

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)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Челябинск 2021

Диссертационная работа выполнена на кафедре «Автоматика и управление» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)».

Научный консультант – **Казаринов Лев Сергеевич**, доктор технических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы РФ, зав. каф. «Автоматика и управление».

Официальные оппоненты: **Султангузин Ильдар Айдарович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Промышленные теплоэнергетические системы» ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва;
Лившиц Михаил Юрьевич, доктор технических наук, профессор, зав. каф. «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов» ФГБОУ ВО «СамГТУ», г. Самара;
Логунова Оксана Сергеевна, доктор технических наук, профессор, зав. каф. «Вычислительная техника и программирование» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск.

Ведущая организация – ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Защита состоится «28» июня 2021 г., в 14.00 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.298.03 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» по адресу: 454080, г. Челябинск, проспект имени В. И. Ленина, 76, зал заседания ученого совета (ауд. 1007/гл. корпус).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» и на сайте ЮУрГУ (www.susu.ru).

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим выслать по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», Ученый совет, тел. (351) 267-91-23, факс (351) 267-93-69.

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.298.03
д.т.н., доцент



А.В. Голлай

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 Wuppertal Öko-Institut'a 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 сбереженных 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, 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 – индексированных 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.), две монографии «Автоматизированные системы управления в энергосбережении» (228 стр.) и «Автоматизированные системы управления энергоэффективным освещением» (208 стр.).

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, изложенных на 255 страницах машинописного текста, содержит 108 рисунков, 18 таблиц, список литературы, включающего 148 наименований и 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проводится анализ проблем и задач повышения энергетической эффективности металлургических предприятий. Дается обзор литературы, формулируются цели и задачи исследования. В постановке целей и задач исследования отмечается, что работа направлена на решение комплексной проблемы металлургического производства – снижения потребления первичных энергетических ресурсов таких как природный газ и коксующиеся угли.

Данная проблема решается на основе комплекса задач, укрупненная диаграмма связей которых представлена на рисунке 1.

непосредственном участии автора в плане научного обеспечения и руководства работами.

Во второй главе проводится системный анализ целей и задач энергосбережения в энергометаллургических технологических комплексах с использованием концепции потоков сбереженных ресурсов.

С этой целью в работе для анализа интегрального эффекта энергосбережения рассматриваются совместно двойственные потоки: потоки потребления реальных энергетических ресурсов и потоки виртуальных сэкономленных энергетических ресурсов. Данный подход позволяет проводить анализ системного эффекта от проведения энергосберегающих мероприятий 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.

В технологической структуре управления энергосбережением металлургического предприятия себестоимость электроэнергии (ЭЭ), вырабатываемая на станции-регуляторе 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.

При исследовании энергетических характеристик блока котлоагрегатов, работающих на смеси ПГ и ДГ, решается задача максимизации потребления ДГ при снижении паропроизводительности на отдельных энергетических котлах. При перераспределении паровой нагрузки между котлами снижается себестоимость выработанной ЭЭ за счет увеличения потребления ДГ и снижения потребления ПГ.

Поэтому для достижения интегрального эффекта энергосбережения необходимо рассматривать совместно целую совокупность задач. Например, повышение выработки ЭЭ, снижение себестоимости ЭЭ, снижение себестоимости выработки стали, снижение потребления ПГ, снижение потребления кокса, увеличение потребления ДГ и др.

Системный анализ данной структуры двойственных потоков энергетических ресурсов для данного энерготехнологического комплекса позволил сформулировать граф целей и задач энергосбережения, приведенный на рисунке 3.

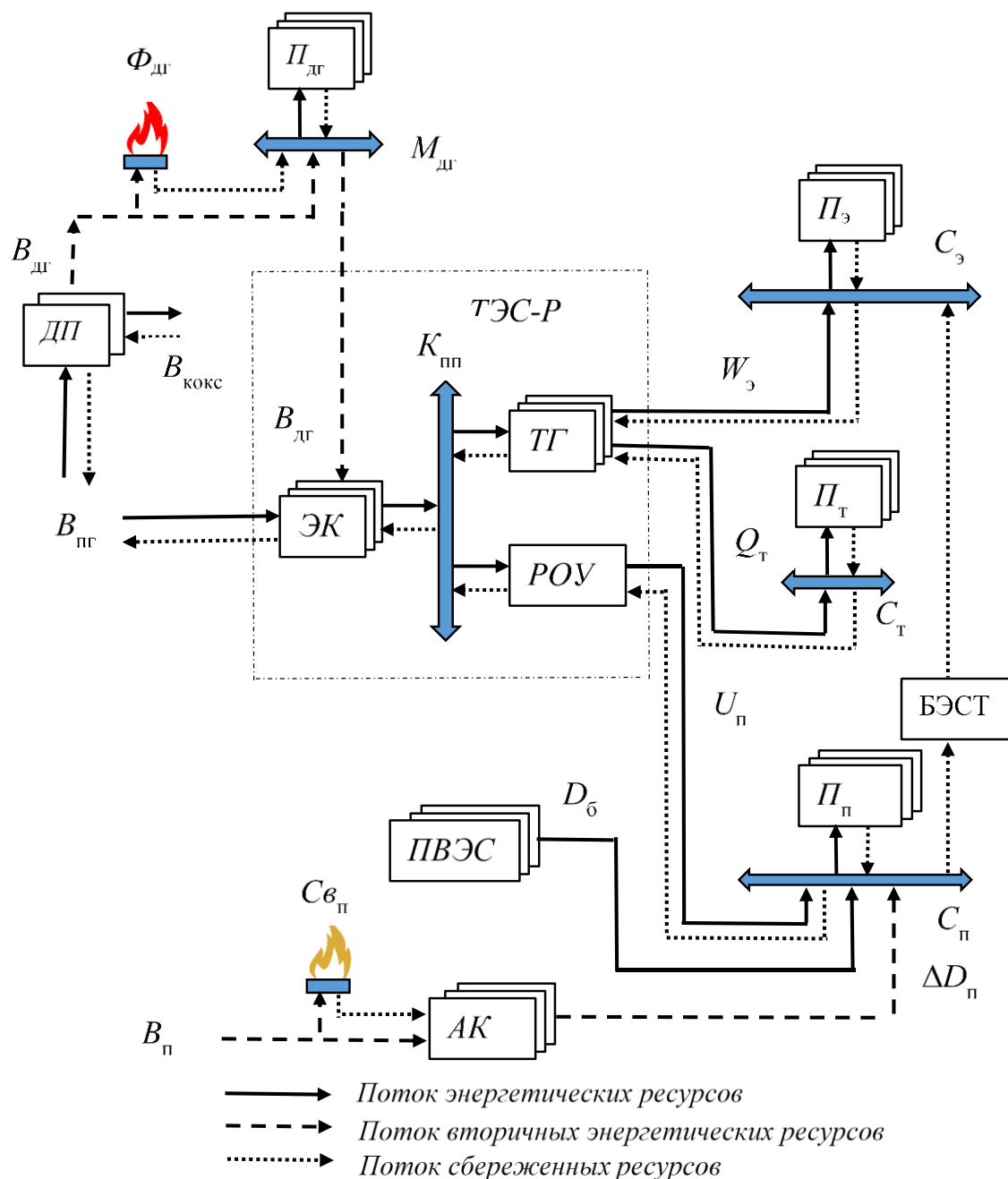


Рис. 2. Структура энергетического комплекса

ЭК – блок энергетических котлов, ТГ – блок турбогенераторов $K_{пп}$ – коллектор перегретого пара, $B_{пг}$ – расход природного газа, $B_{дг}$ – расход доменного газа, $B_{кокса}$ – расход кокса, ДП – доменная печь $W_э$ – выработка электрической энергии, $Q_т$ – тепловая энергия в теплофикационной воде, РОУ – редукционно-охладительное устройство, $U_п$ – отбор пара на технологические нужды, $M_{дг}$ – магистраль доменного газа, $\Phi_{дг}$ – свеча доменного газа, $\Pi_{дг}$ – потребители доменного газа, $C_э$ – электрическая сеть, $C_т$ – теплофикационная сеть, $C_п$ – паровая сеть предприятия, $\Pi_э$, $\Pi_т$, $\Pi_п$ – соответствующие потребители электрической, тепловой энергии и пара, АК – паровые аккумуляторы, $C_{вп}$ – сброса избыточного пара в атмосферу, основным источником пара на технологические нужды $D_б$ 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. Поэтому 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 котлами станции-регулятора перегретого пара. Данная задача в диаграмме связей задач повышения энергетической эффективности теплоэнергетического комплекса задач представляет собой промежуточную цель. Повышение коэффициента полезного действия котлов приводит к снижению объема потребления природного газа.

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_{пг}**). Кроме того, изменение потребления ПГ влияет на повышение коэффициента полезного действия ЭК.

Выработка перегретого пара имеет в общем случае нелинейную экстремальную зависимость от величины потребления ДГ и может характеризоваться как ростом (+), так и снижением (–) потребления ДГ.

