эффективности котельных установок / В. А. Мовчан, Р. А. Ильин // Вестник АГТУ. – 2008. – № 6 (47). – С. 78-85.
64. Низамеев, Б. М. Повышение энергетической эффективности котельной путем оптимального распределения нагрузки между котлоагрегатами/ Б. М. Низамеев, В. К. Ильин // Информационные системы. Автоматизация и системы управления. – СПб.: Изд-во СПбГТИ(ТУ). – 2016. – С. 90-102.
65. Никифоров, Г. В. Комплексное решение проблем энергосбережения на металлургическом предприятии / Г. В. Никифоров, Б. И. Заславец // Сб. Электрификация металлургических предприятий Сибири. – 1997. – № 7. – С. 72-80.
66. Никифоров, Г. В. Некоторые практические результаты реализации политики энергосбережения на Магнитогорском металлургическом комбинате / Г. В. Никифоров, В. П. Прудаев, Ю. П. Коваленко // Электрика. – 2001. – № 2. – С. 2-10.
67. Никифоров, Г. В. Об управлении режимами в системах теплофикации промышленных предприятий / Г. В. Никифоров, Л. С. Казаринов, В. П. Пастушенко, Л. А. Кобцев, Д. А. Шнайдер // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2003. – № 4 (20). – С. 28-34.
68. Никифоров, Г. В. Управление использованием вторичных топливных газов на Магнитогорском металлургическом комбинате /

Г. В. Никифоров, Л. А. Кобцев, Д. В. Поварницын, И. А. Япрынцева // ОАО «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия». – 2005. – № 2. – С. 79-83.

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

70. Никифоров, Г. В. Энергосбережение на металлургических предприятиях: Монография. / Г. В. Никифоров, Б. И. Заславец. – Магнитогорск: МГТУ, 2000. – 283 с.

71. Ноздренко, Г. В. Алгоритмическое и программное обеспечение задачи распределения нагрузки между энергоустановками ТЭЦ / Г. В. Ноздренко, Е. Б. Корытный, О. П. Алексеенко // Экономичность и оптимизация режимов энергосистем: Межвуз. сб. науч. трудов. – Новосибирск: НЭТИ, 1984. – С. 75-84

72. Олейников, В.А. Оптимальные системы автоматического управления. – М: Высшая школа, 1969. – С. 98-106.

73. Онорин О.П., Спирин Н.А., Терентьев В.Л., Гилева Л.Ю., Рыболовлев В.Ю и др. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2005. – 301 с

74. Оптимизация процесса горения в паровом котле при сжигании нескольких видов топлива с применением экстремального регулятора / Поляков А.А.: Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. – М., 2005.

75. Основы теории и технологии доменной плавки / А.Н. Дмитриев, Н.С. Шумаков, Л.И. Леонтьев, О.П. Онорин. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 545с

76. Парсункин, Б.Н. Повышение производительности доменной печи при оптимизации автоматического управления подачей природного газа и технического кислорода в дутье / Парсункин Б.Н., Сеничкин Б.К., Андреев С.М., Рябчиков М.Ю. // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. 2011. № 4. – С.73-77.

77. Паршаков, В. М. АСУ ТП доменной плавки и её технологическое насыщение. Доменное производство / В. М. Паршаков, А. А. Третьяк, А. П. Уланов // XXI век. Труды Международного конгресса доменщиков. – М.: Издательский дом «Кодекс», 2010. – С. 391-413.
78. Паршаков, В. М. Двумерная модель теплообмена в доменной печи. / В. М. Паршаков, Т. Ю. Каширская, В. А. Заболотских // Теплотехническое обеспечение основных технологических процессов чёрной металлургии. Сборник трудов. – М. : «Металлургия», 1988. – С. 22-25.
79. Паршаков, В. М. Повышение эффективности использования пылеугольного топлива в доменной печи / В. М. Паршаков // «Сталь». – 2005. – № 8 – С. 32-37.
80. Плетнев, Г.П. Автоматизированные системы управления объектами тепловых электростанций. – М.: изд. МЭИ, 1995. – 353 с.
81. Плетнев, Г.П. Автоматическое управление и защита теплоэнергетических установок электростанций. – М.: Энергоатомиздат, 1986
82. Плетнев, Г.П. Экстремальное регулирование режима горения в топке барабанного парогенератора / Плетнев Г.П., Сафонов В.М., Усанов В.В. – Теплоэнергетика. – 1977. – №2. – С. 57-62.
83. Пупков, К. А. Оптимальное управление многообъектными многокритериальными системами, структурный синтез и иерархическое уравнивание в интеллектуальных системах управления / К. А. Пупков, Е. М. Воронов, А. А. Карпунин // Вестник Российского университета дружбы народов. Инженерные исследования. – 2010. – № 4. – С. 73-78.
84. Пшеничников, С. Физический износ энергетического оборудования ТЭС. Рейтинг ДЗО РАО «ЕЭС России» [Электронный ресурс] / С. Пшеничников, И. Сумской. – 2005. – 12. – Режим доступа: http://www.e-m.ru/er/2005-12/22870/?phrase_id=333686.
85. Рамм, А. Н. О влиянии интенсивности плавки на производительность доменных печей и относительный расход кокса /

А. Н. Рамм // Исследование доменного процесса: Сб. научн. тр. АН СССР. – М.: Изд. АН СССР. – 1957. – С. 85-87.

86. Рамм, А. Н. Современный доменный процесс / А. Н. Рамм. М. : Металлургия, 1980. – 304 с.

87. Салов, А. Г. Многокритериальное оценивание эффективности функционирования котельного оборудования электрических станций / А. Г. Салов, А. А. Гаврилова, А. В. Кухарева, Ю. В. Гаврилова // Вестник Воронежского государственного технического университета. – Воронеж: изд. Воронежский государственный технический университет, 2013. – С. 73-79.

88. Салов, А. Г. Обобщенная оценка сравнительной эффективности работы котельного оборудования/ А. Г. Салов, А. А. Гаврилова, Ю. В. Чиркова, Л. А. Сагитова // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. – 2016. – № 2 (23). – С. 140-146

89. Спирин, Н. А. Информационные системы в металлургии / Н. А. Спирин, Ю. В. Ипатов, В. И. Лобанов и др. под ред. Н. А. Спирина. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. – 617 с.

90. Спирин, Н. А. Оптимизация и идентификация технологических процессов в металлургии / Н. А. Спирин, В. В. Лавров, С. И. Паршаков, С. Г. Денисенко под ред. Н. А. Спирина. – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2006. – 307 с.

91. Султангузин, И. А. Научно-технические основы моделирования и оптимизации энерготехнической системы металлургического комбината: автореферат дис.д-ра техн. наук / И. А. Султангузин. – М. : Изд-во БКТ, 2005. – 40 с.

92. Сучков, А.В. Совершенствование управления многомерными технологическим объектом на примере доменной печи: монография / А.В. Сучков, В.Г. Лисиенко, В.А. Сучков. Екатеринбург: УрФУ. – 2012. – 126с.

93. Товаровский, И. Г. Доменная плавка Монография. 2-е издание. / И. Г. Товаровский. – Днепропетровск : Пороги, 2009. – 768 с.

94. Товаровский, И. Г. Нормативная оценка влияния параметров доменной плавки на расход кокса и производительность / И. Г. Товаровский // Сталь. – 2014. – № 5. – С. 4-11.
95. Товаровский, И.Г. Применение математических методов и ЭВМ для анализа и управления доменным процессом/ Товаровский И.Г., Е.И. Райх, К.К. Шкодин и др. М.: Металлургия. – 1978, – 204с
96. Товаровский, И.Г. Совершенствование и оптимизация параметров доменного процесса / И.Г. Товаровский. М.: Металлургия. – 1987. – 192 с.
97. Федосеев, С. А. Управление техническими системами технологическими процессами / С. А. Федосеев, М. Б. Гитман, В. Ю. Столбов // Управление большими системами: сборник трудов. – 2010. – № 31. – С. 323-352.
98. Флейшман, Б. С. Элементы теории потенциальной эффективности сложных систем / Б. С. Флейшман. – М. : Издательство: Советское радио, 1971. – 224 с.
99. Фокин, В. М. Основы энергосбережения и энергоаудита / В. М. Фокин. – М. : «Издательство Машиностроение-1», 2006. – 256 с.
100. Цвиркун, А. Д. Основы синтеза структуры сложных систем / А. Д. Цвиркун. – М. : Наука, 1982. – 200 с.
101. Цвиркун, А. Д. Структура многоуровневых и крупномасштабных систем / А. Д. Цвиркун, В. К. Акинфиев. – М. : Наука, 1993. – 157 с.
102. Цвиркун, А. Д. Структура сложных систем / А. Д. Цвиркун. – М. : Радио и связь, 1975. – 200 с.
103. Цыпулев, Д. Ю. Выбор оптимальных режимов работы ТЭЦ со сложным составом оборудования. Диссертация на соискание степени кандидата технических наук / Д. Ю. Цыпулев. – М. : 2008. – 217 с.
104. Шашков, О.К. Расчет переменных режимов ТЭС с паротурбинными установками на основе метода теплогидравлических цепей / Шашков О.К., Шашков В.О. // Теплоэнергетика. - 2004. - №4. – С. 67-71.

105. Шнайдер, Д. А. Оптимизация режимов теплоснабжения зданий на основе ГИС реального времени / Д. А. Шнайдер, Т. А. Барбасова, А. А. Захарова, В. О. Скремета // Труды научно-практического семинара «Применение современных технологий и оборудования в кадастровых, геодезических и горных работах». – Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – С. 105-112.
106. Шнайдер, Д. А. Система энергетического менеджмента комплекса зданий ЮУрГУ / Д. А. Шнайдер, Т. А. Барбасова // Труды научно – практической конференции «Актуальные проблемы автоматизации и управления». – Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – С. 238-242.
107. Штадлер, К. С. Управление с прогнозирующей моделью для кальцинатора на заводе Lagerdorf компании Holcim использованием программного обеспечения ABB Expert Optimizer / К. С. Штадлер, Б. Вольф, Э. Галлестай // Ноу-хау процесса Цемент Известь Гипс. – 2007. – № 3. – С. 46-51.
108. Щинников, П. А. Критерий эффективности при энергетической оптимизации функционирования энергопреобразования / П. А. Щинников, Г. В. Нозренко, Ф. А. Серант и др. // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – № 1. – С. 208-211.
109. Щинников, П. А. Оптимизация режимов работы энергоблоков ТЭЦ / П. А. Щинников, Г. В. Нозренко, О. В. Боруш и др. // Известия РАН. Энергетика. – 2014. – № 3. – С. 54-60.
110. Щинников, П. А. Экономия топлива на ТЭС за счет применения метода согласования энергобалансов / П. А. Щинников, Г. В. Нозренко, А. В. Сафронов // Научный вестник НГТУ. – 2014. – № 1 (54). – С. 151-158.
111. Экстремальное регулирование котельного агрегата / Шмелев Н.В. и др. – Электрические станции. – 1967. – №10. – С. 31-37
112. Angela, X. G. A Neural Network Approach to the Modeling of Blast Furnace: Bachelor of Science in Computer Science and Engineering and Master of

Engineering in Electrical Engineering and Computer Science / X. G. Angela. – Massachusetts Institute of Technology. – 1999. – 69 p.

