

## **ИНТЕГРИРОВАННОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

*Т.А. Барбасова*

В статье рассмотрен подход к интегрированному планированию и управлению энергоемкостью технологических процессов металлургического производства. Рассмотрены вопросы построения на основе концепции энергосберегающей станции интегрированного управления теплоэнергетическим комплексом металлургического предприятия по критериям эффективности снабжения энергетическими ресурсами технологических потребителей.

Приведена общая схема интегрированного планирования и управления ресурсами в теплоэнергетическом комплексе металлургического предприятия. С целью системного рассмотрения указанных энергетических процессов совместно с процессами энергосбережения целесообразно представлять их как дуальные друг другу энергетических потоков – потоков реальных энергетических ресурсов и обратных потоков сбереженных ресурсов.

Рассмотрена задача оптимизации режимов теплоэнергетических станций, в которых с целью повышения эффективности использования топлива утилизируются вторичные энергетические ресурсы металлургического производства.

Для решения задач оперативного управления эффективностью пароснабжения потребителей в работе рассмотрены макромодели технологических паровых систем и сетей металлургического производства.

*Ключевые слова: энергосберегающая станция, интегрированное планирование ресурсов, негаватт, энергетическая эффективность*

## **INTEGRATED RESOURCE PLANNING AND MANAGEMENT IN THE HEAT POWER COMPLEX OF A METALLURGICAL ENTERPRISE**

*T.A. Barbasova*

An approach to integrated resource planning and management of metallurgical processes is considered. Questions of construction the integrated management for a heat power complex of metallurgical plant are considered. The construction is carried out based on the concept of energy saving station in terms of criteria of power supply effectiveness.

A general scheme of the integrated resource planning and management in a heat power complex of the metallurgical plant is provided. For the purpose of system consideration of the specified power processes in combination with energy saving processes it is expedient to represent them as dual power streams – streams of real energy resources and return streams of saved resources.

Mode optimization problem of heat power stations that utilize secondary energy resources of metallurgical production is considered.

For tasks of operational management of steam supply efficiency macro models of steam systems and networks of metallurgical production are considered.

*Keywords: conservation power plant, integrated resource planning, negawatt, energy efficiency*

## **Введение**

Повышение производственной эффективности в промышленности является в настоящее время одной из наиболее актуальных проблем развития Российской Федерации. Достаточно сказать, что энергоемкость производства в нашей стране по многим позициям значительно превышает энергоемкость производства промышленно развитых стран. Этой проблеме уделяется у нас серьезное внимание, как на уровне технико-экономической политики, так и научно-практических исследований. Техничко-экономическая политика в сфере энергетической эффективности производства определяется 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 области научных исследований проблема энергосбережения является одной из центральных, и по данной проблеме имеется обширная литература. Однако системный эффект повышения энергетической эффективности производства в нашей стране еще не достигнут.

Одной из причин является недостаточное внедрение передовых концепций, технологий и методов с успехом используемых в промышленно-развитых странах. В области автоматизированных систем управления технологическими процессами передовой концепцией в настоящее время является концепция интегрированного планирования и управления энергетическими ресурсами.

В основе концепции интегрированного планирования и управления энергетическими ресурсами лежит ряд основополагающих идей, среди которых следует выделить:

– принцип двойственности эффективных энергетических комплексов, в которых в явном виде выделяются не только процессы генерации и потребления энергии, но и дополняющие их процессы энергосбережения. При этом процессы энергосбережения рассматриваются как подсистемы, генерирующие “негативные” энергии, то есть отрицательные ватты[1-4];

– планирование и управление эффективными энергетическими комплексами осуществляется в системном единстве процессов генерации, потребления и сбережения энергии.

Развитие данных идей применительно к энергоснабжению городов в США привело к значительным успехам в области энергосбережения. Здесь следует отметить работы автора идеи “негатт” Эмори Ловинса [1], больших практических успехов добились энергетические компании Pacific Corporation, Sacramento Municipal District и др. В Европейском Союзе следует отметить положительный опыт города Ганновера.

Основным передовым зарубежным опытом является создание Conservation Power Plant. Conservation Power Plant - система интегрированного планирования и управления энергетическими ресурсами, рассматриваемая в целом как специфичная энергетическая станция, генерирующая негатты энергии.

Доход данной станции составляет стоимость сэкономленной энергии по определенной цене. Из указанного дохода оплачиваются работы по системе интегрированного планирования энергетическими ресурсами с точки зрения ее содержания и развития.

Управляемая как коммерческое предприятие, Conservation Power Plant конкурирует за объемы финансирования со стороны, генерирующей реальные мегаватты энергии. Тем самым достигается успешное развитие процессов энергосбережения на предприятии.

### **1. Общая схема интегрированного планирования и управления ресурсами в теплоэнергетическом комплексе металлургического предприятия**

В рассматриваемом технологическом комплексе процессы генерации, преобразования и потребления энергетических ресурсов носят сложный многоступенчатый характер. Отмечается, что с целью системного рассмотрения указанных энергетических процессов совместно с процессами энергосбережения целесообразно представлять их как дуальные друг другу энергетических потоков – потоков реальных энергетических ресурсов и обратных потоков сбереженных ресурсов. Введение условных потоков сбереженных ресурсов позволяет представить технологическую структуру энергосбережения как структуру, генерирующую «негатты» энергии. Это дает возможность наглядно рассматривать технологическую структуру энергосбережения как некоторую распределенную *энергосберегающую станцию*, соответственно оценивать ее эффективность, планировать и управлять ее работой в целом. Подобный подход позволяет достичь системного эффекта энергосбережения в сложных технологических комплексах.