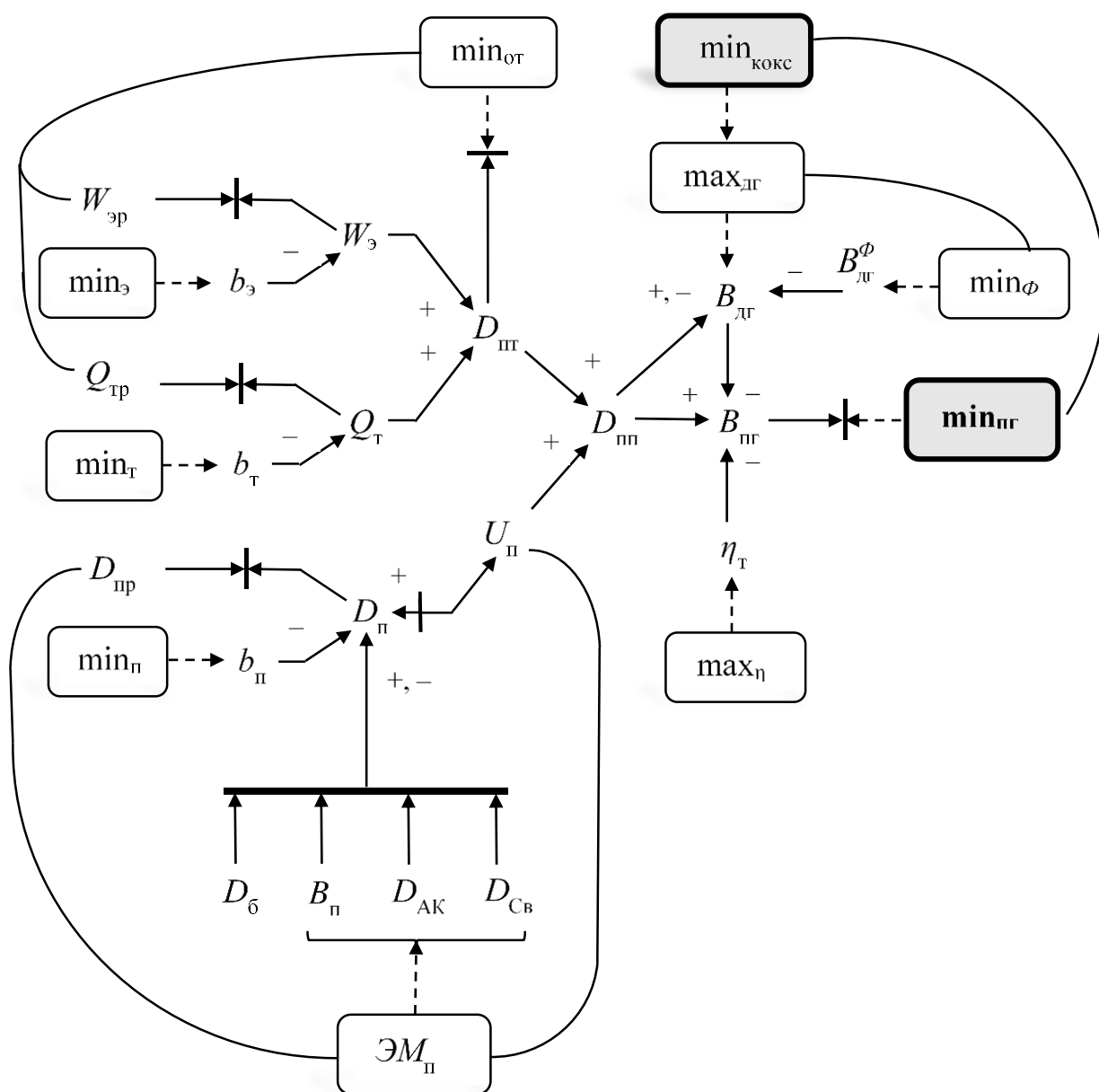
Для решения рассмотренного комплекса задач разработана диаграмма связи задач повышения эффективности металлургического комплекса (рис.3).

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.

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 $B_{п}$, используются паровые аккумуляторы. Регулирующий поток пара обеспечивается станцией-регулятором. Сброс избыточного пара осуществляется через свечи в атмосферу. Все рассмотренные задачи взаимосвязаны и описывают обобщенную систему энергоменеджмента паровой сети.



→← – знак равенства (баланса) значений стрелок справа и слева

Рис. 3. Диаграмма связи задач повышения эффективности энергометаллургического промышленного комплекса

$B_{\text{пг}}$ – объем потребляемого природного газа, $D_{\text{пп}}$ – 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 $Q_{\text{тп}}$, пара $D_{\text{пр}}$ оказывают существенное влияние задачи **min₃**, **min_т**, **min_п** снижения энергоемкостей b_3 , $b_{\text{т}}$, $b_{\text{п}}$ 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_6 ; $D_{\text{ак}}$ – 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.

На рисунке 3 приведены все представленные задачи, обеспечивающие интегрированное управления эффективностью теплоэнергетического 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 комплекса.

В третьей главе рассмотрена задача снижения потребления природного газа на ресурсосберегающей станции за счет оптимизации режимов и утилизации вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) металлургического производства, а именно за счет сжигания доменного газа.

Актуальной задачей является организация **экстремального управления по КПД котла**. Для повышения точности управления по КПД в работе предлагается следующая модель идентификации динамических характеристик котла:

$$\Delta\eta_{\text{бр}}(t) = a_0 + a_1\Delta Q_{\text{вх}}(t - \tau) + a_{12}(\Delta Q_{\text{вх}}(t - \tau))^2 + a_2\Delta P_{\text{в}}(t - \tau) + a_{22}(\Delta P_{\text{в}}(t - \tau))^2, \quad (1)$$

Здесь $\Delta\eta_{\text{бр}}(t)$ – 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

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

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

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 (2) имеет вид:

$$h_i(t_k) = \sum_{l=0}^n x_{i,k-l}(t_{k-l} - \tau_{\text{min}})w_{i,k-l}, \quad i=1,2, \quad (3)$$

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

Для того, чтобы определить влияние факторов $x_i(t)$ на выходной сигнал $\Delta y(t) = \Delta\eta_{\text{бр}}(t)$ 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:

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

Φ_m – экспоненциальный фильтр порядка m .

Искомое решение находится на текущий шаг k :

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

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

Структура ресурсосберегающей станции (рис. 4) представляет собой теплоэнергетическую станцию (ТЭС) с поперечными связями по пару.

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

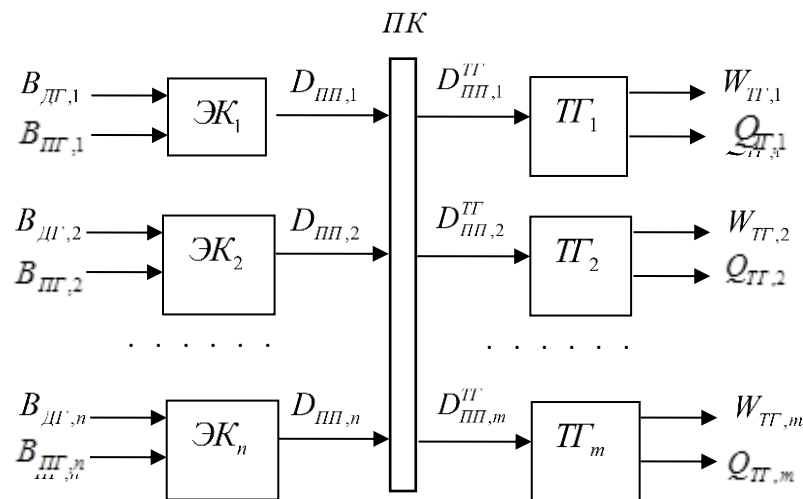


Рис. 5. Схема теплоэнергетической станции
($ЭК_i$ - энергетические котлоагрегаты, $ТГ_i$ - турбогенераторы,
 $ПК$ - паровой коллектор)

В работе рассматривается задачу **оптимизации распределения энергетических нагрузок турбогенераторов** для достижения эффекта сбережения природного газа. Типовая энергетическая характеристика турбогенератора представлена на рис. 6.

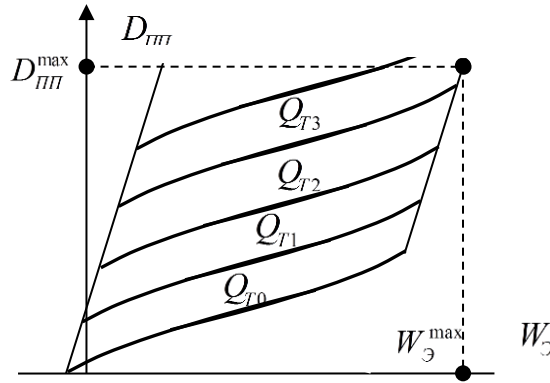


Рис. 6. Типовая энергетическая характеристика турбогенератора
 $W_э$ - вырабатываемая электрическая мощность, Q_{Ti} - тепловая
 мощность, D_{III} - потребление перегретого пара

При идентификации энергетических характеристик турбин используются зависимости:

$$\left. \begin{aligned} D_{III,i}^{TT} &= a_{0,i} + a_{1,i}W_{э,i} + a_{2,i}Q_{T,i} + < \text{поправки} >; \\ D_{III,i}^{TT} &\geq b_{0,i} + b_{1,i}W_{э,i} + b_{2,i}Q_{T,i} + < \text{поправки} >; \\ W_{э,i} &\leq W_{э,i}^{\max}, \quad D_{III,i}^{TT} \leq D_{III,i}^{TT,\max}; \quad i=1, 2, \dots \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

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

Обобщенные зависимости для параллельно работающих турбин приведены ниже:

$$\left. \begin{aligned} W_{э,0} &= \sum_{i=1}^m W_{э,i}; \\ Q_{T,0} &= \sum_{i=1}^m Q_{T,i}; \\ D_{III,0}^{TT} &= \sum_{i=1}^m D_{III,i}^{TT}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Ставится задача: найти оптимальные значения электрической $W_{э,i}$ и тепловой $Q_{T,i}$ нагрузок турбогенераторов по критерию минимума суммарного потребления пара $D_{III,0}^{TT}$ при заданных значениях мощности суммарной выработки электрической $W_{э,0}$ и тепловой $Q_{T,0}$ энергии. Данная задача является типовой задачей линейного программирования. Для конкретного примера: оптимизации распределения нагрузок турбин ЦЭС ОАО "ММК", в результате решения рассмотренной задачи потребление пара блоком турбогенераторов снизилось на 11,7% с 1700 т/ч до 1500 т/ч.