113. Antonette, D'Sa. Integrated Resource Planning (IRP) and power sector reforming in developing countries / D'Sa. Antonette // Energy Policy. – 2005. – Vol. 33, Issue 10, July. – P. 1271-1282.

114. Burgess, J. M. Analysis of Blast Furnace Pressure Tappings, using a Cohesive-zone Gas-distribution Model / J. M. Burgess, D. R. Jenkins, K. L. Hockings // Ironmaking and Steelmaking. – 1984. – № 5. – P. 253-261.

115. David, S. F. Artificial Neural Network Model for Predict of Silicon Content in Hot Metal Blast Furnace/ S. F. David, F. F. David, M. L. P. Machado // Materials Science Forum. – 2016. – P. 572-577.

116. Energy Efficiency Policies & Programs. – Режим доступа: <http://www.eco3.org/news/study-tour/smud.pdf>www.eco3.org.

117. Fernández, J. M. M. Online estimation of electric arc furnace tap temperature by using fuzzy neural networks / José Manuel Mesa Fernández, Vleriano Álvarez Cabal, Vicente Rodríguez Montequin, Joaquín Villanueva Balsera // Engineering Applications of Artificial Intelligence 21. – 2008. – P.1001-1012.

118. Findeisen, R. An Introduction to Nonlinear Model Predictive Control / R. Findeisen, F. Allgöwer // 21st Benelux Meeting on Systems and Control. – 2002. – P. 1-23.

119. Gallestey, E. Using model predictive control and hybrid systems for optimal scheduling of industrial processes / E. Gallestey, A. Stothert, D. Castagnoli, G. Ferrari-Trecate, M. Morari // Automatisierung-stechnik. – 2003. – Vol. 51. – № 6. – P. 285-294.

120. Garcia, C. E. Model Predictive Control: Theory and Practice - a Survey / C. E. Garcia, D. M. Prett, M. Morari // Automatica. – 1989. – P. 335-348.

121. García, M. R. A Robust Multi-Model Predictive Controller for Distributed Parameter Systems / M. R. García, C. Vilas, L. O. Santos, A. A. Alonso // Journal of Process Control. – 2012. – № 22 (1). – P. 60-71.

122. Gobetto, M. Operations Management in Automotive Industries: From Industrial Strategies to Production Resources Management / M. Gobetto // Through the Industrialization Process. Springer Science+Business Media Dordrecht. – 2014. – 245 p.
123. Holkar, K. S. An overview of model predictive control / K. S. Holkar, L. M. Waghmare // SERSC. Int. J. Contr. Auto. – 2010. – № 3 (4). – P. 47-63.
124. Integrated Resource Plan. – Режим доступа: <http://www.pacificorp.com/es/irp.html>.
125. Integrated Resource Planning. The Hanover LCP Case Study: Final Report by Öko-Institute for Applied Ecology and Wuppertal Institute for Climate·Environment·Energy Gmbh. – Hannover: 1995.
126. Kouvaritakis, B. Nonlinear Predictive Control theory and practice / B. Kouvaritakis, M. Cannon. – IEE control engineering series: IET, 2001. – 201 p.
127. Kule, J. Blast Furnace model development and application in the British Steel Corporation / J. Kule // “nd. Use Thermochem.Data Proc. Conf., Univ. Surrey. Sept. 11th – 13th.1979. – 1980. – P. 403- 415.
128. Kumar, D. Optimization of blast furnace parameters using artificial neural network: Master of technology in metallurgical and materials engineering / D. Kumar. – 2015. – 36 p.
129. Kumar, S. A. Production and Operations Management / S. A. Kumar, N. Suresh. – New Age International (P) Ltd., 2009. – 284 p.
130. Liuping, W. Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB / W. Liuping. – Springer, 2009. – 376 p.
131. Lucia, S. Multi-stage nonlinear model predictive control applied to a semi-batch polymerization reactor under uncertainty / Sergio Lucia, Tiago Finkler, Sebastian Engell // Journal of Process Control. – 2013. – № 23 (9). – P. 1306-1319.
132. Lensson, N. Local integrated resource planning: a new tool for a competitive era / N. Lensson // The Electricity Journal. – 1996. – Vol. 9, Issue 6, July. – P. 26-36.

133. Mayne, D. Q. Constrained model predictive control: stability and optimality / D. Q. Mayne, J. B. Rawlings, C. V. Rao, P. O. M. Scokaert // *Automatica*. – 2000. – № 36. – P. 789-814.
134. Morari, M. Model predictive control: present and future / M. Morari, J. H. Lee, M. P. C. Past // *Computers & Chemical Engineering*. – 1999. – № 23. – P. 667-682.
135. Pannu, A. Artificial Intelligence and its Application in Different Areas [Искусственный интеллект и его применение в разных областях] / A. Pannu // *International Journal of Engineering and Innovative Technology*. – 2015. – Vol. 4. – № 10. – P. 79-84.
136. Qina, S. J. A survey of industrial model predictive control technology / S. Joe Qina, Thomas A. Badgwell // *Control Engineering Practice* 11. – 2003. – P. 733-764.
137. Richalet, J. Model predictive heuristic control: Applications to industrial processes / J. Richalet, A. Rault, J. L. Testud, J. Papon // *Automatica*. – 1978. – № 14. – P. 413-428.
138. Sacramento Municipal Utility District /SMUD/. – Режим доступа: <http://smud.org>.
139. Sasaki, M. Formation and Melt-down of Softening-Melting Zone in Blast Furnace / M. Sasaki, K. Ono, A. Suzuki // *Trans. Of the Iron and Steel Inst. Jap.* – 1977. – Vol.17. – № 7. – P. 391-400.
140. Sugiyama, T. A Theoretical Analysis on Gas Flow and Heat Transfer in Packed Beds with Fused and Unfused Layers / T. Sugiyama, J. Yagi, Y. Omori // *Tetsu-to-Hagane. Journ. Of the Iron and Steel Inst. Jap.* – 1978. – Vol. 64. – № 12. – P. 1676-1684.
141. Tunçkaya, Y. Comparative performance evaluation of blast furnace flame temperature prediction using artificial intelligence and statistical methods / Y. Tunokaya, E. Koklúkaya // *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, – 2016. – V. 24. – P. 1163-1175.

142. Tveit, T. Multi-period steam turbine network optimization / Tor-Martin Tveit, Carl-Johan Fogelholm // *Applied Thermal Engineering*. – 2006. – P. 993-1000.
143. Ultsch, A. Kohonen's self organizing feature maps for exploratory data analysis / Ultsch, H. P. Siemon // *In Proceedings of International Neural Networks Conference (INNC)*. – 1990. – P. 305-308.
144. Vasičkaninová, A. Neural Network Predictive Control of chemical reactor / A. Vasičkaninová, M.
145. Bakošová // *Proceedings 17th International Conference on Process Control '09*. – 2009. – P. 426-431.
146. Yagi, J. Mathematical Models of the Blast Furnace Process / J. Yagi // *Tetsu-to-Hagane*. – 1983. – № 10. – P. 1242-1249.
147. Yagi, J. Two-dimensional Simulation on the Gas Flow and Heat Transfer in the Blast Furnace / J. Yagi, K. Takeda, Y. Omori et al. // *Trans. of the Iron and Steel Inst. Jap.* – 1983. – Vol.22. – № 11. – P. 884-892.
148. Yinsong, W. Performance assessment of thermal power plant load control system based on covariance index / Wang Yinsong, Li Shizhe, Tian Jingyu, Zhao Zheng // *Control Engineering Practice*. – 2016. – № 54. – P. 58-69.

ПРИЛОЖЕНИЕ А.

Акты внедрения результатов диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»

А.А. Радионов
5.11 2020 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс

к.т.н., доцента кафедры автоматики и управления

ФГАОУ ВО ЮУрГУ (НИУ)

Барбасовой Татьяны Александровны:

**«Методы и модели автоматизированного ресурсосберегающего
управления энергометаллургическим технологическим комплексом»,
представленной на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Настоящим актом подтверждается, что научно-практические результаты, полученные к.т.н., доцентом кафедры автоматики и управления Барбасовой Татьяной Александровной в результате работ над диссертацией на соискание степени доктора технических наук по теме «Методы и модели автоматизированного ресурсосберегающего управления энергометаллургическим технологическим комплексом», внедрены в учебный процесс кафедры автоматики и управления ФГАОУ ВО ЮУрГУ (НИУ). Указанные результаты используются в учебных планах подготовки магистров и бакалавров по направлениям 15.04.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», 27.03.04 «Управление в технических системах» в следующих дисциплинах.

1. Инновационная техника и технологии в сфере энергосбережения (в объеме 15 ЗЕ, направление 15.04.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»). Используются при проведении практических занятий по темам: «Расчет показателей энергетической эффективности для сложных технологических объектов», «Применение автоматизированных систем управления для решения задач энергосбережения в энергетическом комплексе промышленных предприятий», «Нормирование потребления энергоресурсов», «Инновационная техника энергосбережения в промышленности».

2. Автоматизированные информационно-управляющие системы (в объеме 3 ЗЕ, направление 27.03.04 «Управление в технических системах»). Используются при чтении лекций по темам: «Фильтрация сигналов.

Экспоненциальная фильтрация», «Средства идентификации и оптимизации», «Схемы использования нейронных сетей в системах управления», «Многосвязное регулирование. Автономное регулирование в сложных системах, компенсация возмущений».

3. Современные проблемы теории управления (в объеме 3 ЗЕ, направление 15.04.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»). Используются при чтении лекций по темам: «Управление ресурсоемкими технологическими процессами», «Использование искусственных нейронных сетей в автоматизированных системах управления технологическими процессами», «Практические примеры применения модельно упреждающего управления».

Научно-практические результаты, полученные к.т.н. доцентом Барбасовой Т.А. в диссертационной работе, связанные с проблемой энергетической эффективности, были использованы по линии Правительства Челябинской области при проведении курсов повышения квалификации специалистов в сфере энергосбережения в количестве 500 слушателей по темам:

- современное состояние и уровни энергоэффективности объектов ЖКХ и предприятий производственного сектора;
- методы и технические средства определения показателей энергетической эффективности по рациональному использованию и сбережению энергоресурсов;
- внедрение и эксплуатация интеллектуальных энергосберегающих систем учета энергоресурсов, энергосберегающих систем диспетчеризации и управления в инженерных системах.