В указанной схеме источники реальных ресурсов выступают в роли «потребителей» сбереженных ресурсов. Именно здесь и формируется конечный технико-экономический эффект энергосбережения – снижение объемов потребления реальных первичных ресурсов.

Конкретное применение данной схемы к теплоэнергетическому комплексу металлургического производства, например, для ОАО «ММК» – одного из крупнейших мировых производителей металлургической продукции, позволяет построить структуру энергетического комплекса, представленную на рис. 1. Обратим внимание, что центральным звеном, работающим в регулирующем режиме, здесь является Центральная электростанция – ЦЭС. Данная станция построена по структуре с поперечными связями, составными частями которой являются блок энергетических котлов ЭК, блок турбогенераторов ТГ и коллектор перегретого пара  $K_{пп}$ . Энергетические котлы потребляют природный газ  $B_{пг}$  и доменный газ  $B_{дг}$ . При необходимости здесь могут быть использованы также коксовый газ и другие ВЭР.

Турбогенераторы станции вырабатывают электрическую энергию  $W_э$  и тепловую энергию в теплофикационной воде  $Q_т$ . Кроме того из парового коллектора  $K_{пп}$  через редуционно-охладительное устройство РОУ отбирается пар на технологические нужды  $U_п$ .

Доменный газ  $B_{дг}$  на котлы ЦЭС поступает с магистрали доменного газа  $M_{дг}$ . Магистраль доменного газа связана с первичным источником газа – доменным производством. Здесь  $\Phi_{дг}$  – свеча, предназначенная для сжигания избыточных объемов доменного газа в атмосфере,  $P_{дг}$  – потребители доменного газа.

Вырабатываемая ЦЭС электрическая  $W_э$ , тепловая  $Q_т$  энергия и технологический пар  $U_п$  поступают в электрическую  $C_э$ , теплофикационную  $C_т$  и паровую  $C_п$  сети предприятия соответственно.  $P_э$ ,  $P_т$ ,  $P_п$  – соответствующие потребители электрической, тепловой энергии и пара.

Основным источником пара на технологические нужды  $D_б$  является энергетическая станция ПВЭС, работающая в базовом режиме. Дополнительными источниками пара  $B_п$  являются вторичные источники. Так как вторичные источники пара работают в переменном режиме, то для аккумулярования вторичного пара используются паровые аккумуляторы АК. Для сброса избыточного пара в атмосферу используется свеча  $C_{вп}$ . С аккумуляторов АК при необходимости в паровую сеть  $C_п$  подается дополнительный пар  $\Delta D_п$ , который компенсирует резкие набросы паровой нагрузки потребителей.

В рассматриваемой энергетической структуре с целью энергосбережения на ЦЭС утилизируется вторичный энергетический ресурс – доменный газ. На этой основе себестоимость электроэнергии, вырабатываемой на ЦЭС, значительно снижается по сравнению с электроэнергией, покупаемой на оптовом рынке. Так как себестоимость продукции предприятия, такой как продукция прокатных цехов, существенно зависит от цены на электроэнергию, то отсюда следует непосредственный вывод – необходимо максимально нагружать ЦЭС выработкой электрической энергии.