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

Типовая энергетическая характеристика котлоагрегата приведена на рис.7.

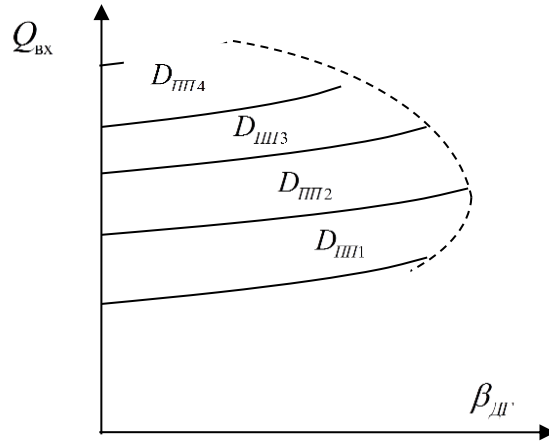


Рис. 7. Энергетическая характеристика котла, работающего на смеси доменного и природного газа

$Q_{ВХ}$ - количество тепловой энергии, поступающей в котел с топливом; $\beta_{ДГ}$ - доля доменного газа в топливной смеси с природным газом: $\beta_{ДГ} = B_{ДГ} / B_{ПГ}$; $D_{ПП}$ - паровая нагрузка котла

При идентификации энергетических характеристик котлоагрегатов используются зависимости:

$$\left. \begin{aligned} Q_{ВХ,i} &= a_{0,i} + a_{1,i} D_{ПП,i} + a_{2,i} \beta_{ДГ,i} + a_{3,i} D_{ПП,i}^2 + a_{4,i} \beta_{ДГ,i} D_{ПП,i} + < поправки >; \\ \beta_{ДГ,i} &\leq \begin{cases} \beta_{ДГ,i}^{\max} + b_{1,i} (Q_{ВХ,i} - Q_{m,i})^2, & \text{при } Q_{ВХ,i} - Q_{m,i} \geq 0, \\ \beta_{ДГ,i}^{\max} + b_{2,i} (Q_{ВХ,i} - Q_{m,i})^2, & \text{при } Q_{ВХ,i} - Q_{m,i} < 0; \end{cases} \\ D_{ПП,i} &\leq D_{ПП,i}^{\max}; \quad i=1, 2, \dots \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

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

Обобщенные зависимости для параллельно работающих котлоагрегатов приведены ниже:

$$\left. \begin{aligned} D_{ПП,0} &= \sum_{i=1}^n D_{ПП,i}; \\ Q_{ВХ,0} &= \sum_{i=1}^m Q_{ВХ,i}; \\ B_{ПГ,0} &= \sum_{i=1}^m B_{ПГ,i}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Решение задачи минимизации потребления покупного природного газа за счет увеличения потребления вторичного энергетического ресурса - доменного газа получаем на основе использования выражения при ограничениях (6), (7):

$$Q_{ВХ,i} = B_{ПГ,i} Q_{н}^{ПГ} + B_{ДГ,i} Q_{н}^{ДГ} = B_{ПГ,i} (Q_{н}^{ПГ} + \beta_{ДГ,i} Q_{н}^{ДГ}), \quad (8)$$

где $B_{ПГ,i}$, $B_{ДГ,i}$, $Q_{н}^{ПГ}$, $Q_{н}^{ДГ}$ - расходы и калорийности природного и доменного газов. Для конкретного примера: оптимизации распределения нагрузок котлов ЦЭС

ПАО "ММК", в результате решения задачи расход природного газа блоком котлоагрегатов снизилось на 6,6%.

В четвертой главе рассматривается задача интегрированного планирования и управления рассматриваемым теплоэнергетическим комплексом – снижение потребления технологического пара.

Особенностью функционирования сетей тепло- и пароснабжения металлургических предприятий 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.

Модели указанных сетей могут быть построены с использованием различных подходов. Широкий класс моделей, ориентированных на анализ режимов сложных сетей тепло- и пароснабжения, в настоящее время строится на основе точных физических моделей, определяемых на основании базовых физических законов. Подобные модели используют большой объем исходной информации, получение которой требует больших затрат на проведение обследований сетей. Кроме того, физические модели ориентированы на анализ деталей процессов и непосредственно не отражают причинно-следственных связей параметров сетей, что затрудняет их использование для оперативного управления сетями в целом и повышает время принятия управляющих решений.

Вследствие сказанного перспективным подходом для оперативного управления сложными сетями является применение динамического моделирования, основанного на использовании сигнально-ориентированных моделей, отражающих причинно-следственные связи параметров сетей. Однако для таких сложных технических систем, которыми являются крупномасштабные сети тепло- и пароснабжения, построение точных динамических моделей встречает серьезные трудности, связанные с практически необозримой их сложностью. Выход ищется в многоуровневом подходе к построению моделей на основе использования макромоделей. При этом возникают дополнительные трудности, обусловленные межуровневыми противоречиями, необходимостью использования обратных динамических операторов с потерей «физичности» представлений и др. Все это приводит к некорректным постановкам задач моделирования, неоднозначности решений и слабой сходимости итерационных процессов решения задач. Поэтому разработка адекватных динамических макромоделей сложных разветвленных паровых сетей и сетей теплоснабжения для оперативного управления режимами работы сетей представляет собой нетривиальную задачу.

Одним из центральных элементов паровой сети является паровой аккумулятор. На рис. 8 приведена макро модель управления процессами заряда-разряда парового аккумулятора. Здесь приняты следующие обозначения: 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; P_{A0} – максимальное допустимое

значение давления пара в паровом аккумуляторе; ΔP_A – разность P_{A0} и P_A ; Reg – ПИ регулятор; $G_{св}$ – расход пара, проходящего через свечу; $G_{ОКГ}$ – расход пара от котлов типа ОКГ.

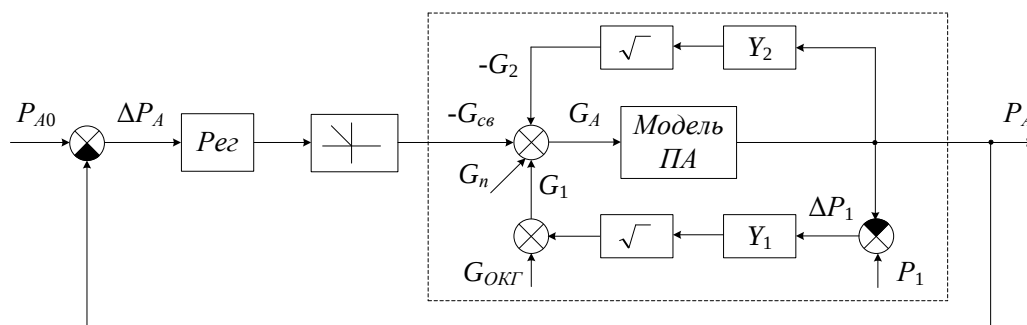


Рис. 8. Структурная схема макромоделли управления зарядно-разрядными процессами парового аккумулятора

В рассматриваемой системе управления регулируемым параметром является давление пара в аккумуляторе. Заряд парового аккумулятора происходит от источников пара. Ограничение давления пара производится с помощью регулятора Reg .

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. 9 приведен видеокادر макро модели системы паро- и теплоснабжения. На рис. 9 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.

Макро модель 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.