В рамках реализации мероприятий Челябинской области по повышению квалификации специалистов в области энергосбережения по Государственному контракту с Министерством строительства, инфраструктуры и дорожного хозяйства Челябинской области от «12» декабря 2013 г. № 101/К были проведены консультации по инвестиционным проектам областной целевой программы повышения энергетической эффективности экономики Челябинской области и сокращения энергетических издержек в бюджетном секторе на 2010 – 2020 годы,

Зав. каф. АиУ

Л.С. Казаринов

Проф. каф. АиУ

Д.А. Шнайдер

УТВЕРЖДАЮ

Начальник Центра энергосберегающих
технологий ПАО «Магнитогорский
металлургический комбинат»



И.А. Япрынцева
2020 г.

внедрения результатов диссертационной работы

к.т.н., доцента кафедры автоматики и управления

ФГАОУ ВО ЮУрГУ (НИУ),

директора ООО НПП «Политех-Автоматика» Технопарка «ЮУрГУ-Полет»

Барбасовой Татьяны Александровны:

**«Методы и модели автоматизированного ресурсосберегающего
управления энергометаллургическим технологическим комплексом»,**

представленной на соискание ученой степени

доктора технических наук

Комиссия в составе представителей ПАО «ММК»: председателя – ведущий специалист НТЦ Кучерова И.К., зам. начальника Центра энергосберегающих технологий (ЦЭСТ) Михайловский В.Н., представителей ФГАОУ ВО ЮУрГУ(НИУ) – проректор по научной работе д.т.н. Коржов А.В., заведующий кафедрой автоматики и управления, д.т.н. Казаринова Л.С., профессора кафедры автоматики и управления, д.т.н. Шнайдера Д.А., созданная распоряжением начальником Центра энергосберегающих технологий ПАО «ММК», к.т.н. Япрынцевой И.А., рассмотрела результаты диссертационной работы Барбасовой Т.А. на тему: **«Методы и модели автоматизированного ресурсосберегающего управления энергометаллургическим технологическим комплексом».**

Комиссия отмечает, что основные результаты диссертационной работы были получены Барбасовой Т.А. в рамках выполнения НИР по следующим договорам между ПАО «ММК» и ФГАОУ ВО ЮУрГУ(НИУ) и ООО НПП «Политех-Автоматика» в качестве руководителя или ведущего исполнителя НИР:

- «Системное моделирование и оптимизация режимов отпуска и потребления ТЭР теплоэнергетического комплекса ОАО «ММК», договор между ПАО «ММК» и ФГАОУ ВО ЮУрГУ(НИУ)» №211268 от 22.04.2013 г., научный руководитель д.т.н., проф. Л.С. Казаринов, ответственный исполнитель к.т.н. Барбасова Т.А.;
- «Автоматизация мониторинга тепловой экономичности энергетического оборудования электрических станций», договор между ПАО «ММК» и ФГАОУ ВО ЮУрГУ(НИУ)» № 2007198(151198) от 16.02.07 г., научный руководитель д.т.н., проф. Л.С. Казаринов, ответственный исполнитель к.т.н. Барбасова Т.А.;
- «Нормирование и прогноз потребления воды в системе оборотного и технического водоснабжения ОАО «ММК», договор между ПАО «ММК» и ФГАОУ ВО ЮУрГУ(НИУ)» №221053(2014125) от 13.03.2014 г., научный руководитель д.т.н., проф. Л.С. Казаринов, ответственный исполнитель к.т.н. Барбасова Т.А.;
- «Разработка методического и программного обеспечения эффективного управления режимами энергетических котлов электрических станций ОАО «ММК», договор между ПАО «ММК» и ФГАОУ ВО ЮУрГУ(НИУ)» №210782 (2013079) от 12.03.2013 г., научный руководитель д.т.н., проф. Л.С. Казаринов, ответственный исполнитель к.т.н. Барбасова Т.А.;
- «Разработка и внедрение системы автоматического регулирования режимов паровых котлов ЦЭС по критерию минимума потребления природного газа», договор между ПАО «ММК» и ФГАОУ ВО ЮУрГУ(НИУ)» №222985 (2914442) от 03.10.2014 г., научный руководитель д.т.н., проф. Л.С. Казаринов, ответственный исполнитель к.т.н. Барбасова Т.А.;
- «Организация комплексного управления режимами паровых сетей промплощадки ККЦ», договор между ПАО «ММК» и ФГАОУ ВО ЮУрГУ(НИУ)» №161295 от 20.02.2008 г., научный руководитель д.т.н., проф. Л.С. Казаринов, ответственный исполнитель к.т.н. Барбасова Т.А.;
- «Разработка алгоритма «Нормирование удельного расхода и прогнозирование расхода электроэнергии ОАО «ММК», договор между ПАО «ММК» и ФГАОУ ВО ЮУрГУ(НИУ)» №211396 от 13.05.2013 г., научный руководитель д.т.н., проф. Л.С. Казаринов, ответственный исполнитель к.т.н. Барбасова Т.А.;
- «Многосвязная система оптимального регулирования экономичности потребления топлива для энергетических котлов электрических станций», договор между ПАО «ММК» и ФГАОУ ВО

ЮУрГУ(НИУ)» № 180396 от 29.01.10г., научный руководитель д.т.н., проф. Л.С. Казаринов, ответственный исполнитель к.т.н. Барбасова Т.А.

Комиссия, на основании ранее выданного акта внедрения результатов диссертационной работы Барбасовой Т.А. (*приложение 1*), утвержденного главным энергетиком ПАО «ММК» Журавлевым Ю.П., подтверждает следующие выводы и результаты работы.

1. Разработана автоматизированная система мониторинга и регулирования экономичности использования топлива в паровых котлах с оптимальной коррекцией подачи общего воздуха по критерию достижения максимального КПД брутто котла на основе использования методов оптимальной цифровой фильтрации. Разработана и установлена на ЦЭС система автоматического управления режимами работы паровых котлов в зависимости от текущей подачи топлива (доменный, природный газ) по критерию максимума текущего КПД. В ходе испытаний АСУ в апреле 2014 г., согласно протокола Заседания технического совета ОАО «ММК» №5 от 02.06.2014 г. и письма № УГЭ-1058-23 от 5.05.2014 «Об испытаниях системы автоматического управления на котле № 5 ЦЭС» выявлено:

- расход доменного газа при тепловом режиме котла без химического недожога вырос соответственно в базовом режиме на 8% (5,7 тыс. м³/ч), на главном регуляторе на 5 % (3,8 тыс. м³/ч);

- расход природного газа при тепловом режиме котла без химического недожога снизился соответственно в базовом режиме на 11% (0,73 тыс. м³/ч), на главном регуляторе на 7% (0,47 тыс. м³/ч).

В результате экономия природного газа на 1 котле ст.№5 составила 2 558 тыс.м³ в год.

В настоящее время экономия природного газа на 8-ми котлах станции ЦЭС за счет выполненных работ составляет 0,5 тыс. м3 в час.

2. Разработана расчетная схема системы теплоснабжения промплощадки ПАО «ММК», учитывающая 5 источников, до 140 потребителей, 180 км тепловых сетей, и расчетная схема системы пароснабжения промплощадки ПАО «ММК», учитывающая 9 источников, до 50 потребителей, 300 км паровых сетей. На основе расчетных схем разработаны программные макромодели систем паро- и теплоснабжения потребителей промплощадки ПАО «ММК», а также осуществлена их идентификация (настройка параметров) на основе фактических данных эксплуатации. Разработанная версия программной макромодели систем паро- и теплоснабжения содержит более 41 тыс. функциональных блоков.

Выполнена стыковка программных моделей с существующей АСДУ УГЭ для получения данных фактической эксплуатации систем паро- и теплоснабжения в реальном времени и их использования при моделировании.

Проведена опытная эксплуатация программной макромодели. Результаты опытной эксплуатации показали, что макромодель обладает достаточной для практического использования точностью моделирования и может быть использована для решения задач по выбору оптимальных вариантов функционирования систем теплоснабжения по критерию максимума выработки электрической энергии на электрических станциях (минимума потребления природного газа) с учетом режимов отпуска тепловой энергии в зависимости от фактических гидравлических режимов работы тепловых сетей.

На основе использования разработанной макромодели осуществлен расчет и выбор вариантов оптимальных режимов теплоснабжения потребителей с точки зрения максимума выработки электроэнергии на электрических станциях и снижения потребления природного газа на источниках тепла.

3. В рамках выполнения НИР разработано методическое, алгоритмическое и программное обеспечение многоуровневого нормирования и прогнозирования электропотребления ПАО «ММК», предназначенное для построения оптимальных сбалансированных оценок электропотребления по уровням производственных участков и комбинатов 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 ПАО «ММК».

Создано методическое, алгоритмическое и программное обеспечение нормирования удельного расхода и прогнозирования расхода электроэнергии ПАО «ММК», с использованием которого на основе реальных данных по выработке продукции и электропотреблению производственными подразделениями ПАО «ММК», проведены опытные расчеты. Расчеты показали, что при использовании разработанных алгоритмов возможно снижение общей ошибки прогнозирования потребления электроэнергии на величину не менее 0,5%. Методические материалы и программное

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

Ведущий специалист НТЦ ПАО «ММК»  И.К. Кучерова

Зам. начальника ЦЭСТ  В.Н. Михайловский

Проректор по научной работе
ФГАОУ ВО ЮУрГУ (НИУ), д.т.н.  А.В. Коржов

Профессор кафедры автоматике
и управления
ФГАОУ ВО ЮУрГУ (НИУ), д.т.н.  Л.С. Казаринов

Профессор кафедры автоматике
и управления
ФГАОУ ВО ЮУрГУ (НИУ), д.т.н.  Д.А. Шнайдер

УТВЕРЖДАЮ

Главный энергетик

ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»



Ю.П. Журавлев

« 24 » 11 2015 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы
к.т.н., доцента кафедры автоматики и управления ФГБОУ ВПО ЮУрГУ (НИУ)
Барбасовой Татьяны Александровны:

**«Методология интегрированного планирования и управления
процессами энергосбережения в теплоэнергетическом комплексе
металлургического предприятия»**

представленной на соискание ученой степени
доктора технических наук

Комиссия в составе представителей ОАО «ММК»: председателя – начальника Центра энергосберегающих технологий (ЦЭСТ) Седельникова С.В., 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 Барбасовой Т.А. на тему: «Методология интегрированного планирования и управления процессами энергосбережения в теплоэнергетическом комплексе металлургического предприятия».