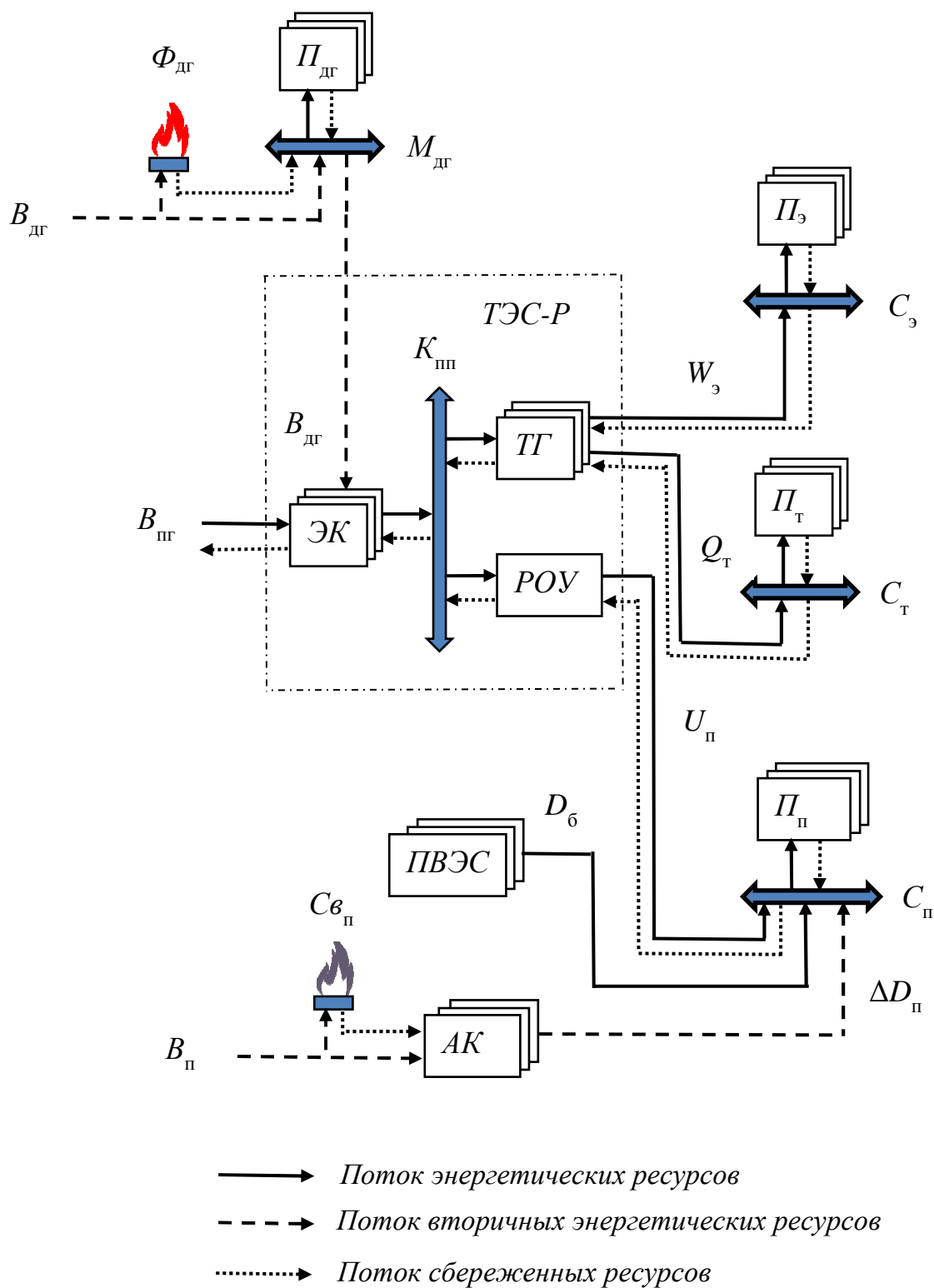


Рис. 1. Структура энергетического комплекса

Однако подобный прямой вывод не является системно обоснованным. Дело в том, что в зависимости от загрузки изменяется объем потребления доменного газа котлами ЦЭС. При этом для многих типов котлов существует нелинейная экстремальная зависимость объемов потребления доменного газа в зависимости от нагрузки. В качестве примера на рис. 2 приведены энергетические характеристики котлов ЦЭС в зависимости от их загрузки.

Диаграмма котла №7 ТП-200 ЦЭС ОАО "ММК" при  
совместном сжигании природного и доменного газов

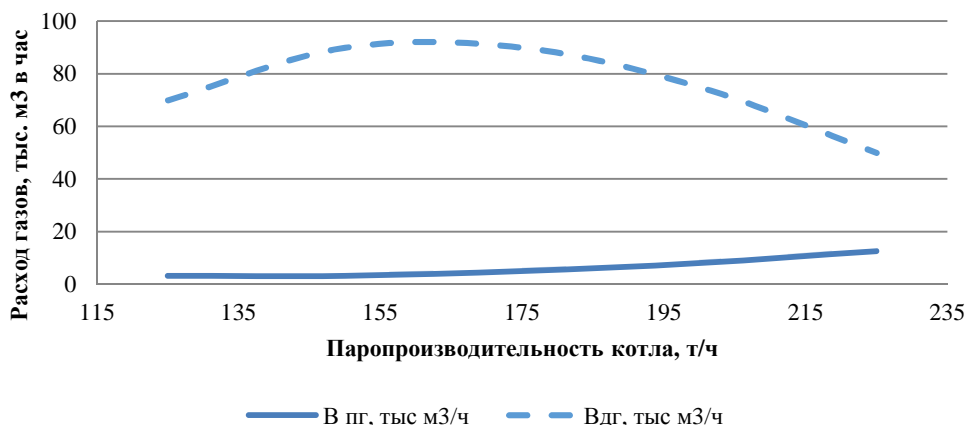


Рис.2. Энергетические характеристики котлов

Из рассмотрения рис. 2 следует, что при снижении нагрузки котлов относительный объем потребления доменного газа увеличивается, соответственно, относительный объем потребления природного газа снижается, себестоимость электрической энергии снижается. Поэтому для достижения системного эффекта энергосбережения в рассматриваемом энергетическом комплексе необходимо совместно решать целую совокупность задач, включающую такие задачи, как повышение выработки электроэнергии, снижение себестоимости электроэнергии, снижение потребления природного газа и др.

В общем случае диаграмма связи задач повышения эффективности рассматриваемого энергетического комплекса приведена на рис. 3.

Генеральной задачей проведения энергосберегающих мероприятий в рассматриваемом энергетическом комплексе является *минимизация потребления природного газа, как покупного ресурса ( $\min_{\text{пр}}$ )*. Объем потребляемого природного газа  $V_{\text{пр}}$  непосредственно определяется общим объемом выработки котлами ЦЭС перегретого пара  $D_{\text{пр}}$ , объемом потребляемого доменного газа  $V_{\text{дг}}$  и КПД котлов  $\eta_{\text{т}}$ . Рост потребления доменного газа снижает потребление природного газа (–): отсюда следует задача *максимального потребления доменного газа ( $\max_{\text{дг}}$ )*.

Рост общего объема выработки перегретого пара приводит к росту потребления природного газа (+): отсюда следует задача снижения объема выработки перегретого пара. Однако эта задача не является в рассматриваемой схеме задачей конечной и выступает в роли промежуточной цели.