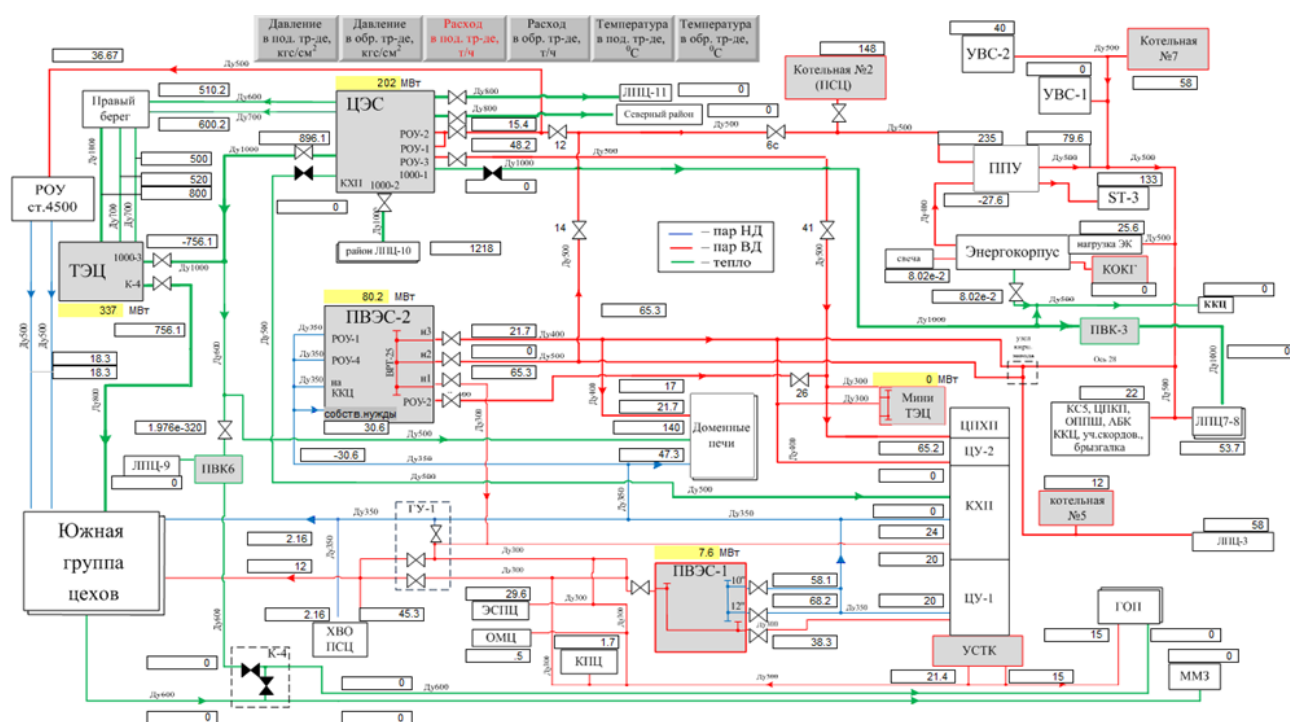


Рис. 9. Видеокадр макромодели системы паро- и теплоснабжения

Разработанная программная макромодель 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 макромодели показали, что макромодель 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).

В пятой главе рассматриваются вопросы эффективного управления доменным процессом как составной части комплексной задачи интегрированного планирования и управления ресурсами в металлургическом производственном 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. В этом плане на рисунке 10 представлена структура снижения себестоимости металлургической продукции во взаимосвязи теплоэнергетической подсистемы и технологической линии металлургического производства.

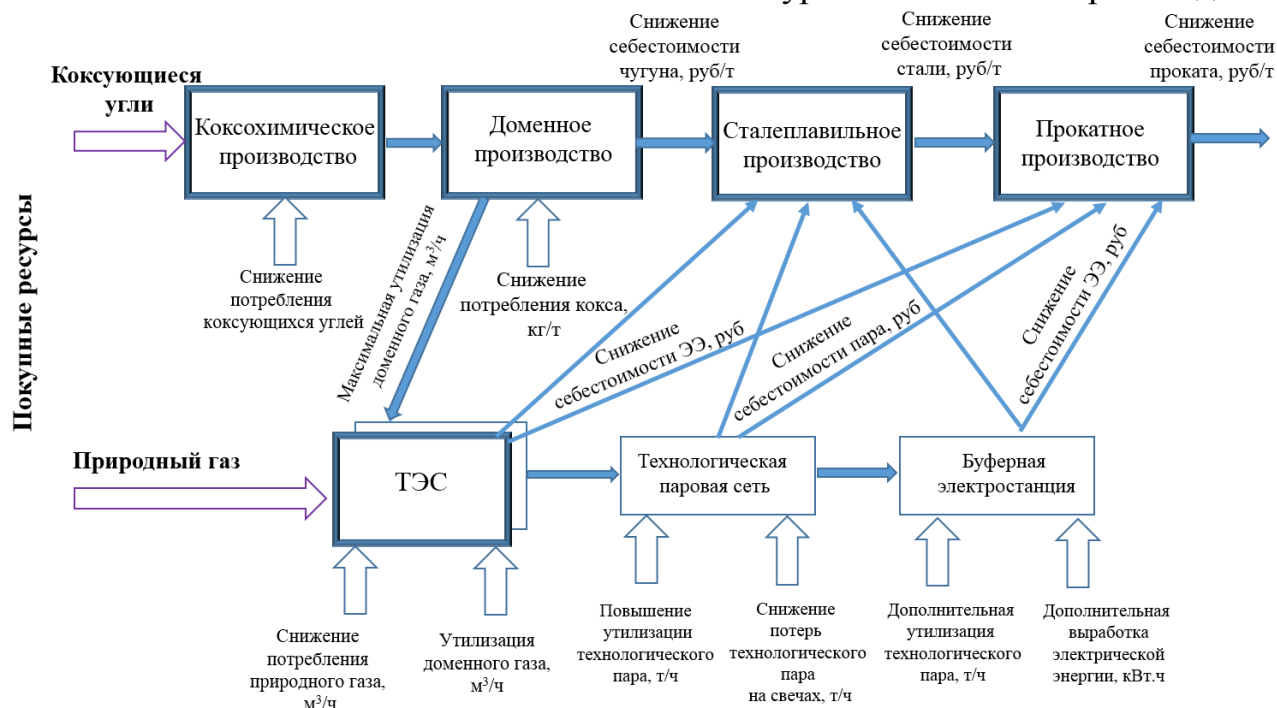


Рис.10. Структура снижения себестоимости конечной продукции в рамках интегрированного планирования и управления металлургическим комплексом

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.

На основе выделения целевых областей значений режимных параметров, позволяющих повысить эффективность доменного процесса: повышения производительности и снижения потребления кокса в рамках ограничений технологического регламента, решается задача стабилизации режимных параметров ведения доменной плавки и соответственно, а именно выработки доменного газа, поступающего как ВЭР в энергетическую подсистему на ресурсосберегающую станцию. Данная задача связана с основной задачей минимизации потребления природного газа рассматриваемым энергетическим комплексом.

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. При описании эффективной области удлиненными 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

$$E_{\text{св}}^2 = 0,5 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left((f_{ij}(x_i, x_j))^+ \right)^2, \quad (9)$$

$$(f_{ij}(x_i, x_j))^+ = \begin{cases} f_{ij}(x_i, x_j), & \text{при } f_{ij}(x_i, x_j) > 0; \\ 0, & \text{при } f_{ij}(x_i, x_j) \leq 0. \end{cases} \quad (10)$$

$$x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max}, \quad i \in I. \quad (11)$$

Невязка ограничений для неравенств (11) в квадратичном виде определяем как:

$$E_x^2 = 0,5 \sum_{i=1}^n \left(\left((-x_i + x_i^{\min})^+ \right)^2 + \left((x_i - x_i^{\max})^+ \right)^2 \right). \quad (12)$$

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

$$E_R^2 = 0,5 \sum_{i=1}^n (x_i - x_{Ri})^2. \quad (13)$$

Обобщенная штрафная функция, составленная для невязок решений неравенств (9), (12), (13) описываем в виде

$$E_0^2 = E_{\text{св}}^2 + \lambda E_x^2 + \alpha E_R^2. \quad (14)$$

Решение минимаксной задачи математического программирования находим как

$$\min_{\{x_i \in I_y\}} \max_{\{x_i \in I_u\}} E_{\text{св}}^2(\{x_i : i \in I\}). \quad (15)$$

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

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

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

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

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. 11. В качестве начальной точки расчета приняты данные за 07.12.2015 г.

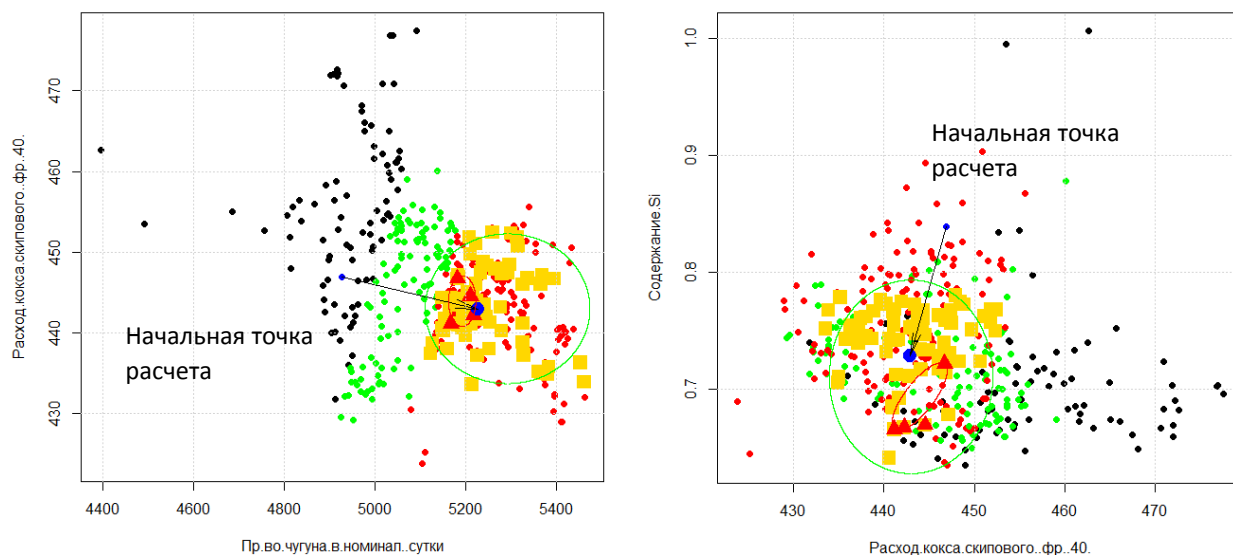


Рис. 11. Нахождение целевого режима работы доменной печи

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.