Комиссия отмечает, что основные результаты диссертационной работы были получены Барбасовой Т.А. в рамках выполнения НИР по договорам между ОАО «ММК» и ФГБОУ ВПО ЮУрГУ (НИУ) в качестве ведущего исполнителя НИР:

- «Системное моделирование и оптимизация режимов отпуска и потребления ТЭР теплоэнергетического комплекса ОАО «ММК», 2013 г.
- «Разработка алгоритма «Нормирование удельного расхода и прогнозирование расхода электроэнергии ОАО «ММК», 2013 г.
- «Многосвязная система оптимального регулирования экономичности потребления топлива для энергетических котлов электрических станций», 2010-2011 г.г.

Комиссия утвердила следующие выводы и результаты работы:

1. Разработана автоматизированная система мониторинга и регулирования экономичности использования топлива в паровых котлах с оптимальной коррекцией подачи общего воздуха по критерию достижения максимального КПД брутто котла на основе использования методов оптимальной цифровой фильтрации. Разработана и установлена на ЦЭС система автоматического управления режимами работы парового котла ст.№5 в зависимости от текущей подачи топлива (доменный, природный газ) по

критерию максимума текущего КПД. В ходе испытаний АСУ в апреле 2014 г., согласно протокола Заседания технического совета ОАО «ММК» №5 от 02.06.2014 г. и письма №УГЭ-1058-23 от 5.05.2014 «Об испытаниях системы автоматического управления на котле №5 ЦЭС» выявлено:

- расход доменного газа при тепловом режиме котла без химического недожога вырос соответственно в базовом режиме на 8% (5,7 тыс. м³/ч), на главном регуляторе на 5 % (3,8 тыс. м³/ч);

- расход природного газа при тепловом режиме котла без химического недожога снизился соответственно в базовом режиме на 11% (0,73 тыс. м³/ч), на главном регуляторе на 7% (0,47 тыс. м³/ч).

В результате экономия природного газа на 1 котле ст.№5 составила 2 558 тыс.м³ в год.

2. Разработана расчетная схема системы теплоснабжения промплощадки ОАО «ММК», учитывающая 5 источников, около 140 потребителей, 180 км тепловых сетей, и расчетная схема системы пароснабжения промплощадки ОАО «ММК», учитывающая 9 источников, около 50 потребителей, 300 км паровых сетей. На основе расчетных схем разработаны программные макромодели систем паро- и теплоснабжения потребителей промплощадки ОАО «ММК», а также осуществлена их идентификация (настройка параметров) на основе фактических данных эксплуатации. Разработанная версия программной макромодели систем паро- и теплоснабжения содержит более 41 тыс. функциональных блоков. Выполнена стыковка программных моделей с существующей АСДУ УГЭ для получения данных фактической эксплуатации систем паро- и теплоснабжения в реальном времени и их использования при моделировании.

Проведена опытная эксплуатация программной макромодели. Результаты опытной эксплуатации показали, что макромодель обладает достаточной для практического использования точностью моделирования и может быть использована для решения задач по выбору оптимальных вариантов функционирования систем теплоснабжения по критерию максимума выработки электрической энергии на электрических станциях (минимума потребления природного газа) с учетом режимов отпуска тепловой энергии в зависимости от фактических гидравлических режимов работы тепловых сетей.

На основе использования разработанной макромодели осуществлен расчет и выбор вариантов оптимальных режимов теплоснабжения потребителей с точки зрения максимума выработки электроэнергии на электрических станциях и снижения потребления природного газа на источниках тепла.

3. 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 комбинатов 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».

Создано методическое, алгоритмическое и программное обеспечение нормирования удельного расхода и прогнозирования расхода электроэнергии ОАО «ММК», с использованием которого на основе реальных данных по выработке продукции и электропотреблению производственными подразделениями ОАО «ММК», проведены опытные расчеты. Расчеты показали, что при использовании разработанных алгоритмов возможно снижение общей ошибки прогнозирования потребления электроэнергии на величину не менее 0,5%. Методические материалы и программное обеспечение передано в лабораторию анализа и управления энергоресурсами ЦЭСТ и в отдел нормирования энергоресурсов ТУ.

Начальник ЦЭСТ ОАО «ММК»

С.В. Седельников

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

Общество с ограниченной ответственностью научно-производственное предприятие «Политех-Автоматика» (ОГРН 1037402555563, ИНН 7448057997)
Адрес: 454007, г. Челябинск, переулок Артиллерийский, д. 6, помещение 1

Протокол №39
внеочередного общего собрания участников
Общества с ограниченной ответственностью
научно-производственное предприятие «Политех-Автоматика»

г. Челябинск

10 октября 2020 г.

Вид общего собрания - внеочередное.

Форма проведения общего собрания - совместное присутствие участников.

Дата проведения общего собрания - 10 октября 2020 г.

Место проведения общего собрания: 454007, г. Челябинск, переулок Артиллерийский, д. 6, помещение 1.

Время начала регистрации участников общего собрания: 09 часов 00 минут.

Время окончания регистрации участников общего собрания: 09 часов 15 минут.

Время открытия общего собрания: 09 часов 20 минут.

Время закрытия общего собрания: 10 часов 00 минут.

Присутствовали участники общества с ограниченной ответственностью научно-производственное предприятие «Политех-Автоматика» (далее Общество):

1. Шишкин Михаил Владимирович, паспорт гражданина РФ 75 03 015217 выдан УВД по Ленинскому району г. Челябинска 16.12.2002 г., владеющий 50 % доли в уставном капитале Общества – лично.
2. Баданина Вера Львовна, паспорт гражданина РФ 72 12 196760 выдан Отделом УФМС России в Калининском районе города Челябинска 21.01.2013 г., владеющей 50 % доли в уставном капитале Общества – лично,

а также Барбасова Татьяна Александровна, паспорт гражданина РФ 75 00 №554194 выдан УВД Курчатовского района г. Челябинска 28.11.1997г.

Количество голосов, принадлежащих присутствующим на общем собрании участникам Общества, составляет 100% от общего числа голосов участников Общества. Кворум для решения поставленных на повестку дня вопросов имеется. Общее собрание правомочно.

Открыл собрание: Шишкин Михаил Владимирович.

Секретарь собрания - Баданина Вера Львовна.

Повестка дня:

1. Избрание председателя общего собрания.
2. Рассмотрение вопроса об утверждении справки о внедрении результатов диссертационной работы Барбасовой Татьяны Александровны по теме «Методы и модели автоматизированного ресурсосберегающего управления энергометаллургическим технологическим комплексом», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук.

Слушали:

По первому вопросу повестки дня

Слушали Баданину Веру Львовну, которая предложила избрать председателем собрания Шишкина Михаила Владимировича.

Голосовали: «за» - 100 % голосов.

Постановили: избрать председателем собрания Шишкина Михаила Владимировича, секретарем собрания Баданину Веру Львовну; лица производящие подсчет голосов: Шишкин Михаил Владимирович, Баданина Вера Львовна.

По второму вопросу повестки дня

Прослушали доклад Барбасовой Т.А. С предложением об утверждении справки о внедрении результатов диссертационной работы Барбасовой Т.А. по теме «Методы и модели автоматизированного ресурсосберегающего управления энергOMETаллургическим технологическим комплексом», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук, выступила Баданина В.Л.

Голосовали: «за» - 100 % голосов.

Постановили:

Утвердить справку о внедрении результатов диссертационной работы Барбасовой Татьяны Александровны по теме «Методы и модели автоматизированного ресурсосберегающего управления энергOMETаллургическим технологическим комплексом», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук.

Подписи участников:

Шишкин Михаил Владимирович _____

Баданина Вера Львовна _____

СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационной работы

Барбасовой Татьяны Александровны:

«Методы и модели автоматизированного ресурсосберегающего управления энергометаллургическим технологическим комплексом»,
представленной на соискание ученой степени
доктора технических наук

Основные результаты диссертационной работы «Методы и модели автоматизированного ресурсосберегающего управления энергометаллургическим технологическим комплексом» были получены мной, Барбасовой Т.А., в рамках выполнения следующих научно-исследовательских работ по договорам между ПАО «ММК» и ООО «НПП Политех-Автоматика», в которых я исполняла обязанности руководителя договоров:

– «Модельно-упреждающее управление эффективностью доменного производства на основе передовых информационных технологий» (2014-2015 г.г.)

– «Разработка и внедрение интегрированной информационно-управляющей системы сквозного моделирования и оптимизации агло-коксо-доменного производства» (2018-2019 г.г.).

Согласно подписанного акта внедрения результатов научно-исследовательских работ по договору № 234112 от 11.01.2018г. с ООО НПП «Политех-Автоматика» по теме: «Разработка и внедрение интегрированной информационно-управляющей системы сквозного моделирования и оптимизации агло-коксо-доменного производства» разработано информационное, алгоритмическое и программное обеспечение интегрированной информационно-управляющей системы сквозного моделирования и оптимизации агло-коксо-доменного производства (далее, ИИУС АКД). Разработана методическое, алгоритмическое, программное обеспечение и эксплуатационная документация. Выполнена комплексная наладка, проведены испытания и внедрена в эксплуатацию разработанная ИИУС АКД.

Разработана и внедрена в эксплуатацию ИИУС АКД, обеспечивающая:

– считывание данных из АСУ ТП ДП №6, 9, 10, включая расход кокса и железорудного сырья в подачу, параметры газодутьевого режима (содержание кислорода в дутье, расход природного газа, температура дутья, давление колошникового газа, температура газов по радиусу и др.);

- считывание данных из MES ДЦ, включая характеристики чугуна, шлака, кокса, металлошихты, газов, объемы выпуска чугуна и шлака ДП№6, 9, 10;
- выполнение расчетов факторных коэффициентов влияния технологических параметров на расход кокса и производство чугуна на ДП№6, 9, 10 для заданного интервала времени;
- выполнение расчетов оптимальных значений расхода природного газа, содержания кислорода в дутье, расхода холодного дутья по одному из следующих критериев: максимум производства чугуна, минимум удельного расхода кокса;
- выполнение расчетов поправок к расходу кокса в подачу в режиме советчика мастеру ДП№6 в режиме реального времени;
- выполнение расчетов оптимальных значений качества кокса (M10), доли агломерата в ЖРС, по одному из следующих критериев: максимум производства чугуна, минимум удельного расхода кокса, минимум себестоимости производства чугуна/стали (для ДП№9,10,6).

Экономический эффект на уровне оперативного управления достигается за счет снижения кремния в чугуне при стабилизации теплового состояния доменной печи (оценивается по показателю среднеквадратического отклонения содержания кремния в чугуне в результате применения рекомендательного сервиса мастерами доменной печи составляет 60 тыс. руб. в сутки за счет снижения удельного расхода кокса на 0,4 кг/т., что за год оценивается до 19 млн. руб. с коэффициентом простоя 0,1.

Потенциальный экономический эффект от использования интегрированной информационно-управляющей системы сквозного моделирования и оптимизации агло-коксо-доменного производства (ИИУС АКД) для ДП-6, 9, 10 составляет 196,5 млн. руб. за счет расчета оптимальных значений технологических параметров кокса для повышения эффективности работы доменных печей.