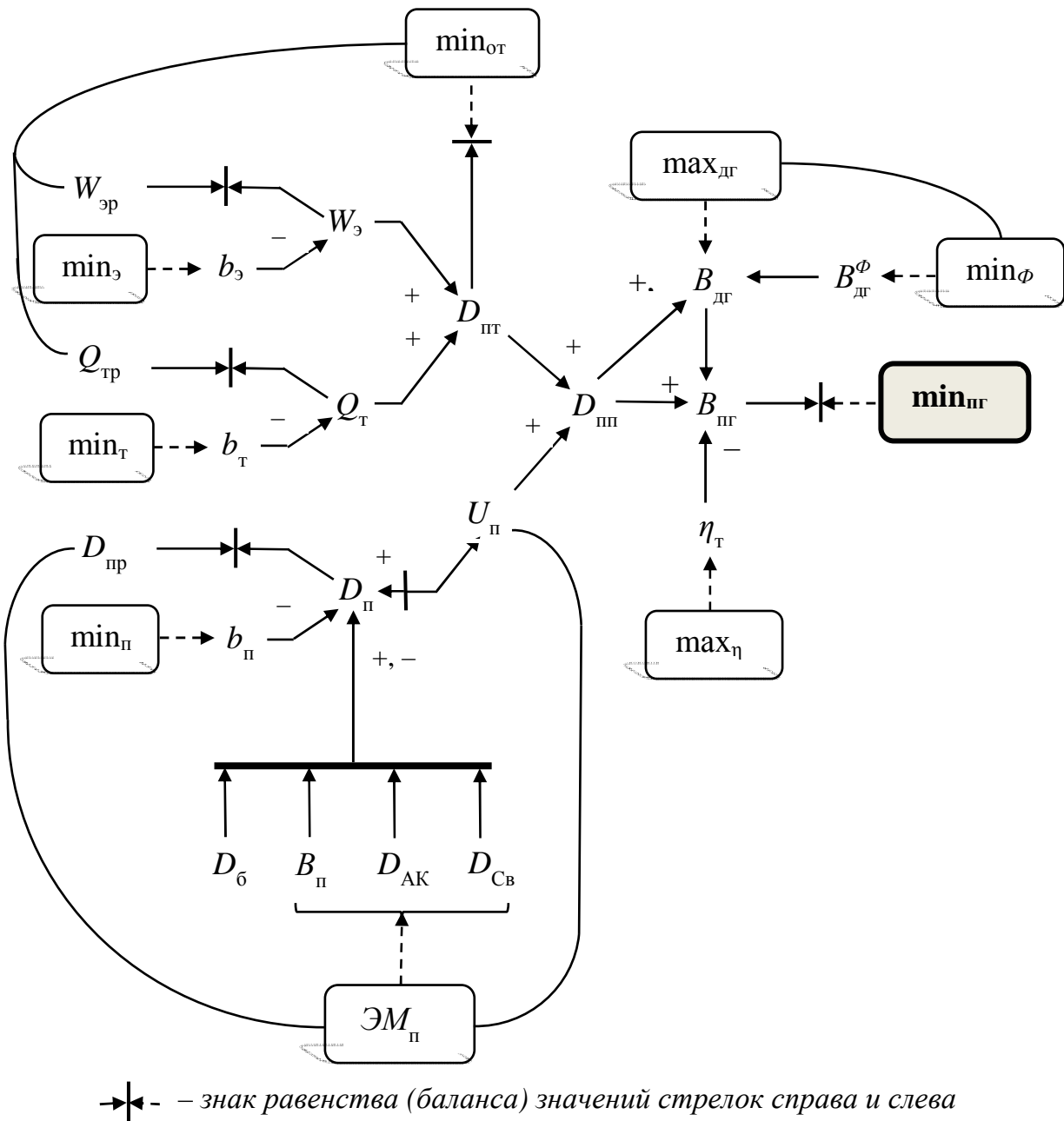


Рис. 3. Диаграмма связи задач повышения эффективности энергетического комплекса

Повышение *КПД* котлов приводит к снижению объема потребления природного газа: отсюда следует *задача повышения КПД котлов* ( $\max_{\eta}$ ). В целом объем потребляемого природного газа  $B_{\Pi Г}$  является следствием действия всех указанных выше факторов  $B_{ДГ}$ ,  $D_{\Pi Г}$ ,  $\eta_{Т}$ . С другой стороны, величина  $B_{\Pi Г}$  является следствием решения общей обратной задачи ( $\min_{\Pi Г}$ ). Эта двойственность отмечена на диаграмме (рис. 3) условным символом равенства.

На объем потребляемого доменного газа  $B_{ДГ}$  прежде всего влияет выработка перегретого пара  $D_{\Pi Г}$ . Однако, в соответствии с диаграммой (рис. 4) эта зависимость имеет в общем случае экстремальный характер и в зависимости от нагрузки котлов может характеризоваться как ростом (+), так

и снижением (–) потребления доменного газа. Потери на свече доменного газа  $B_{\text{д}}^{\Phi}$  носят отрицательный характер (–) и обуславливают задачу *снижения потерь на свече* ( $\min_{\Phi}$ ). Эта задача тесно связана с задачей *максимизации потребления доменного газа* ( $\max_{\text{д}}$ ).

Общий объем выработки перегретого пара  $D_{\text{пп}}$  складывается из объема пара, потребляемого турбогенераторами  $D_{\text{пт}}$  (+), и объема пара  $U_{\text{п}}$  (+), отбираемого для регулирования общей подачи пара на технологические нужды  $D_{\text{п}}$ . Здесь определяется локальная задача – *снижение пара, потребляемого турбогенераторами*  $D_{\text{пт}}$  ( $\min_{\text{от}}$ ). Данная задача тесно связана с задачами обеспечения расчетных объемов выработки электрической  $W_{\text{эр}}$  и тепловой энергии  $Q_{\text{тр}}$ . На расчетные объемы выработки электрической  $W_{\text{эр}}$  и тепловой энергии  $Q_{\text{тр}}$ , пара  $D_{\text{пр}}$  оказывают существенное влияние задачи  $\min_{\text{э}}$ ,  $\min_{\text{т}}$ ,  $\min_{\text{п}}$  снижения энергоемкостей  $b_{\text{э}}$ ,  $b_{\text{т}}$ ,  $b_{\text{п}}$  потребителей электрической и тепловой энергии, а также пара соответственно [5].