Кластеризация данных проводилась с помощью анализа матрицы расстояний U-matrix нейронной сети обученной на данных статистики. На рисунке 12 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.

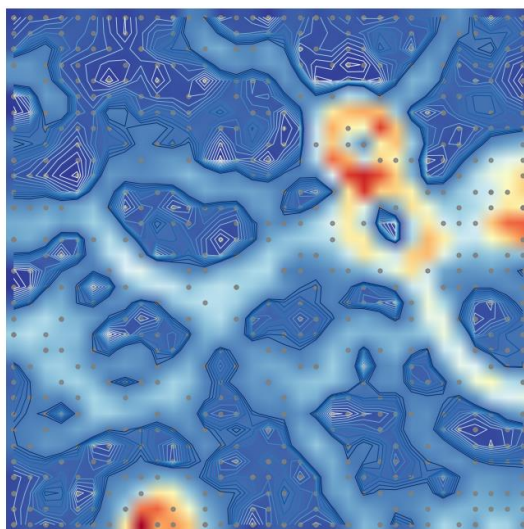


Рис. 12. U-matrix

Кластеризация производится путем выделения обособленных темно-синих групп нейронов. Результат кластерного разбиения при использовании U-matrix представлен на рисунке 12. Каждому кластеру соответствует свой цвет точек. На рисунке 13 приведен пример карт работы доменной печи.

Данный подход управления с учетом режимов работы будет полезен на производстве для контроля и энергоэффективного управления доменной плавкой.

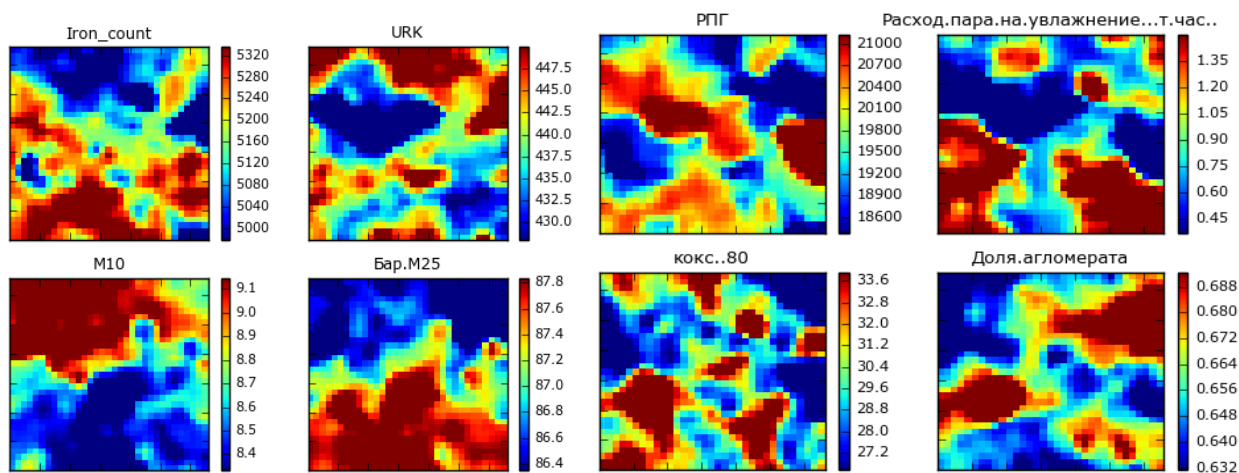


Рис. 13. Пример карт работы доменной печи

В работе также приведено описание стратегий оперативного управления доменным процессом. Прежде всего необходимо отметить, что все базовые параметры, приведенные на (рис. 14), характеризуются временем и величиной действия. Связи между параметрами характеризуются величинами транспортного и инерционного запаздывания. Кроме того, 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.

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. Базовые связи параметров регулирования представлены на рис. 14.

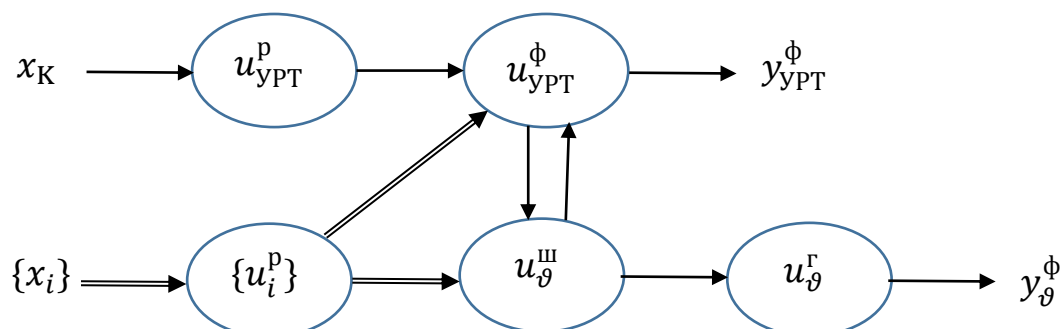


Рис. 14. Базовые связи параметров регулирования

Здесь x_K – подача кокса, $\{x_i\}$ – подачи корректирующих материалов, $u_{урт}^p$, $u_{урт}^ф$, $y_{урт}^ф$ – 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; $u_{г}^ш$ – значение индикатора теплового состояния процесса в шахте, $u_{г}^r$ – значение индикатора теплового состояния процесса в горне, $y_{г}^ф$ – значение индикатора теплового состояния на выходе печи.

Стратегия управления 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

$$\{(u_{урт,s}, y_{Si,s}); \forall s (|y_{Si,s} - y_{Si,s,H}| \leq \varepsilon)\}_H. \quad (16)$$

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

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

$$u_{урт,s,H} = \frac{1}{N_H} \sum_{s \in I_{s,H}} u_{урт,s}, \quad I_{s,H} = \{s; \forall s (|y_{Si,s} - y_{Si,s,H}| \leq \varepsilon)\}_H. \quad (17)$$

где N_n – число данных, удовлетворяющих критерию (16).

Обратим внимание, что формулы (16), (17) 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 (16) 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 (16), (17).

Стратегия управления 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:

$$\Delta u_{УРТ,s} = u_{УРТ,s} - u_{УРТ,s,n}, \quad \Delta y_{Si,s} = y_{Si,s} - y_{Si,s,n}. \quad (18)$$

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

$$a_K = \frac{(\Delta y_{Si}, \Delta u_{УРТ})_s}{(\Delta x_K, \Delta u_{УРТ})_s}, \quad (19)$$

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

Формула (19) 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

$$a_K = \max_{(\tau_{тр})} a_K(\tau_{тр}) = \frac{(\Delta y_{Si}(t_s + \tau_{тр}), \Delta u_{УРТ}(t_s))_s}{(\Delta u_{УРТ}(t_s), \Delta u_{УРТ}(t_s))_s}. \quad (20)$$

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

$$\Delta y_{Si}(t_s + \tau_{тр}) = a_K \Delta u_{УРТ}(t_s) \quad (21)$$

Стратегия управления 3

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

$$\Delta h_{Si}(t_s) = \int_0^{\infty} \Delta u_{УРТ}(t_s - \tau_{\text{тр}}^{\text{min}} - \lambda) w(\lambda) d\lambda, \quad (22a)$$

$$\int_0^{\infty} w(\lambda) d\lambda = 1, \quad (22b)$$

$$\Delta y_{Si}(t_s) = F(\Delta h_{Si}(t_s)). \quad (22c)$$

Здесь в явном виде выделена нелинейная статическая часть оператора (22c) и динамическая часть (22a) с единичным коэффициентом передачи (22b), где $w(\lambda)$ - весовая функция, $\tau_{\text{тр}}^{\text{min}}$ - минимальное значение транспортного запаздывания.

В дискретном варианте формулы (3.7) имеют вид

$$\Delta h_{Si}(t_s) = \sum_k \Delta u_{УРТ}(t_s - \tau_{\text{тр}}^{\text{min}} - \lambda_k) w_k \Delta \lambda_k, \quad (23a)$$

$$\sum_k w_k \Delta \lambda_k = 1, \quad (23b)$$

$$\Delta y_{Si}(t_s) = F(\Delta h_{Si}(t_s)). \quad (23c)$$

В этом случае формула динамической связи, например, для инерционного процесса первого порядка, имеет вид

$$\Delta h_K(T_{\text{ин}}; t_s) = \int_0^{T_{\text{н}}} \Delta u_{УРТ}(t_s - \lambda) \frac{1}{T_{\text{ин}}} \exp\left(-\frac{\lambda}{T_{\text{ин}}}\right) d\lambda. \quad (24)$$

где $T_{\text{ин}}$ - постоянная времени инерционного звена, $T_{\text{н}}$ - интервал наблюдения.