Акт внедрения научно-исследовательских работ, выполненных под научным руководством Барбасовой Т.А., и результаты расчетов приведены в приложении.

Учредитель

ООО «НПП Политех-Автоматика», к.т.н.



В.Л. Баданина

Учредитель

ООО «НПП Политех-Автоматика»

М.В. Шишкин

Расчет экономического эффекта

Цель: снижение себестоимости производства чугуна в доменной печи ПАО "ММК" с учетом оценки влияния на себестоимость производства стали на основе разработки и внедрения интегрированной информационно-управляющей системы сквозного моделирования и оптимизации агло-коксо-доменного производства. 1 очередь: доменная печь №6,9,10.

Экономический эффект на уровне оперативного управления достигается за счет снижения содержания кремния в чугуне при стабилизации температурного состояния доменной печи (оценивается по показателю среднеквадратического отклонения (СКО) содержания кремния в чугуне) в результате применения разработанного в рамках НИОКР рекомендательного сервиса для мастеров доменных печей по подаче кокса.

Методика расчета экономического эффекта

- 1) Экономический эффект рассчитывается на основе сравнения работы печей в базовом и отчетном периодах в сопоставимых условиях (количество дней работы в нормальном (стационарном) режиме в базовом периоде равно количеству дней в нормальном режиме в отчетном периоде для каждой печи) при значении производства чугуна и удельного расхода в базовом периоде.
- 2) Критерии стационарного режима, принятые в расчете:
 - критерий 1 - задержка выпуска. Если время начала выпуска превышает время окончания предыдущего выпуска более чем на 60 минут;
 - критерий 2 - подготовка к останову (0,5 суток для ДП6, 1 сутки для ДП9,10); останов менее 36 часов и выход на режим (в течение 3 суток);
 - критерий 3 - подготовка к останову (0,5 суток для ДП6, 1 сутки для ДП9,10); останов более 36 часов и выход на режим (в течение 7 суток);
 - критерий 4 - на интервале трех часов перед выпуском зарегистрировано давление горючего дутья меньше 2 атм.
- Из расчета исключаются значения УРК и производства чугуна в дни, когда стационарный режим наблюдался 12 и более часов.
- 3) Базовый период - период до внедрения системы в опытно-промышленную эксплуатацию:
 - для ДП6 - с 13.09.2019 по 20.10.2019 за исключением нестационарного режима работы ДП (37 дней всего, 16 дней стационарный режим, 21 день нестационарный режим);
 - для ДП9 - с 27.09.2019 по 20.10.2019 за исключением нестационарного режима работы ДП (24 дня всего, 4 дня стационарный режим, 20 дней нестационарный режим);
 - для ДП10 - с 25.09.2019 по 20.10.2019 за исключением нестационарного режима работы ДП (25 дней всего, 8 дней стационарный режим, 17 дней нестационарный режим);
- 4) Отчетный период - период после внедрения системы в опытно-промышленную эксплуатацию:
 - для ДП6 - с 21.10.2019 по 20.11.2019 за исключением нестационарного режима работы ДП (31 день всего, 10 дней стационарный режим, 21 день нестационарный режим);
 - для ДП9 - с 21.10.2019 по 20.11.2019 за исключением нестационарного режима работы ДП (31 день всего, 11 дней стационарный режим, 20 дней нестационарный режим);
 - для ДП10 - с 21.10.2019 по 20.11.2019 за исключением нестационарного режима работы ДП (31 день всего, 14 дней стационарный режим, 17 дней нестационарный режим);

Наименование	Ед. изм.	Ключевые технические и экономические показатели									
		ДП-6		ДП-9		ДП-10		ДП-10		Итого по ДП-6,9,10	
		Базз	Факт	Базз	Факт	Базз	Факт	Базз	Факт	Базз	Факт
Содержание Si в чугуне	%	13.09.2019 - 20.10.2019	21.10.2019 - 20.11.2019	27.09.2019 - 20.10.2019	21.10.2019 - 20.11.2019	26.09.2019 - 20.10.2019	21.10.2019 - 20.11.2019	26.09.2019 - 20.10.2019	21.10.2019 - 20.11.2019	Δ	Δ
Стабильность содержания Si в чугуне (СКО)	%	0,80	0,72	-0,08	0,73	0,70	0,69	-0,07	0,76	0,70	-0,038
Производство чугуна	т/сутки	0,151	0,125	-0,027	0,118	0,113	0,097	-0,038	0,133	0,110	-0,023
Изменение производства*	т/сутки	3 252		4,2	4 669		4 924		12 845		
Расход кокса (кокс сухой окисловый)	кг/т	411,15			401,98		410,05		407,39		
Изменение расхода кокса*	кг/т			-0,5			-0,2		16 417,11		
Себестоимость чугуна (сентябрь 2019г.)	руб/т								17 115,10		
Цена кокса (сентябрь 2019г.)	руб/т								10 656,94		
Изменение себестоимости за счет изменения производства	руб./сутки								-8 319		
Изменение себестоимости за счет изменения расхода кокса	руб./сутки								-51 744		
Экономический эффект (-убыток, + прибыль)	руб./сутки								60 063		

*Доля влияния результатов внедрения НИОКР принята 20%

Учредитель
ООО «НПП Политех-Автоматика»

Учредитель
ООО «НПП Политех-Автоматика»

В.Л. Балакина

М.В. Шишкин



ПРИЛОЖЕНИЕ В.

Исходные данные для проведения расчетов энергоемкости

В таблице В.1 приведены исходные данные использования электроэнергии ТЭЦ ПАО «ММК» (в период с января 2006 г. по декабрь 2012 г.).

В таблице В.2 приведены исходные данные использования электроэнергии ЦЭС ПАО «ММК» (в период с января 2006 г. по декабрь 2012 г.).

В таблице В.3 приведены исходные данные использования электроэнергии ПВЭС ПАО «ММК» (в период с января 2006 г. по декабрь 2012 г.).

Таблица В.1

Исходные данные использования электроэнергии ТЭЦ ПАО «ММК»
(в период с января 2006 г. по декабрь 2012 г.)

Дата	Выработка продукции	Полный фактич. расход э/э, кВт·ч	Выработка продукции	Полный фактич. расход э/э, кВт·ч	Выработка продукции	Полный фактич. расход э/э, кВт·ч	Выработка продукции	Полный фактич. расход э/э, кВт·ч	Выработка продукции	Полный фактич. расход э/э, кВт·ч	Суммарный по цеху полный фактич. расход э/э, кВт·ч
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Выработка э/э, кВт·ч		Тепло с острым паром ККП, ГКал		Тепло с горячей водой, ГКал		Химводоочистка, м ³ воды		Береговая насосная, тыс. м ³ т/воды		
Январь 2006	235 199 000	12 027 032	96 228	2 122 612	283 735	10 675 787	96 069	107 068	13 842	13 842	29 161 354
Февраль 2006	217 888 400	11 527 790	84 197	1 914 424	241 829	9 332 979	86 496	96 327	12 030	12 030	25 948 724
Март 2006	241 477 200	12 923 828	91 600	2 056 267	228 063	9 012 283	92 825	103 491	13 748	13 748	27 943 452
Апрель 2006	231 523 084	13 635 001	90 596	2 073 335	159 479	6 536 565	84 312	94 247	13 825	13 825	26 468 086
Май 2006	224 653 615	14 433 289	89 980	2 005 127	83 043	3 506 651	98 869	109 654	13 850	13 850	24 353 414
Июнь 2006	232 100 000	15 271 160	101 838	2 132 126	64 373	2 420 482	86 818	96 703	13 452	13 452	23 373 744
Июль 2006	230 428 400	15 856 273	92 484	2 017 461	63 485	2 356 523	61 880	69 882	14 096	14 096	25 613 987
Август 2006	219 706 800	14 921 953	94 731	2 078 792	63 121	2 596 469	51 276	57 100	14 234	14 234	24 807 328
Сентябрь 2006	236 752 400	16 335 541	116 668	2 578 510	82 134	3 722 364	69 319	76 785	13 671	13 671	27 667 852
Октябрь 2006	244 441 600	14 853 784	120 574	2 740 870	166 416	7 056 746	151 904	168 966	14 863	14 863	30 722 152

Ноябрь 2006	230 074 800	12 513 870	119 205	2 696 003	214 059	8 689 815	111 156	123 229	13 740	13 740	29 295 099
Декабрь 2006	238 805 600	12 829 323	98 414	2 258 153	244 105	9 656 466	105 057	116 670	14 034	14 034	29 457 202
Январь 2007	241 452 800	12 724 640	97 203	2 174 299	254 091	9 701 154	103 186	116 093	14 428	14 428	29 416 041
Февраль 2007	213 792 800	11 439 547	88 088	2 024 286	239 646	8 989 670	110 400	123 443	12 333	12 333	26 149 729
Март 2007	240 047 200	12 981 518	94 614	2 192 655	246 435	9 549 046	129 486	146 151	13 567	13 567	29 462 447
Апрель 2007	208 164 800	11 860 736	94 047	2 232 447	155 209	6 933 404	112 544	116 772	14 075	14 075	25 584 714

Продолжение таблицы В.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Май 2007	216 830 400	13 939 062	121 153	2 751 336	81 653	3 664 475	94 312	104 740	13 888	13 888	24 347 317
Июнь 2007	235 621 200	15 427 607	118 422	2 540 768	66 164	2 628 027	102 371	114 951	13 382	13 382	24 736 796
Июль 2007	247 938 000	16 626 796	122 960	2 577 774	53 589	2 140 969	82 381	114 529	15 170	15 170	25 640 491
Август 2007	203 146 400	13 790 275	98 588	2 092 773	58 273	2 354 785	62 352	69 353	15 076	15 076	21 872 874
Сентябрь 2007	197 292 400	12 979 047	96 884	2 051 831	75 665	2 874 698	56 509	63 117	14 474	14 474	21 310 890
Октябрь 2007	235 113 600	14 577 831	106 614	2 359 785	158 219	5 887 758	138 814	155 862	12 715	12 715	26 767 199
Ноябрь 2007	238 572 800	12 818 239	101 821	2 240 673	217 780	8 810 356	132 134	147 343	12 294	12 294	27 469 931
Декабрь 2007	240 256 000	12 663 405	104 446	2 335 908	259 907	10 299 970	78 707	87 310	14 116	14 116	29 436 200
Январь 2008	237 845 600	12 371 796	104 576	2 265 763	270 041	10 485 985	69 751	78 153	14 001	14 001	29 487 800
Февраль 2008	226 839 200	11 811 006	87 127	1 936 096	250 452	10 083 151	91 852	91 792	13 095	13 095	27 667 909
Март 2008	217 440 000	11 930 665	87 011	1 988 330	230 539	10 107 284	85 045	92 951	14 081	14 081	27 878 943
Апрель 2008	222 954 800	12 782 783	87 440	1 937 901	137 345	6 201 516	87 808	97 921	13 813	13 813	24 597 796
Май 2008	218 304 400	13 695 998	106 271	2 318 036	79 882	3 763 379	96 445	107 852	14 051	14 051	23 266 481
Июнь 2008	235 086 400	15 363 741	102 897	2 150 611	59 919	2 424 750	88 320	99 243	13 010	13 010	23 266 080
Июль 2008	198 525 600	12 469 194	107 784	1 984 907	66 826	2 350 271	58 436	65 338	13 809	13 809	20 514 208
Август 2008	200 882 400	12 486 602	120 389	2 249 526	63 469	2 355 386	76 619	85 616	14 977	14 977	21 186 471
Сентябрь 2008	188 020 800	11 412 416	130 016	2 354 786	80 385	2 968 104	88 282	98 849	14 697	14 697	21 575 316
Октябрь 2008	203 594 400	11 941 123	125 424	2 522 582	155 759	6 372 933	117 286	131 533	13 333	13 333	26 535 257