Общий объем пара на технологию  $D_{\text{п}}$  определяется *базовым источником пара* в объеме  $D_{\text{б}}$ . С целью энергосбережения в паровую сеть дополнительно подается *пар вторичных источников*  $B_{\text{п}}$ . Параметры пара вторичных источников являются нестабильными в широких пределах. Также в широких пределах изменяются параметры потребления пара. Это обусловлено ярко выраженной динамикой технологических процессов металлургического производства. С целью *стабилизации параметров паровой сети* здесь используются паровые аккумуляторы  $AK$ , дающие стабилизирующий поток пара  $D_{\text{ак}}$ . Для сброса избыточного пара  $D_{\text{св}}$  в атмосферу используются свечи. Регулирующий поток пара  $U_{\text{п}}$  обеспечивает ЦЭС. Все указанные задачи тесно связаны между собой и образуют единую систему *энергетического менеджмента паровой сети ЭМ<sub>п</sub>*.

В совокупности все рассмотренные задачи обеспечивают интегрированное планирование и управление ресурсами энергетического комплекса (рис. 1) с целью повышения его эффективности. Интегрально эффективность выражается в снижении объемов потребления первичного ресурса – природного газа. Структура связей «потоков» сбереженных ресурсов представлена на рис. 3. Системный характер связей указанных «потоков» сбереженных ресурсов является необходимым условием достижения интегрального эффекта энергосбережения в рассматриваемом энергетическом комплексе.

## **2. Задача снижения потребления природного газа на станции-регуляторе**

Рассмотрим в качестве примера задачу *оптимизации режимов теплоэнергетических станций*, в которых с целью повышения эффективности использования топлива утилизируются вторичные энергетические ресурсы (ВЭР) металлургического производства. В качестве



ВЭР могут выступать доменный газ, коксовый газ и другие виды ресурсов. Утилизация ВЭР на металлургических предприятиях дает значительный энергосберегающий эффект, так как позволяет экономить использование природного газа.

Управление режимами энергетических котлов, как правило, осуществляется машинистами-операторами. В этой связи актуальной задачей является представление управляющей информации об оптимальности режимов с целью организации *экстремального управления по КПД котла*.

Снижение потребления природного газа на котлах станции-регулятора является терминальной задачей в общей схеме повышения эффективности энергетического комплекса, рассмотренного выше. Основная идея снижения потребления природного газа здесь состоит в следующем.

Объем потребления природного газа существенно зависит от нагрузки котла, *КПД* и объема потребляемого вторичного энергетического ресурса, в данном случае – доменного газа. Увеличение объема потребляемого доменного газа ограничивают его низкие топливные характеристики и аэродинамические характеристики котла. Вследствие переменного давления и низкой калорийности доменного газа его сжигание происходит при повышенном объеме подачи воздуха, который носит переменный характер. В этих условиях снижается *КПД* котла. Если организовать экстремальное регулирование подачи воздуха по критерию максимума *КПД*, то объем подачи воздуха будет снижен до оптимальной величины. В результате аэродинамический объем котла увеличится, что позволит увеличить объем сжигаемого доменного газа и снизить потребление природного газа. Что касается снижения нагрузки котла, это достигается за счет энергосберегающих мероприятий на стороне потребителей. Как следует из энергетической характеристики котла, представленной ранее на рис. 2, снижение нагрузки котла приводит к относительному росту потребления доменного газа и снижению потребления природного газа.

Задача экстремального регулирования эффективности энергетических котлов по текущему *КПД* была исследована на кафедре автоматике и управления ЮУрГУ (НИУ).

Рассмотрим задачу снижения объема потребления природного газа, как покупного энергетического ресурса за счет утилизации вторичных энергетических ресурсов. В качестве вторичного энергетического ресурса используется доменный газ, калорийность которого примерно в 10 раз ниже калорийности природного газа. В этом случае ограничивающим условием для увеличения подачи доменного газа в котельную установку является разрежение в топке  $S_T$ , которое не должно выходить за рамки технологических допусков  $S_T^{\min}$ ,  $S_T^{\max}$ .

Рассмотрим вопрос снижения объема потребления покупных энергетических ресурсов (в данном случае природного газа) за счет использования вторичных энергетических ресурсов. Для определенности будем полагать, что в качестве вторичного энергетического ресурса

используется доменный газ, калорийность которого примерно в 10 раз ниже калорийности природного газа. В этом случае ограничивающим условием для увеличения подачи доменного газа в котельную установку является разрежение в топке  $S_T$ , которое не должно выходить за рамки технологических допусков  $S_T^{\min}$ ,  $S_T^{\max}$ .

Структурная схема автоматической системы экстремального регулирования разрежения в топке приведена на рис. 4.