Обозначим

$$\Delta h_K(T_{\text{ин}}; t_s) = \int_0^{T_{\text{н}}} \Delta u_{УРТ}(t_s - \lambda) \frac{1}{T_{\text{ин}}} \exp\left(-\frac{\lambda}{T_{\text{ин}}}\right) d\lambda. \quad (245)$$

Тогда формула прогноза с опережением на величину транспортного запаздывания будет иметь вид

$$\Delta y_{Si}(t_s + \tau_{\text{тр}}) = a_K \Delta h_K(T_{\text{ин}}; t_s). \quad (26)$$

Коэффициент передачи по коксу определится на основе соотношения, аналогичного соотношению (3.4)

$$a_{\text{УРТ}} = \max_{(\tau_{\text{тр}}, T_{\text{ин}})} a_{\text{УРТ}}(\tau_{\text{тр}}, T_{\text{ин}}) = \frac{(\Delta y_{Si}(t_s + \tau_{\text{тр}}), \Delta h_K(T_{\text{ин}}; t_s))_s}{(\Delta h_{\text{УРТ}}(T_{\text{ин}}; t_s), \Delta h_{\text{УРТ}}(T_{\text{ин}}; t_s))_s}. \quad (27)$$

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.

В работе приведено описание результатов внедрения программного обеспечения определения оптимальных значений технологических параметров доменной плавки для решения задач максимизации выработки чугуна, минимизации потребления кокса, минимизации себестоимости чугуна и стали.

Изменением параметров дутьевого режима работы доменных печей возможно уменьшить удельный расход кокса на 12 кг/т (рис. 15).

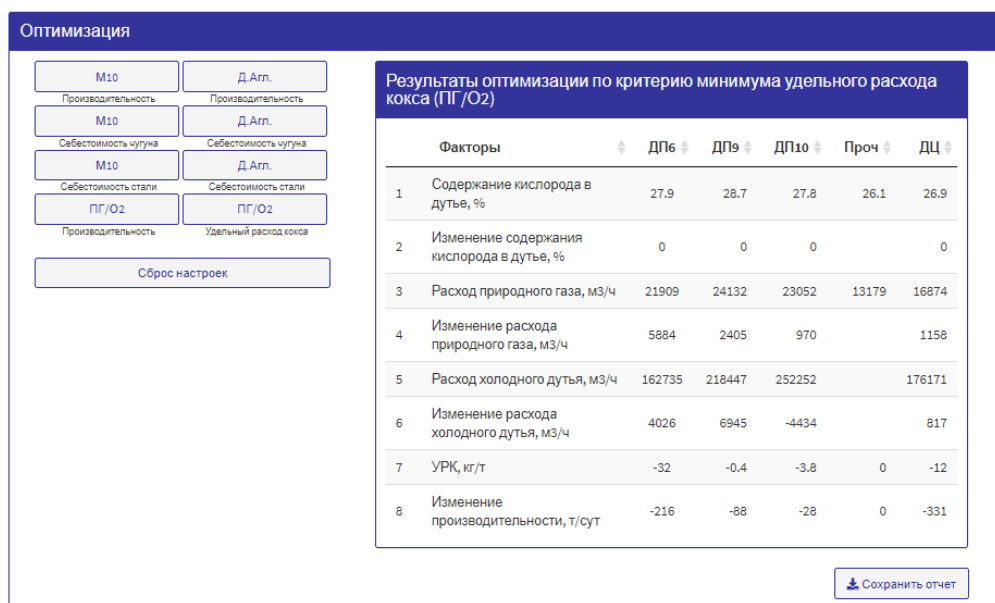


Рис. 15. Пример решения задачи определения оптимального значения удельного расхода кокса для доменного цеха



Рис. 16. Пример зависимость дутьевых параметров (соотношения удельного расхода природного газа и технологического кислорода) на производительность и удельный расход кокса для ДП9

Для определения оптимального значения качества кокса по показателю M10 с целью нахождения минимального значения себестоимости чугуна запускается модуль оптимизации. Результаты определения оптимального значения качества кокса M10 приведен на рис. 17.

Результаты оптимизации по критерию минимума себестоимости чугуна (M10)						
	Факторы	ДП6	ДП9	ДП10	Проч	ДЦ
1	Прочность на истирание (M10), %	8.22	7.83	8.3	7.96	8.02
2	Изменение прочности на истирание (M10), %	-0.28	-0.28	-0.28		-0.28
3	Доля агломерата в ЖРС, д.е.	0.66	0.62	0.65	0.6	0.62
4	Изменение доли агломерата в ЖРС, д.е.	0	0	0		0
5	УРК, кг/т	-3	-2.5	-2.3	0	-2.6
6	Изменение производительности, т/сут	18.8	31.9	43.6	0	94.4
7	Изменение стоимости угольной шихты, руб/т					55
8	Изменение стоимости ЖРС, руб/т	0	0	0	0	0
9	Изменение себестоимости чугуна, руб/т					2.97
10	Изменение себестоимости стали, руб/т					-6.06

Рис. 17. Пример расчета оптимального значения M10 для нахождения минимума себестоимости чугуна

Снижение качества кокса по показателю M10 на 0,28% по ДЦ приведет к уменьшению удельного расхода кокса на 2,6 кг/т, увеличению производительности на 94,4 т/сут, увеличению стоимости угольной шихты на 55 руб/т, уменьшению себестоимости стали на 6,06 руб/т, увеличению себестоимости чугуна на 2,97 руб/т.

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 с производственными подразделениями приведена на рисунке 18.

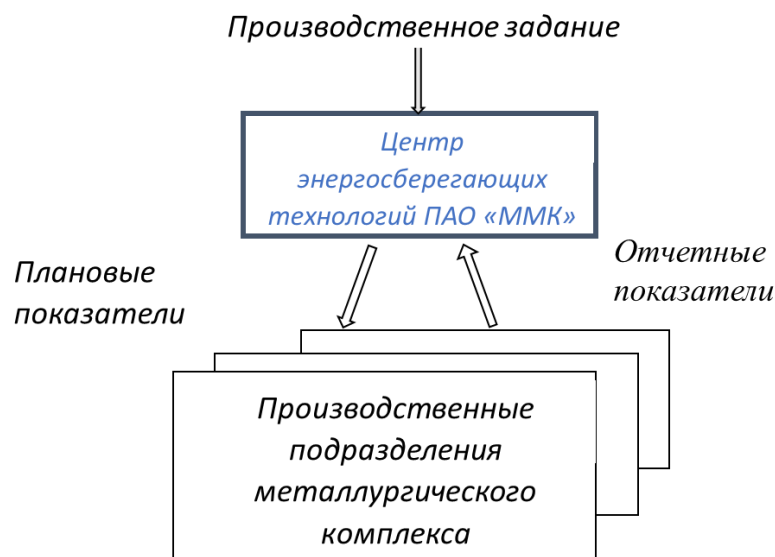


Рис. 18. Интегрированное планирование и управление энергетической эффективностью в металлургическом комплексе

Управление сложными технологическими процессами предполагает централизованное планирование и контроль энергоемкости составляющих частных процессов. Одной из проблем централизованного планирования и контроля энергоемкости в сложных технологических комплексах является получение достоверных моделей зависимостей энергоемкости 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. Вследствие этого получение достоверных данных часто является нереализуемым 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.

Планирование и контроль энергоэффективности технологическими процессами крупного промышленного комплекса осуществляется в рамках единой организационной многоуровневой структуры управления.

В общем случае на уровне производственных подразделений энергетические характеристики описываются зависимостями

$$W_i = F_i(\Pi_i, \mathbf{y}_{ti}; \mathbf{u}_i, \mathbf{v}_i, \mathbf{z}_i, \mathbf{y}_i),$$

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; z_i – набор неизмеряемых неуправляемых параметров; 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:

$$E_C^2(c_i) = \frac{1}{H_i} \sum_{s=1}^{N_i} (b_{is} - \varphi_i(c_i; \Pi_{is}))^2$$

H_i – количество статистических параметров;

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:

$$E_{\mathcal{O}}^2(c_i) = \frac{1}{M_i} \sum_{k=1}^{M_i} (b_{ik} - \varphi_i(c_i; \Pi_{is}))^2,$$

M_i – количество технологических испытаний и энергетических обследований;

c_i – структурные параметры зависимости $\varphi_i(\cdot)$ энергоемкости технологического производства b_i от выпуска продукции Π_i ;

Квадратичное уклонение искомого вектора параметров c_i от базового значения c_{ip} , на основе которого осуществляется регуляризация постановки задачи идентификации зависимости:

$$E_P^2(c_i) = (c_i - c_{ip})^2.$$

Линейная свертка рассмотренных уклонений:

$$E_o^2(c_i) = \alpha E_C^2(c_i) + \beta E_{\mathcal{O}}^2(c_i) + \gamma E_P^2(c_i); \quad \alpha, \beta, \gamma \geq 0; \quad \alpha + \beta + \gamma = 1, \quad (28)$$

где α, β, γ – весовые коэффициенты.

Искомый вектор c_i определяется как решение экстремальной задачи

$$\min_{\{c_i\}} E_o^2(c_i) \quad (29)$$

На основе решения задачи минимизации линейной свертки рассмотренных уклонений (28) разработано программное обеспечение контроля и прогнозирования потребления энергетических ресурсов промышленным предприятием в целом.

В заключении приводится диаграмма потоков сбереженных энергетических ресурсов, построенной на основе решения поставленных в работе задач. Пример диаграммы потоков сбереженных энергетических

ресурсов, полученный для отдельного календарного месяца представлен на рисунке 19. Данная диаграмма позволяет проследить как локально сэкономленные ресурсы проходят по всей технологической схеме производства и концентрируются в местах, где оценивается общий технико-экономический эффект от энергосбережения.