Ноябрь 2008	203 760 800	12 351 481	84 824	1 896 336	193 485	8 074 709	97 992	109 275	8 202	8 202	26 013 586
Декабрь 2008	207 870 800	11 947 084	73 961	1 591 869	239 283	9 330 221	101 298	113 133	6 330	6 330	25 545 556
Январь 2009	241 211 200	13 153 908	90 481	1 955 797	259 595	9 921 999	94 304	106 009	8 936	8 936	28 900 473
Февраль 2009	217 959 200	11 123 258	95 442	1 984 112	224 713	8 499 869	77 833	86 632	10 922	10 922	26 237 958
Март 2009	241 846 400	12 868 706	106 248	2 240 346	223 819	8 787 160	96 968	108 703	11 906	11 906	28 359 054
Апрель 2009	232 776 800	13 867 229	117 126	2 627 188	145 750	6 644 643	101 305	114 042	13 713	13 713	27 479 070

Продолжение таблицы В.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Май 2009	208 961 200	13 287 722	130 080	2 769 667	79 381	3 601 631	82 523	92 382	15 732	15 732	24 247 809
Июнь 2009	197 400 800	13 392 845	124 170	2 643 069	59 114	2 458 479	101 100	113 610	16 680	16 680	23 081 746
Июль 2009	217 376 800	13 777 716	138 183	2 836 133	51 093	2 213 223	69 522	77 922	21 635	21 635	24 198 695
Август 2009	217 864 000	14 272 374	128 120	2 766 706	18 560	793 108	35 404	39 633	22 012	22 012	23 375 401
Сентябрь 2009	220 524 600	14 030 560	133 848	2 841 536	70 790	2 700 444	66 259	74 486	19 377	19 377	24 238 295
Октябрь 2009	245 430 000	14 892 260	137 562	3 029 071	138 898	5 685 292	109 649	122 846	18 575	18 575	28 276 980
Ноябрь 2009	233 368 600	12 389 983	115 395	2 515 798	201 542	7 871 528	107 357	119 850	17 655	17 655	27 258 977
Декабрь 2009	243 264 400	12 015 404	119 679	2 516 318	257 378	9 600 244	128 357	138 472	18 706	18 706	28 941 367
Январь 2010	238 081 200	11 532 991	143 469	2 999 784	278 330	10 555 273	122 826	137 661	21 038	21 038	29 983 109
Февраль 2010	213 999 200	10 932 478	106 826	2 323 803	237 384	9 183 955	90 086	100 810	16 510	16 510	27 139 748
Март 2010	233 838 600	12 038 595	139 565	2 966 072	228 554	8 961 882	122 301	136 770	18 808	18 808	28 079 797
Апрель 2010	207 611 800	11 020 124	129 195	2 774 464	133 429	5 770 772	110 520	124 158	21 396	21 396	24 800 428
Май 2010	222 050 800	13 846 867	121 017	2 648 746	65 035	3 132 561	82 817	92 632	20 939	20 939	24 883 045
Июнь 2010	208 930 000	12 861 495	115 000	2 250 699	51 538	1 914 587	107 956	120 633	21 401	21 401	22 296 767
Июль 2010	197 630 600	12 872 107	114 110	2 298 424	59 620	2 167 275	87 057	97 799	21 247	21 247	22 322 440
Август 2010	206 519 600	14 084 255	136 200	2 881 022	54 658	2 240 090	75 997	84 386	22 186	22 186	24 542 817
Сентябрь 2010	210 294 000	13 579 492	137 800	2 948 952	67 760	2 831 930	77 628	86 596	21 435	21 435	24 581 105
Октябрь 2010	230 556 200	12 543 395	139 214	2 821 715	149 062	6 010 171	120 538	135 158	22 129	22 129	26 771 773

Ноябрь 2010	235 686 800	12 040 667	144 244	3 025 756	170 548	6 922 512	141 533	158 171	21 355	21 355	27 157 557
Декабрь 2010	239 944 200	11 968 230	144 226	2 933 839	240 869	8 890 365	149 911	167 516	21 194	21 194	28 929 756
Январь 2011	232 761 400	11 679 640	156 842	3 238 915	263 480	10 209 088	153 124	171 588	19 857	19 857	30 122 532
Февраль 2011	212 570 800	10 767 814	125 671	2 736 633	217 802	9 058 075	130 045	145 162	19 040	19 040	27 339 131
Март 2011	238 894 600	12 636 640	139 405	3 049 447	212 770	8 466 081	111 071	124 830	21 054	21 054	29 331 682
Апрель 2011	203 704 000	11 046 442	147 500	3 198 063	126 220	5 809 502	110 642	123 436	20 228	20 228	25 325 385

Продолжение таблицы В.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Май 2011	214 610 200	13 447 643	153 981	3 330 594	65 409	3 380 807	110 905	123 794	21 835	21 835	25 678 381
Июнь 2011	200 239 000	13 159 376	146 495	3 131 377	57 748	2 180 258	53 916	60 156	20 480	20 480	23 547 021
Июль 2011	203 965 000	13 923 827	153 907	3 356 158	48 781	2 031 736	56 649	63 181	22 117	22 117	24 391 406
Август 2011	220 094 400	14 661 318	143 420	3 046 708	53 496	2 384 432	64 063	71 647	22 106	22 106	25 343 877
Сентябрь 2011	225 599 000	14 259 492	136 532	2 878 595	68 100	3 073 596	65 907	74 048	21 389	21 389	25 507 086
Октябрь 2011	236 220 200	13 855 374	147 332	3 161 733	153 040	6 231 476	103 794	116 192	22 057	22 057	28 787 897
Ноябрь 2011	230 612 800	12 147 479	140 461	3 038 690	210 864	8 614 438	104 394	116 715	19 599	19 599	28 919 873
Декабрь 2011	240 760 200	12 328 012	156 588	3 302 249	239 148	9 390 814	92 179	103 108	20 271	20 271	30 029 843
Январь 2012	241 731 800	12 121 783	148 035	3 107 577	243 560	9 509 811	86 785	97 213	20 556	20 556	29 829 086
Февраль 2012	214 266 400	10 868 242	147 592	3 125 587	239 694	9 236 800	89 256	99 610	19 047	19 047	28 094 616
Март 2012	222 501 800	11 487 179	147 033	3 168 784	207 186	8 335 580	95 316	106 366	21 354	21 354	28 274 646
Апрель 2012	189 262 000	11 055 036	142 185	3 165 333	94 159	4 501 896	85 978	96 242	20 432	20 432	23 837 562
Май 2012	208 169 200	13 936 444	159 052	3 449 063	42 355	2 235 972	95 254	106 590	21 019	21 019	24 887 554
Июнь 2012	202 722 200	13 225 751	151 770	3 290 065	50 504	2 376 985	61 068	68 309	21 306	21 306	24 109 477
Июль 2012	217 193 000	15 433 172	150 642	3 286 875	49 273	2 318 295	78 138	87 500	21 405	21 405	26 306 917
Август 2012	237 402 000	16 492 962	151 000	3 227 570	50 060	2 325 886	66 435	74 137	21 389	21 389	27 342 126
Сентябрь 2012	227 797 600	15 299 932	148 000	3 160 409	43 283	2 054 353	52 772	59 026	20 808	20 808	25 416 075
Октябрь 2012	238 695 600	14 213 481	137 000	2 883 850	134 696	6 447 749	128 334	143 540	21 317	21 317	28 867 217

Ноябрь 2012	210 274 600	11 411 272	150 670	3 413 614	180 280	8 005 150	129 494	144 795	20 619	20 619	27 776 620
Декабрь 2012	239 518 000	12 020 927	124 621	2 568 170	260 589	10 000 575	126 609	141 679	21 316	21 316	30 212 291

Таблица В.2

Исходные данные использования электроэнергии ЦЭС ПАО «ММК»
(в период с января 2006 г. по декабрь 2012 г.)

Дата	Выработка продукции	Полный фактич. расход э/э, кВт·ч	Выработка продукции	Полный фактич. расход э/э, кВт·ч	Выработка продукции	Полный фактич. расход э/э, кВт·ч	Выработка продукции	Полный фактич. расход э/э, кВт·ч	Суммарный по цеху полный фактич. расход э/э, кВт·ч
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Дата	Выработка э/э, кВт·ч		Тепло с горячей водой, ГКал		Тепло с паром, ГКал		Химводоочистка, м³ отпущен. ХОВ		
Январь 2006	145 992 400	8 984 631	250 340	5 566 112	37 062	574 467	236 974	289 507	15 977 612
Февраль 2006	139 625 400	8 747 347	205 511	4 631 561	27 936	433 013	196 105	218 235	14 567 231
Март 2006	149 227 780	9 528 812	189 324	4 162 491	31 489	447 140	215 162	340 755	15 019 337
Апрель 2006	136 010 500	8 380 954	133 745	3 453 061	22 809	285 108	224 006	380 541	13 034 039
Май 2006	148 124 450	9 032 230	53 780	2 121 624	20 286	275 892	207 142	369 946	12 386 029
Июнь 2006	129 302 320	8 351 271	38 950	1 356 447	14 520	200 377	181 789	284 639	10 748 285
Июль 2006	149 193 120	9 232 589	44 716	1 461 505	28 292	325 360	150 731	261 800	11 764 362
Август 2006	146 675 090	8 903 801	39 546	1 250 106	32 838	525 406	155 193	268 314	11 383 013
Сентябрь 2006	147 474 130	8 870 298	49 941	1 263 393	23 955	359 325	159 840	270 064	12 882 078
Октябрь 2006	152 368 490	9 547 146	138 193	3 235 576	27 355	465 035	213 315	366 584	15 110 678