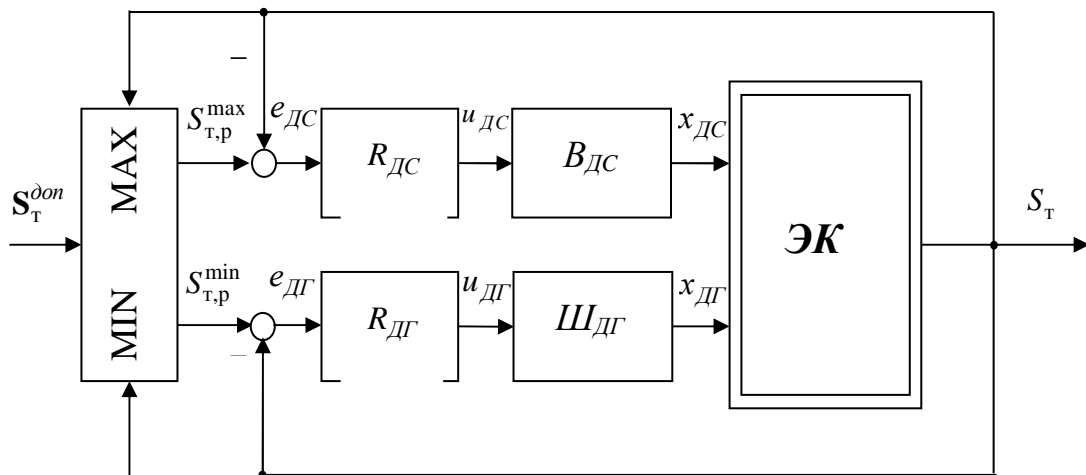


Рис. 4. Автоматическая система экстремального регулирования разрежения в топке котла

Приведенная система состоит из двух контуров регулирования: контура регулирования вентилятора дымососа  $B_{ДС}$  и контура регулирования подачи доменного газа с использованием шиберов доменного газа  $Ш_{ДГ}$ .

Контур регулирования подачи доменного газа осуществляет стабилизацию подачи газа на максимально возможном уровне. При этом разрежение в топке котла падает вследствие низкой калорийности доменного газа. Поэтому задающим воздействием для данного контура является минимальный расчетный уровень  $S_{T,p}^{\min}$ , обеспечивающий выполнение ограничения снизу  $S_T^{\min}$  на допустимые значения колебаний разрежения  $x_{ДС}$ .

Контур регулирования вентилятора дымососа непосредственно влияет на разрежение в топке. С целью увеличения подачи доменного газа вентилятор дымососа должен развивать максимальную производительность, допустимую по технологическому ограничению разрежения в топке  $S_T^{\max}$ . Задающим воздействием для данного контура является максимальный расчетный уровень  $S_{T,p}^{\max}$ , обеспечивающий выполнение ограничения сверху  $S_T^{\max}$  на допустимые значения колебаний разрежения  $x_{ДС}$ .

Расчет задающих воздействий  $S_{T,p}^{\min}$ ,  $S_{T,p}^{\max}$  исходя из заданных технологических ограничений на разрежение в топке  $S_T^{\text{don}} \in \{S_T^{\min}, S_T^{\max}\}$ , осуществляется в блоке MINMAX (рис. 4). Алгоритм расчета может быть различным. Однако в любом случае он должен учитывать максимальные и

минимальные значения колебаний разрежения. На рис. 5 приведена иллюстрация одного из способов оценки указанных величин. Оценки здесь выполняются по тактам. На каждом такте осуществляется идентификация максимума и минимума разрежения (пунктирные линии). Полученные величины выдаются в качестве оценок на последующем такте (сплошные линии). Указанный процесс итеративно повторяется. При этом на каждом такте одновременно происходит как идентификация текущих значений максимума и минимума, так и выдача соответствующих величин, полученных на предыдущем такте, в качестве оценок. Если текущие величины максимума и минимума выходят за рамки используемых оценок, полученных на предыдущем такте, то в качестве оценок принимаются текущие величины. В итоге формируются текущие оценки максимума и минимума разрежения. При этом длительность тактов идентификации величин максимума и минимума определяется исходя из динамики процессов в системе по критерию минимума потребления природного газа.

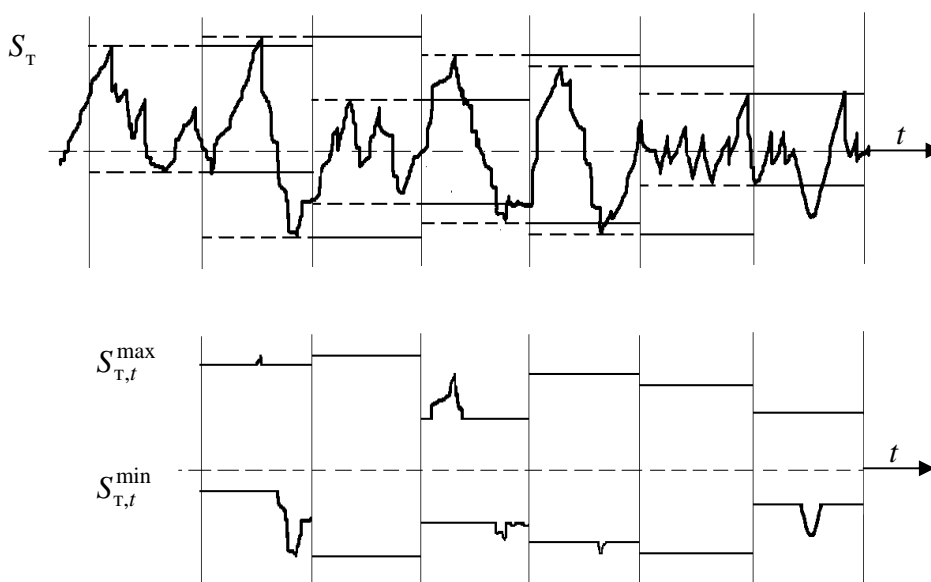


Рис. 5. Схема определения текущего максимума и минимума разрежения  $S_T$

Минимальный и максимальный расчетные уровни величин разрежения определяются соотношениями

$$S_{T,p}^{\min} = S_T^{\min} + \Delta S_{T,t}, \quad S_{T,p}^{\max} = S_T^{\max} - \Delta S_{T,t}, \quad \Delta S_{T,t} = 0,5(S_{T,p}^{\max} - S_T^{\min}). \quad (1)$$

Целевое назначение энергетического котла - снабжать потребителей тепловой энергией, заключенной в теплоносителе определенных параметров. В рассматриваемом случае для конкретности будем полагать, что целевым назначением котла является снабжение потребителей паром определенной температуры  $t_{II,0}^{\circ}$  и давления  $P_{M,0}$ . В этом случае система автоматического регулирования указанных параметров будет иметь структуру, представленную на рис. 6.