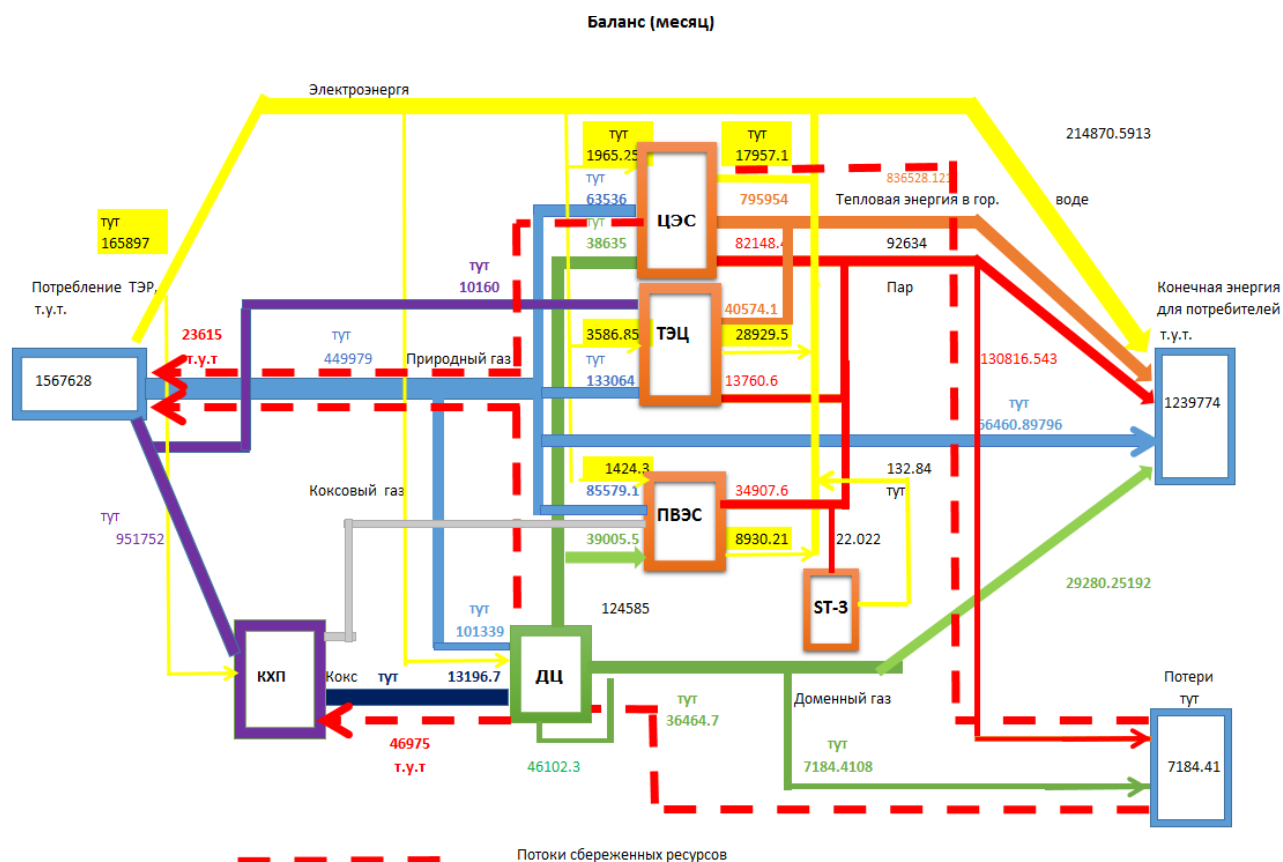


Рис. 19. Диаграмма потоков сэкономленных энергетических ресурсов

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. На примере ПАО «ММК» можно показать, что такой подход является продуктивным.

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. В основе расчетов лежит энергетический баланс для каждого узла, с помощью 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. Фрагмент подобного плана для доменного цеха приведен на рисунке 20.

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. 20. Фрагмент расчетного плана технико-экономических показателей доменного цеха

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 макромоделли 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 макромоделли 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 чугунах при стабилизации теплового состояния доменной печи (оценивается по показателю среднеквадратического отклонения содержания кремния в чугунах 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

1. Barbasova, T.A. A Multilevel Resource-Saving Blast Furnace Process Control / T.A. Barbasova // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 136–146. DOI: 10.14529/ctcr210112
2. Барбасова Т.А. Ресурсосберегающее управление в энергометаллургическом производственном комплексе // Приборы – 2020. – № 12(246). – С.22-29.
3. Барбасова Т.А. Метод многоуровневого прогнозирования и нормирования потребления электрической энергии предприятием //Электротехнические системы и комплексы – 2020 – №4(49). – С.49-54.
4. Kazarinov L.S., Shnayder D.A., Barbasova T.A. Multilayered approach to model predictive industrial process control // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2016. – Т. 16. – № 1. – С. 137-144. DOI:10.14529/ctcr160112.
5. Kazarinov L.S., Shnayder D.A., Barbasova T.A., Basalaev A.A., Kolesnikova O.V. и др., всего 6 чел. A model predictive approach to blast furnace operational management automation // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2016. – Т. 16. – № 4. – С. 36-49.
6. Казаринов Л.С., Барбасова Т.А. Метод эллиптических центроидов в управлении эффективностью технологических процессов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2015. – Т. 15. – № 1. – С. 152-155.
7. Казаринов Л.С., Барбасова Т.А. Интегрированное управление энергоемкостью металлургического производства // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2015. – Т. 15. – № 2. – С. 121-124.
8. Казаринов Л.С., Барбасова Т.А. Управление теплоэнергетическим комплексом промышленного предприятия на основе концепции энергосберегающей станции // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2014. – Т. 14. – № 3. – С. 103-106.
9. Казаринов Л.С., Барбасова Т.А., Колесникова О.В., Захарова А.А. Метод прогнозирования электропотребления промышленного предприятия // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2014. – Т. 14. – № 1. – С. 5-13.
10. Казаринов Л.С., Барбасова Т.А., Захарова А.А. Метод прогнозирующего управления энергетической эффективностью промышленного предприятия // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2013. – Т. 13. – № 2. – С. 12-24.
11. Казаринов Л.С., Барбасова Т.А. Система диспетчеризации и оперативного управления энергетическими потоками в теплоэнергетическом комплексе металлургического предприятия // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2013. – Т. 13. – №2. – С. 53-63.
12. Казаринов Л.С., Барбасова Т.А., Захарова А.А. Оптимальное прогнозирование потребления энергетических ресурсов по стоимостному критерию // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2013. – Т.13. – №1. – С. 90–93.

13. Казаринов Л.С., Барбасова Т.А. Регуляризация некорректно поставленных задач упреждающего управления в энергосберегающих технологиях // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2013. – Т. 11. – №1. – С. 5-15.

14. Барбасова Т.А., Захарова А.А. Автоматизированная система энергетического менеджмента промышленного предприятия // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2013. – №2 (30). – С. 23-27.

15. Казаринов Л.С., Барбасова Т.А. Упреждающее управление энергетической эффективностью предприятий // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2012. – Вып. 17. – №35 (294). – С. 85–97.

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

17. Казаринов Л.С., Барбасова Т.А., Захарова А.А. Автоматизированная информационная система поддержки принятия решений по контролю и планированию потребления энергетических ресурсов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2012. – Вып. 16. – №23(282). – С. 118–122.

18. Казаринов Л.С., Барбасова Т.А. Система управления энергетическими потоками в теплоэнергетическом комплексе металлургического предприятия // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2012. – Вып. 16. – №23 (282). – С. 21–25.

19. Барбасова Т.А., Захарова А.А. Пути повышения энергетической эффективности Челябинской области // Инновационный Вестник Регион. – 2012. – №2 (28). – С. 69-74.

Статьи в журналах, входящих в систему цитирования Scopus и WoS

20. Barbasova, T.A., Lapteva, Y.V. Prediction of Titanium Module in Blast Furnace Based on Multilayer Perceptron and Elman Neural Network. // Proceedings - 2018 Global Smart Industry Conference, GloSIC 2018, Номер статьи 8570139. DOI: 10.1109/GloSIC.2018.8570139.

21. Barbasova, T.A., Lapteva, Y.V., Salov, D.D. Application of recurrent neural network and matrix pencil method in predicting blast furnace thermal state indicators. // 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018, номер статьи 8501682. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501682.

22. Shnayder, D.A., Barbasova, T.A., Lapteva, Y.V. Enhancing blast furnace control efficiency based on self-organizing Kohonen neural networks // Proceedings - 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2018, номер статьи 8728725, DOI: 10.1109/ICIEAM.2018.8728725.

23. Barbasova, T.A., Filimonova, A.A. Predictive control of thermal state of blast furnace // Journal of Physics: Conference Series. International Conference on Information Technologies in Business and Industry 2018, ITBI 2018; Tomsk Polytechnic UniversityTomsk; Russian Federation; 17 January 2018 до 20 January 2018; Код 136631 Volume 1015, Issue 3, 22 May 2018, Номер статьи 032012 DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032012.

24. Barbasova, T.A., Filimonova, A.A. Automated system for simulation of electricity consumption in the iron and steel plant. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017; South Ural State University Chelyabinsk; Russian Federation; 16 May 2017 до 19 May 2017; Номер категорииCFP17F42-ART; Код 1314762017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and

Manufacturing, ICIEAM 2017 - Proceedings 19 October 2017, Номер статьи 80761302017 DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076130.