Ноябрь 2006	148 812 800	8 457 202	177 752	4 829 743	39 899	518 690	228 782	376 601	15 207 204
Декабрь 2006	154 020 250	9 570 462	197 456	4 400 596	28 088	393 228	250 300	400 982	15 795 245
Январь 2007	154 256 780	9 040 608	199 086	4 959 846	28 435	480 553	239 874	418 263	15 914 257
Февраль 2007	137 879 790	7 996 226	201 776	4 497 828	31 670	462 375	208 274	366 212	14 239 624
Март 2007	152 186 540	8 915 839	195 770	4 700 670	28 956	423 909	213 137	338 726	15 411 429
Апрель 2007	147 213 800	8 643 740	134 001	3 470 775	21 967	263 598	199 082	292 400	13 665 721

Продолжение таблицы В.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Май 2007	137 535 230	8 488 290	62 929	1 472 851	22 438	269 260	215 654	287 817	11 551 849
Июнь 2007	140 277 350	8 688 010	48 704	1 566 833	33 659	403 910	181 901	294 917	12 664 645
Июль 2007	136 689 570	8 041 863	49 052	1 649 335	36 516	602 519	174 142	277 929	11 947 265
Август 2007	148 964 770	8 759 670	43 493	1 218 575	25 650	397 569	180 280	298 809	12 150 684
Сентябрь 2007	136 416 140	7 980 273	54 610	1 632 722	24 350	365 246	172 673	286 338	11 434 050
Октябрь 2007	148 477 190	8 700 916	124 854	2 876 835	34 701	541 337	208 236	352 550	13 828 043
Ноябрь 2007	146 958 850	8 108 758	170 773	4 606 489	35 204	492 854	227 407	364 456	14 559 484
Декабрь 2007	154 638 100	8 971 746	212 358	4 607 246	44 888	583 540	229 848	372 599	16 551 698
Январь 2008	153 385 450	8 818 806	222 623	5 218 936	40 471	558 496	232 235	<u>371 298</u>	16 264 969
Февраль 2008	144 844 320	8 459 767	195 173	4 507 078	46 692	635 015	224 156	362 505	15 036 988
Март 2008	152 816 420	9 400 151	164 293	4 325 546	42 523	608 079	250 199	357 182	15 707 471
Апрель 2008	137 958 720	8 623 730	115 418	3 424 736	35 325	408 358	224 831	369 664	13 674 106
Май 2008	142 542 050	8 578 673	56 319	1 960 333	38 012	494 151	211 809	338 643	12 197 871
Июнь 2008	142 853 250	8 430 654	43 895	1 289 378	51 969	779 538	156 520	251 907	11 603 849
Июль 2008	147 113 210	8 712 060	37 938	1 403 887	53 064	1 034 738	133 347	<u>211 105</u>	12 263 105
Август 2008	146 361 500	8 874 989	44 494	1 293 228	34 166	546 660	187 776	305 251	11 909 396
Сентябрь 2008	139 971 410	8 306 928	59 525	1 830 844	35 056	497 798	142 731	244 125	11 750 642
Октябрь 2008	145 706 450	8 582 126	122 540	3 034 554	31 966	521 050	205 496	346 020	13 410 836

Ноябрь 2008	124 855 490	6 541 500	134 963	4 000 356	47 211	637 354	187 827	314 021	12 279 336
Декабрь 2008	125 157 490	6 979 730	174 692	3 786 211	53 428	694 564	161 333	256 208	12 469 931
Январь 2009	148 504 110	7 870 554	191 761	4 291 183	64 365	836 745	167 232	266 184	14 171 467
Февраль 2009	119 742 850	7 070 815	163 850	3 752 219	46 772	608 036	156 672	263 844	12 497 821
Март 2009	129 449 590	8 011 416	167 352	3 905 772	55 900	763 039	201 472	322 867	13 879 245
Апрель 2009	124 902 250	8 152 605	129 606	3 290 032	39 512	446 481	189 935	311 619	13 059 781

Продолжение таблицы В.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Май 2009	123 871 730	7 805 775	47 395	1 402 283	41 488	477 110	180 217	345 743	10 917 556
Июль 2009	120 849 460	7 799 725	37 938	1 316 231	53 064	582 698	133 347	<u>225 068</u>	10 726 882
Август 2009	117 315 950	7 706 589	37 467	1 175 068	36 492	554 675	112 557	199 575	10 421 027
Сентябрь 2009	124 935 780	7 985 017	50 337	1 326 124	31 141	426 625	122 972	172 086	10 735 576
Октябрь 2009	123 443 240	8 425 466	114 843	2 888 253	40 735	590 656	146 419	215 066	12 944 598
Ноябрь 2009	129 047 850	7 491 230	163 121	4 326 496	39 287	510 729	156 102	251 891	13 441 063
Декабрь 2009	142 067 080	8 240 518	215 578	4 607 482	50 651	607 807	157 120	273 839	14 640 223
Январь 2010	150 377 270	8 319 334	219 657	5 156 512	55 224	662 690	114 441	205 500	15 304 770
Февраль 2010	136 757 480	8 017 911	186 717	4 160 954	58 979	707 749	104 454	165 529	13 904 660
Март 2010	146 746 980	8 365 415	181 117	4 469 968	64 520	890 370	133 480	221 749	14 867 191
Апрель 2010	131 703 990	8 080 877	120 875	3 087 030	62 497	749 964	129 466	224 122	12 976 231
Май 2010	146 584 860	8 557 024	50 842	1 965 390	51 048	704 458	168 496	281 713	12 394 202
Июнь 2010	142 890 700	8 520 011	38 838	1 229 768	70 089	1 156 475	130 228	194 646	11 921 259
Июль 2010	140 043 590	8 819 921	37 015	1 238 584	40 997	705 154	148 051	255 551	11 840 097
Август 2010	140 762 750	8 878 283	40 173	1 192 469	35 404	561 156	170 371	290 758	11 739 105
Сентябрь 2010	124 647 010	7 939 462	51 347	1 337 497	27 298	384 907	145 814	234 176	10 638 879
Ноябрь 2010	146 961 300	8 648 410	136 640	4 133 291	19 583	330 946	164 754	286 211	14 284 634
Декабрь 2010	153 898 940	9 540 053	192 839	4 180 972	42 910	553 544	127 129	221 755	15 405 249

Январь 2011	150 743 480	8 847 820	222 684	5 198 333	46 009	593 515	138 283	264 314	15 771 489
Февраль 2011	139 634 590	8 424 832	185 398	4 411 394	38 049	491 977	111 545	188 014	14 330 539
Март 2011	153 871 710	9 101 306	182 625	4 469 993	49 936	664 150	119 123	206 734	15 353 108
Апрель 2011	139 557 070	8 989 674	129 296	3 572 727	29 899	420 084	139 944	224 525	14 051 320
Май 2011	147 084 400	8 796 719	45 010	1 844 308	19 788	247 349	110 945	194 763	11 957 877
Июнь 2011	140 749 590	8 673 931	39 978	1 369 083	21 462	356 276	67 389	143 008	11 374 172

Продолжение таблицы В.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Июль 2011	129 467 140	8 145 145	40 862	1 369 273	30 329	448 870	76 975	107 561	10 851 513
Август 2011	126 735 550	8 008 835	44 397	1 407 848	29 351	434 694	64 900	140 367	10 788 696
Сентябрь 2011	122 378 600	7 934 489	46 358	1 252 624	42 128	667 721	62 937	114 892	10 743 016
Октябрь 2011	132 057 490	8 128 083	123 514	3 181 823	94 528	1 498 271	107 267	189 286	13 800 458
Ноябрь 2011	126 659 200	7 277 065	169 874	4 042 556	89 073	1 247 017	152 215	246 895	13 590 453
Декабрь 2011	152 404 570	8 891 556	208 053	4 539 498	71 751	932 768	218 971	362 252	15 625 245
Январь 2012	151 275 010	8 841 786	217 719	4 923 933	74 164	889 970	271 438	352 695	15 889 351
Февраль 2012	141 071 230	8 105 336	213 915	4 641 947	74 443	893 312	177 128	288 686	14 731 304
Март 2012	151 388 200	8 962 460	179 179	4 285 274	63 640	859 136	138 389	248 994	15 221 296
Апрель 2012	142 684 010	9 130 066	94 281	2 434 618	35 531	500 274	173 331	285 076	13 198 758
Май 2012	138 309 990	8 580 744	36 723	1 705 173	25 919	323 984	184 177	308 413	11 753 212
Июнь 2012	119 078 460	8 194 548	38 765	1 409 643	30 677	452 485	140 300	217 185	10 958 271
Июль 2012	125 936 710	8 382 181	37 518	1 238 088	33 402	492 676	166 074	276 972	11 115 569
Август 2012	132 864 920	8 240 557	43 236	1 295 366	20 417	351 170	157 706	262 878	10 940 786
Сентябрь 2012	143 903 950	8 775 945	47 439	1 292 038	30 524	438 627	132 163	214 803	11 551 901
Октябрь 2012	149 884 240	9 303 886	118 359	2 911 939	33 139	476 210	117 364	201 082	13 774 194
Ноябрь 2012	145 593 400	8 524 050	149 581	4 131 342	59 057	836 831	124 007	211 791	14 534 585
Декабрь 2012	154 124 760	8 939 654	208 681	4 490 021	80 830	1 204 363	131 922	227 224	15 721 857

Таблица В.3

Исходные данные использования электроэнергии ПВЭС ПАО «ММК»
(в период с января 2006 г. по декабрь 2012 г.)