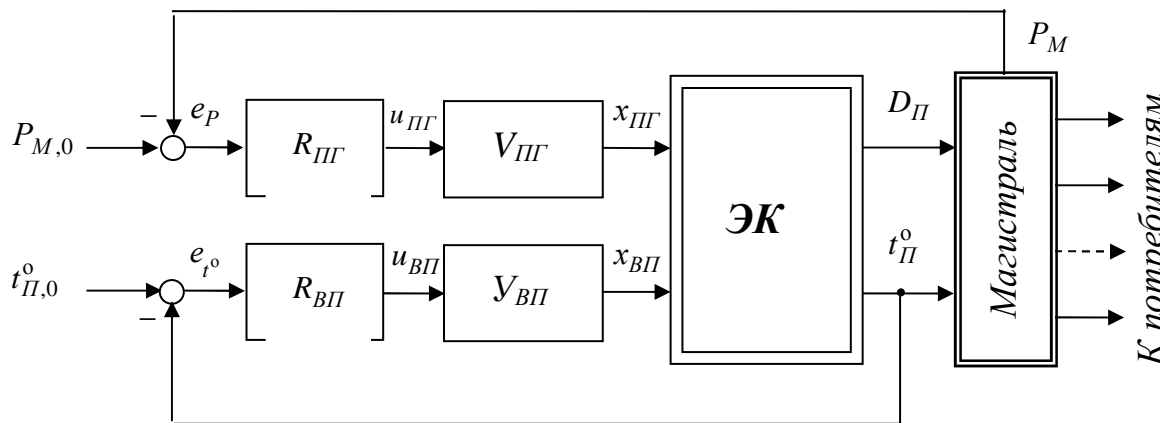


Рис. 6. Система автоматического регулирования выходных параметров котла

Здесь поток пара  $D_{П}$  температуры  $P_M$  поступает в паровую *магистраль*, из которой уже потоки пара отбираются *потребителями*. Давление в магистрали  $D_{П}$  является одним из базовых режимных параметров магистрали, обеспечивающих снабжение паром потребителей. Для поддержания заданного уровня давления в магистрали  $t_{П,0}^o$  используется специальный контур регулирования подачи природного газа в топку котла. Увеличение подачи природного газа ведет к повышению выработки

7+пара и, соответственно, к повышению давления в магистрали. В качестве исполнительного механизма здесь используется регулируемый вентиль природного газа  $V_{ПГ}$ . Второй контур регулирования осуществляет стабилизацию температуры пара на выходе котла  $P_M$  на заданном уровне  $t_{П,0}^o$ . В качестве исполнительного механизма здесь используется устройство впрыска конденсата воды пониженной температуры  $Y_{ВП}$ .

В целом, подводя итог рассмотрению задачи снижения потребления первичных энергетических ресурсов на основе использования вторичных ресурсов, отметим, что для этой цели в котельных установках, как минимум, необходимо использовать следующие контуры автоматического регулирования - по подаче исходных топливных ресурсов, воздуху, разрежению в топке и выходным режимным параметрам. При этом для оптимизации режимов необходимо использовать системы экстремального регулирования по подаче воздуха и разрежению в топке. Приведенные структуры систем автоматического регулирования могут быть использованы не только в котельных установках, но и в технологических процессах более широкого класса, где в основе теплотехнических процессов лежит сжигание топлива.

### 3. Управление режимами технологического пароснабжения

В настоящее время управление режимами технологического пароснабжения осуществляется с помощью автоматизированных систем диспетчерского управления, которые выполняют функции сбора, накопления и представления на ЭВМ информации о параметрах теплоносителя на

источниках, в магистральных трубопроводах и у крупных потребителей. Для повышения эффективности управления теплоснабжением целесообразным является проведение оперативного анализа текущих режимов функционирования паровых и тепловых сетей на основе математического моделирования.

Современные системы паро- и теплоснабжения крупных промышленных предприятий являются сложными системами, состоящими из большого количества абонентов сетей, а сами сети распределены на большой территории – десятки километров. Известные подходы к анализу режимов подобных сложных систем основаны на разработке математической модели реальной системы с помощью специализированного программного обеспечения. Сложность построения таких моделей на практике для крупных паровых и тепловых сетей состоит в необходимости получения большого объема данных, включающих детальные характеристики трубопроводов (длины, диаметры, шероховатость, зарастание трубопроводов и т.д.) и потребителей, является трудоемким, и для ряда случаев практически не реализуемо.

Для оперативного анализа режимов работы разработанная модель должна учитывать текущие фактические значения параметров теплоносителя в различных точках системы паро- и теплоснабжения и позволять оперативно рассчитывать режимы в случае оперативных переключений, что накладывает дополнительные требования к сходимости используемых математических методов, объему данных и скорости вычислений, и может быть достигнуто за счет повышения эффективности алгоритмов вычисления и сокращения объема исходной информации.