25. Kazarinov, L.S., Filimonova, A.A., Kolesnikova, O.V., Barbasova, T.A. Efficiency evaluation method for boilers performance with a team-based breakdown of outcomes // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017 – Proceedings 8076176 DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076176.

26. Filimonova, A.A., Barbasova, T.A., Shnayder, D.A., Basalaev, A.A. Heat Supply Modes Optimization Based on Macromodeling Technology // Energy Procedia Volume 111, 1 March 2017, Pages 710-719 DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.233.

27. Filimonova, A.A., Barbasova, T.A., Shnayder, D.A. Outdoor Lighting System Upgrading Based on Smart Grid Concept // Energy Procedia, Volume 111, 1 March 2017, Pages 678-8th International Conference on Sustainability in Energy and Buildings, SEB 2016; Turin; Italy; 11 September 2016 до 13 September 2016; Код 127055, с. 678-688 DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.230.

28. Shnayder D.A., Kazarinov L.S., Barbasova T.A., Lipatnikov A.V. Data Mining and Model-Predictive Approach for Blast Furnace Thermal Control // Intelligent Systems Conference 2017 7-8 September 2017, London, UK с.653-660.

29. Kazarinov L.S., Shnayder D.A., Barbasova T.A. Optimization of the Blast Furnace Operating Modes for Identification of the Areas of Unimprovable Solutions // VI International Conference for young scientists “High Technology: Research and Applications 2016 (HTRA 2016), Volume 743 KEM, 743 KEM, с. 363-368 DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.743.363.

30. Kazarinov L.S., Barbasova T.A. Elliptic component analysis // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016 – Proceedings 7910936 DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7910936.

31. Basalaev, A.A. , Barbasova, T.A., Shnayder, D.A. Simulation study on supply temperature optimization of university campus heating system //Procedia Engineering Volume 129, 2015, Pages 587-59. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.070.

32. Kazarinov L.S., Barbasova T.A. Case study of the Conservation Power Plant concept to energy conservation in a metallurgical works // Procedia Engineering, International Conference on Industrial Engineering. Volume 129, 2015, P. 578–586. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.060.

33. Kazarinov L.S., Barbasova T.A., Kolesnikova O.V., Shnayder D.A. Complex Hydraulic Network Dispatching Control Based on Signal-Oriented Macromodel // 1st Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems (MICNON-2015), Saint Petersburg, RUSSIA, June, 24–26, Volume 48, Issue 11, 2015, Pages 92–96. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.09.165.

34. Kazarinov L.S., Barbasova T.A., Kolesnikova O.V., Zakharova A.A. Method of Multilevel Rationing and Optimal Forecasting of Volumes of Electric_Energy Consumption by an Industrial Enterprise // Automatic Control and Computer Sciences, 2014, Vol. 48, No. 6, pp. 324–333. DOI: 10.3103/S0146411614060054.

35. Kazarinov L.S., Barbasova T.A. Identification method of blast-furnace process parameters // V International Conference for young scientists “High Technology: Research and Applications 2015 (HTRA 2015), Key Engineering Materials, Vol. 685, pp. 137-141, Mar. 2016 DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.685.137.

36. Barbasova T.A., Kolesnikova O.V., Filimonova A.A. Automated system for equipment energy efficiency monitoring in heat energy facility // Energy Procedia, Sustainability in Energy and Buildings: Proceedings of the 7th International Conference SEB, Volume 83, December 2015, Pages 69–78. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.12.197.

37. Filimonova A.A., Kazarinov L.S., Barbasova T.A. Dispatching control of industrial facility power consumption // Energy Procedia, Sustainability in Energy and Buildings: Proceedings of the 7th International Conference SEB, Volume 83, December 2015, Pages 111–120. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.12.201.

38. Kazarinov L.S., Barbasova T.A. Oblong ellipsoid method in process efficiency control 2015, International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS) Tomsk, Russia 2015. Pages 1–5. DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414875.

Патенты и программы

39. Патент 99913 Российская Федерация, МПК Н 04 В 3/56. Устройство для приема-передачи информации по питающей сети и управления режимами работы потребителей электрической энергии / Барбасова Т.А., Вставская Е.В., Константинов В.И., Константинова О.В., Костарев Е.В. – №2010128856/09; заявл. 12.07.2010; опубл. 27.11.2010, Бюл. №33 (IV ч.) – с. 1057-1058.

40. Патент 2526206 Российская Федерация, МПК Н 05 В 37/02. Способ и устройство энергосберегающего управления уличным освещением / Шнайдер Д.А., Шишкин М.В., Барбасова Т.А., Захарова А.А., Абдуллин В.В., – № 2013103659/07; заявл. 28.01.2013; опубл. 20.08.2014.

41. Свидетельство о регистрации программ ЭВМ. Модуль оптимизации загрузки источников тепловой энергии в системе теплоснабжения энергосберегающей геоинформационной системы реального времени / Шнайдер Д. А., Скремента В. О., Барбасова Т. А., Филимонова А. А., – № 2017612936, заявл. 09.01.2017; опубл. 06.03.2017.

42. Свидетельство о регистрации программ ЭВМ. Модуль многопараметрического анализа теплотехнических процессов и прогнозирования расхода тепловой энергии в магистральных сетях теплоснабжения энергосберегающей геоинформационной системы реального времени для оптимального управления теплогидравлическими режимами систем теплоснабжения муниципального образования / Шнайдер Д. А., Скремента В. О., Барбасова Т. А., Басалаев А.А., Точилкин А.В., – № 2015662884, заявл. 28.12.2015; опубл. 15.02.2016.

43. Свидетельство о регистрации программ ЭВМ. Модуль оптимизации расхода тепловой энергии в системе теплоснабжения энергосберегающей геоинформационной системы реального времени для оптимального управления теплогидравлическими режимами систем теплоснабжения муниципального образования/ Шнайдер Д. А., Скремента В. О., Барбасова Т. А., Басалаев А.А., Точилкин А.В., – № 2015662886, заявл. 28.12.2015; опубл. 15.02.2016.

Монографии и учебные пособия

44. Барбасова, Т.А. Основы теории связи: учебное пособие / Т.А. Барбасова – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2018. – 112 с.

45. Барбасова Т.А., Басалаев А.А., Филимонова А.А. Программно-технические комплексы АСУ ТП: Учебное пособие. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2018. – 103 с. (60 стр. /103 стр.)

46. Барбасова Т.А., Басалаев А.А., Цыпкайкина А. Д. Программно-технические комплексы АСУ ТП: Курс лекций. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2018. – 144 с. (50 стр. /144 стр.)

47. Барбасова Т.А., Гудилин А.Е. Теория конечных автоматов: Учебное пособие. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2014. – 118с. (50 стр. / 118 стр.)

48. Автоматизированные системы управления энергоэффективным освещением: монография / под ред. Л.С. Казаринова / Казаринов Л.С., Шнайдер Д.А., Барбасова

Т.А., Вставская Е.В. и др. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, издатель Т. Лурье, 2011. – 208 с., ил. (115 стр. / 208 стр.)

49. Автоматизированные системы управления в энергосбережении (опыт разработки): монография / под ред. Л.С. Казаринова / Казаринов Л.С., Шнайдер Д.А., Колесникова О.В., Барбасова Т.А. и др. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, издатель Т. Лурье, 2010. – 228 с., ил. (165 стр. / 228 стр.)

Статьи в других журналах и сборниках трудов, материалах конференций

50. Барбасова Т.А. Оперативное управление технологическими сетями тепло- и пароснабжения производственных металлургических комплексов / Т.А. Барбасова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2020. – Т. 20. – № 4. – С. 5–11. DOI: 10.14529/power200401

51. Шнайдер Д.А., Полинов А.А., Колосов А.В., Казаринов Л.С., Барбасова Т.А. и др. всего 9 чел. Модельно-упреждающее управление тепловым состоянием доменной печи в целях повышения технико-экономических показателей доменной плавки на основе оперативного прогнозирования и стабилизации режимных параметров в эффективной многомерной области. // Труды VIII международного конгресса доменщиков «Металлургия чугуна – вызовы XXI века» М.: Издательский дом «Кодекс», 2017. – С. 392-403.

52. Барбасова Т.А. Интегрированное планирование и управление процессами энергосбережения в теплоэнергетическом комплексе металлургического предприятия // 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.

53. Казаринов Л.С., Барбасова Т.А. Интегрированное планирование и управление процессами энергосбережения в теплоэнергетическом комплексе металлургического предприятия // 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.

54. Шнайдер Д.А., Барбасова Т.А. Система энергетического менеджмента комплекса зданий ЮУрГУ // Труды научно –практической конференции «Актуальные проблемы автоматизации и управления». – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – С. 238-242.

55. Шнайдер Д.А., Барбасова Т.А., Захарова А.А., Скремета В.О. Оптимизация режимов теплоснабжения зданий на основе ГИС реального времени // Труды научно-практического семинара «Применение современных технологий и оборудования в кадастровых, геодезических и горных работах». – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – С. 105-112.

56. Казаринов Л.С., Белавкин И.В., Самсонов П.Л., Барбасова Т.А. Возможные механизмы финансирования энергосберегающих проектов // Вестник энергосбережения Южного Урала – 2005, №4. – С.12-14.