Дата	Выработка продукции	Полный фактич. расход э/э, кВт·ч	Выработка продукции	Полный фактич. расход э/э, кВт·ч	Выработка продукции	Полный фактич. расход э/э, кВт·ч	Выработка продукции	Полный фактич. расход э/э, кВт·ч	Суммарный по ПВЭС полный фактич. расход э/э, кВт·ч
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Дата	Выработка э/э, кВт·ч		Выработка дутья, м³		Тепло отпущенное, ГКал		Собственные нужды котельной		
Январь 2006	72 603 360	2 632 527	1 929 336	3 692 686	244 109	3 374 798	14 221	196 607	11 579 646
Февраль 2006	71 931 920	2 526 613	1 772 755	3 290 562	211 079	2 815 333	12 313	164 222	10 424 763
Март 2006	69 592 760	2 427 912	2 079 085	3 916 869	209 633	2 864 028	18 863	257 705	10 675 320
Апрель 2006	73 685 320	2 575 375	2 030 956	3 721 508	184 681	2 471 797	28 413	380 281	10 949 844
Май 2006	76 334 320	2 755 396	2 103 257	4 007 649	173 405	2 405 314	19 689	273 102	11 247 990
Июнь 2006	70 559 960	2 598 998	2 085 020	4 023 883	156 661	2 199 363	18 789	263 772	10 761 598
Июль 2006	69 534 840	2 650 617	2 172 618	4 151 767	139 884	1 943 739	12 124	168 466	10 264 345
Август 2006	64 456 200	2 544 028	2 162 565	4 163 076	143 620	1 986 600	7 047	97 475	10 283 461
Сентябрь 2006	71 914 280	2 611 577	2 051 732	3 900 533	189 693	2 619 403	6 117	84 473	10 743 686
Октябрь 2006	78 190 720	2 791 525	1 889 353	3 481 057	193 689	2 606 173	15 128	203 549	10 679 883

Ноябрь 2006	73 574 440	2 579 097	1 911 972	3 523 122	205 877	2 700 594	15 352	201 380	10 756 600
Декабрь 2006	79 007 560	2 776 319	1 840 781	3 415 964	227 638	3 027 987	21 938	291 817	10 674 167
Январь 2007	77 533 040	2 724 733	1 943 458	3 542 714	229 888	3 022 756	14 860	195 395	10 622 421
Февраль 2007	71 710 560	2 566 422	1 641 024	3 074 101	207 266	2 808 191	13 917	188 552	9 713 100
Март 2007	75 844 120	2 736 858	1 875 871	3 550 957	225 057	3 062 708	16 252	221 172	10 658 874
Апрель 2007	74 664 280	2 742 791	1 912 041	3 604 055	180 250	2 465 113	14 601	199 683	10 109 771

Продолжение таблицы В.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Май 2007	78 530 680	2 864 654	1 922 252	3 631 916	165 682	2 280 944	14 739	202 909	10 125 566
Июнь 2007	61 719 080	2 374 872	2 014 042	3 749 398	149 568	2 016 112	10 712	144 392	9 568 404
Июль 2007	63 706 200	2 567 299	2 219 525	4 191 525	131 158	1 797 967	6 454	88 471	9 734 136
Август 2007	72 667 400	2 641 919	2 217 435	4 164 242	165 229	2 223 271	9 331	125 554	10 278 968
Сентябрь 2007	75 373 000	2 691 979	2 094 007	3 926 967	170 555	2 289 178	13 023	174 796	10 253 839
Октябрь 2007	79 681 560	2 843 877	1 885 156	3 545 253	177 791	2 389 092	15 040	202 102	10 158 435
Ноябрь 2007	74 978 600	2 649 887	1 750 718	3 232 442	213 415	2 841 466	18 311	243 800	10 220 639
Декабрь 2007	77 918 480	2 674 458	1 869 774	3 374 378	225 366	2 897 837	23 673	304 397	10 598 132
Январь 2008	79 742 560	2 731 994	1 960 919	3 542 166	225 258	2 917 280	21 459	<u>277 907</u>	11 034 707
Февраль 2008	65 640 560	2 271 481	1 943 799	3 513 102	192 476	2 482 767	21 377	275 747	9 831 743
Март 2008	77 735 520	2 609 969	2 166 838	3 840 710	202 177	2 522 143	21 791	271 838	10 559 357
Апрель 2008	65 766 960	2 350 903	2 083 593	3 883 707	164 384	2 184 721	19 166	254 718	9 707 821
Май 2008	70 783 040	2 710 682	2 236 578	4 302 184	164 465	2 243 525	4 509	61 509	10 349 977
Июнь 2008	64 809 040	2 544 950	1 991 016	3 792 906	143 360	1 966 693	11 728	160 885	9 349 195
Июль 2008	60 636 240	2 616 387	1 827 612	3 681 296	137 395	2 013 988	25 086	<u>367 721</u>	9 762 050
Август 2008	63 232 640	2 597 927	2 131 634	4 189 508	146 243	2 083 650	27 367	389 924	10 542 316
Сентябрь 2008	67 217 560	2 673 566	1 972 045	3 875 428	158 459	2 257 583	9 222	131 380	10 227 605
Октябрь 2008	74 146 040	3 085 824	1 503 499	3 103 454	178 763	2 732 882	14 259	217 992	10 484 472

Ноябрь 2008	47 579 080	2 159 002	838 363	1 907 052	176 828	2 985 657	16 139	272 495	8 257 923
Декабрь 2008	48 497 240	2 133 106	821 371	1 857 576	193 425	3 221 592	17 337	288 763	8 072 051
Январь 2009	65 298 680	2 823 189	1 038 660	2 202 721	192 240	2 978 068	31 951	494 970	9 740 144
Февраль 2009	70 091 560	2 842 194	1 256 696	2 615 303	170 921	2 597 490	19 627	298 265	9 585 597
Март 2009	73 710 240	2 823 938	1 464 801	2 915 610	192 359	2 781 095	17 923	259 133	10 085 196
Апрель 2009	74 770 960	2 768 436	1 513 518	2 901 090	178 652	2 471 340	18 289	252 999	9 683 858

Продолжение таблицы В.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Май 2009	73 952 320	2 791 466	1 547 605	3 020 443	169 670	2 398 775	14 465	204 506	9 837 212
Июнь 2009	70 819 520	2 680 478	1 747 623	3 412 752	154 569	2 186 207	14 119	<u>199 695</u>	9 876 521
Июль 2009	48 506 680	1 928 615	1 898 460	3 794 610	133 692	1 979 046	12 128	<u>179 532</u>	8 610 609
Август 2009	62 790 480	2 780 201	1 924 973	3 907 039	127 972	1 915 426	17 527	262 330	10 239 902
Сентябрь 2009	61 030 520	2 573 892	1 845 695	3 696 154	146 293	2 155 941	10 619	156 498	10 019 102
Октябрь 2009	64 893 560	2 678 909	1 841 492	3 709 244	191 636	2 837 415	12 531	185 538	10 873 378
Ноябрь 2009	67 180 360	2 742 594	1 699 727	3 434 872	197 999	2 833 771	13 856	197 866	10 862 345
Декабрь 2009	76 085 680	3 033 134	1 709 788	3 494 599	225 992	3 376 260	12 442	185 887	11 628 490
Январь 2010	76 069 280	2 834 085	1 630 108	3 189 623	248 260	3 516 421	11 844	167 756	11 291 405
Февраль 2010	67 207 040	2 668 463	1 769 746	3 597 073	208 561	3 096 201	13 365	198 416	10 960 009
Март 2010	70 660 440	2 922 455	2 044 730	4 137 050	197 813	2 926 402	17 031	251 952	11 804 886
Апрель 2010	67 385 400	2 807 186	2 049 785	4 163 457	172 152	2 560 454	13 138	195 406	11 098 055
Май 2010	63 191 360	2 722 453	2 025 524	4 134 763	147 898	2 191 023	12 337	182 771	10 299 005
Июнь 2010	46 640 600	1 978 859	1 887 485	3 745 908	113 189	1 615 790	17 006	242 762	8 464 985
Июль 2010	47 952 040	1 945 344	1 959 799	4 014 315	137 472	2 033 984	13 521	200 059	9 395 711
Август 2010	55 078 160	2 327 030	2 084 381	4 327 801	155 863	2 360 077	10 624	160 870	10 268 299
Сентябрь 2010	63 870 880	2 579 141	1 956 394	3 905 209	180 964	2 583 894	7 758	110 768	10 395 255
Октябрь 2010	67 499 280	2 674 291	1 860 298	3 653 202	205 640	2 901 496	9 908	139 794	10 687 858

Ноябрь 2010	63 720 280	2 508 233	1 940 718	3 752 733	225 201	3 152 702	12 965	181 507	10 844 133
Декабрь 2010	72 864 200	2 776 376	1 924 441	3 669 258	245 406	3 396 163	17 397	240 756	11 808 817
Январь 2011	72 188 360	2 733 492	1 978 526	3 773 947	230 760	3 214 192	19 367	269 762	11 234 880
Февраль 2011	50 461 600	1 963 476	1 748 705	3 507 702	195 331	2 836 684	17 585	255 383	9 835 631
Март 2011	54 835 360	2 321 282	1 959 042	4 155 641	206 712	3 222 004	18 219	283 979	11 513 450
Апрель 2011	67 536 640	2 655 098	1 954 461	3 868 356	182 144	2 644 222	22 954	333 223	10 704 552

Продолжение таблицы В.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Май 2011	50 435 560	1 977 140	1 882 123	3 891 433	189 546	2 866 239	14 586	220 568	10 095 327
Июнь 2011	64 685 960	2 587 480	2 086 923	4 212 890	165 344	2 453 277	28 152	417 701	10 746 940
Июль 2011	63 768 360	2 601 720	2 108 143	4 238 048	163 274	2 414 907	30 801	455 569	10 777 783
Август 2011	63 984 600	2 680 915	2 181 025	4 503 073	171 086	2 592 350	21 922	332 170	11 151 837
Сентябрь 2011	64 911 240	2 655 644	2 090 260	4 212 711	166 685	2 457 421	18 481	272 464	10 728 077
Октябрь 2011	56 862 440	2 411 305	1 994 930	4 079 432	140 281	2 026 267	24 096	348 054	9 675 292
Ноябрь 2011	59 289 080	2 654 745	1 866 035	3 917 588	177 338	2 727 446	16 117	247 884	10 442 006
Декабрь 2011	67 327 640	2 830 535	1 835 234	3 822 005	215 222	3 263 436	26 002	394 274	11 807 544
Январь 2012	60 665 200	2 443 137	2 045 604	4 197 899	218 308	3 254 533	21 830	325 442	11 384 005
Февраль 2012	45 747 320	1 826 479	1 961 286	4 006 719	182 153	2 715 223	18 157	270 652	9 907 460
Март 2012	54 232 400	2 163 527	2 094 393	4 273 566	199 881	2 968 651	17 420	258 725	10 850 796
Апрель 2012	68 756 560	2 768 635	2 103 479	4 309 442	179 854	2 689 523	16 662	249 159	11 186 528
Май 2012	72 937 960	3 021 364	2 117 678	4 440 746	175 825	2 726 866	12 289	190 588	11 481 399
Июнь 2012	68 468 800	2 887 140	2 233 923	4 621 180	144 234	2 214 033	16 752	257 153	11 167 333
Июль 2012	68 800 000	2 949 773	2 314 639	4 759 177	136 478	2 092 027	16 315	250 090	11 030 396
Август 2012	70 169 480	2 990 142	2 279 845	4 701 668	154 293	2 348 557	10 487	159 635	11 195 985
Сентябрь 2012	62 172 360	2 649 437	2 187 657	4 573 534	146 033	2 284 829	22 887	358 094	10 821 127
Октябрь 2012	60 177 200	2 533 189	2 150 379	4 441 407	178 451	2 731 942	17 503	267 958	10 975 593

Ноябрь 2012	63 893 160	2 620 941	2 080 587	4 204 324	181 459	2 717 207	16 821	251 881	10 805 953
Декабрь 2012	61 396 160	2 506 656	2 052 732	4 167 217	181 135	2 723 802	11 534	173 435	10 404 949