В физическом представлении сети, которое предусматривает направление потоков ресурсов от источников к потребителям, обобщенная структура сети отражает процессы генерации, ветвления, слияния, передачи и потребления потоков энергетических ресурсов. Типовыми методами расчета сетей в физических представлениях являются метод узловых напоров и метод контурных потоков. При расчетах параметров потоков в подобных сетях, которые могут содержать тысячи узлов, недостатком является необходимость решения систем нелинейных уравнений большой размерности. Построение моделей крупномасштабных сетей является весьма трудоемкой задачей. Для оперативного управления подобными сетями требуется решать в реальном времени задачи идентификации параметров сети и задачи управления потоками. Для оперативного решения указанных задач в работе предлагается использовать сигнально-ориентированные макро-представления сетей.

Одним из центральных элементов паровой сети является паровой аккумулятор. Расчет парового аккумулятора осуществляется совместно с присоединяемыми к нему элементами сети. На рис. 7 приведена обобщенная расчетная схема аккумулятора.

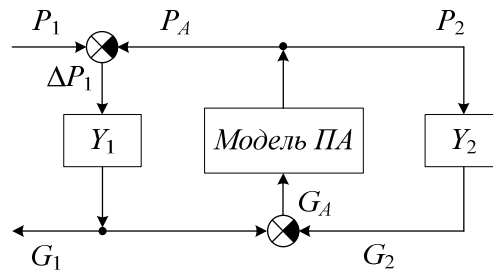


Рис. 7. Обобщенная расчетная схема аккумулятора

На рис.7:  $P_1$ ,  $P_2$  – 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.8 приведена структурная схема макромодели парового аккумулятора.

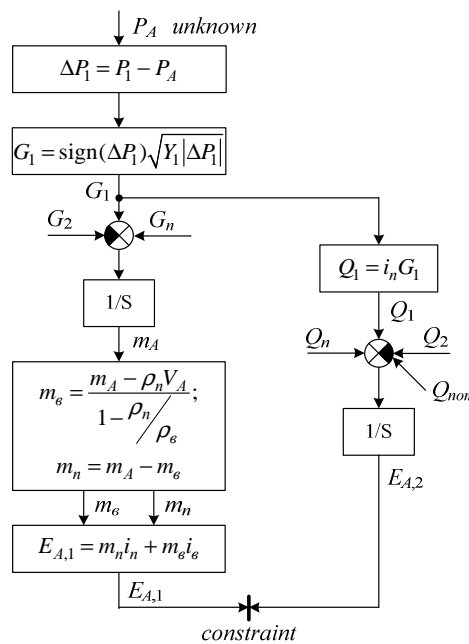


Рис.8. Структурная схема макромодели парового аккумулятора

На рис. 9 приведена макромодель управления процессами заряда-разряда парового аккумулятора. Здесь приняты следующие обозначения:  $P_{A0}$  – максимальное допустимое значение давления пара в паровом аккумуляторе;  $\Delta P_A$  – разность  $P_{A0}$  и  $P_A$ ;  $Reg$  – пропорционально-интегральный регулятор;  $G_{св}$  – расход пара на свече;  $G_{ОКГ}$  – расход пара от котлов ОКГ.

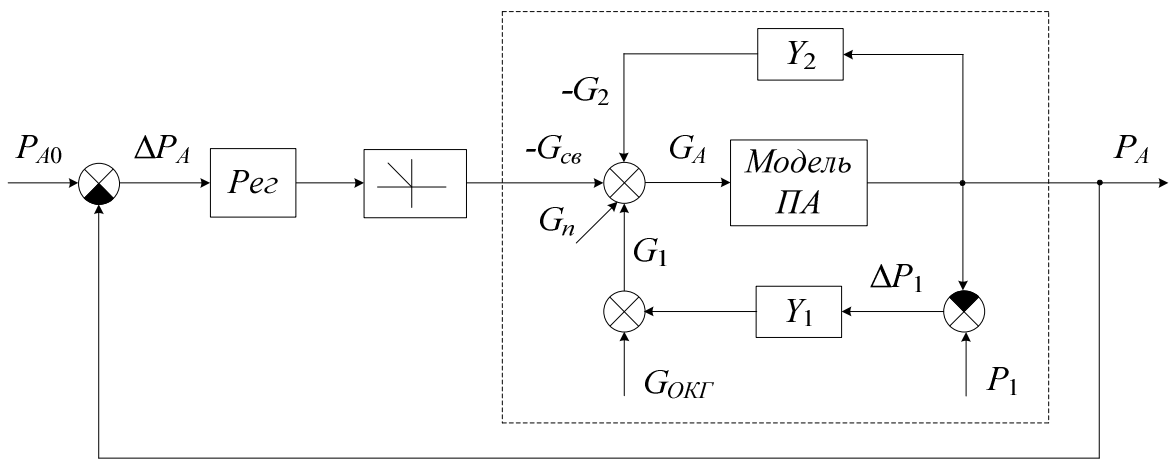


Рис. 9. Макромодель СУ зарядно-разрядными процессами ПА

В рассматриваемой СУ регулируемым параметром является давление пара в аккумуляторе. Разница между максимально допустимым значением давления пара в аккумуляторе и текущим значением давления пара  $\Delta P_A = P_{A0} - P_A$  подается на регулятор *Reg*. 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  $P_{A0}$ ,  $\Delta P_A$  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.

С использованием рассмотренных выше методик разработана программная макромодель системы паро- и теплоснабжения промплощадки ОАО «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. В макромодели отдельно выделены наиболее энергоемкие потребители теплофикационной воды и пара. Остальные потребители тепла представлены в виде обобщенных групп (сетевых районов). Разработка программной макромодели осуществлялась в среде моделирования и визуализации VisSim.

Для иллюстрации на рис. 10 приведен видеокادر макромодели системы паро- и теплоснабжения. На рис. 10 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.

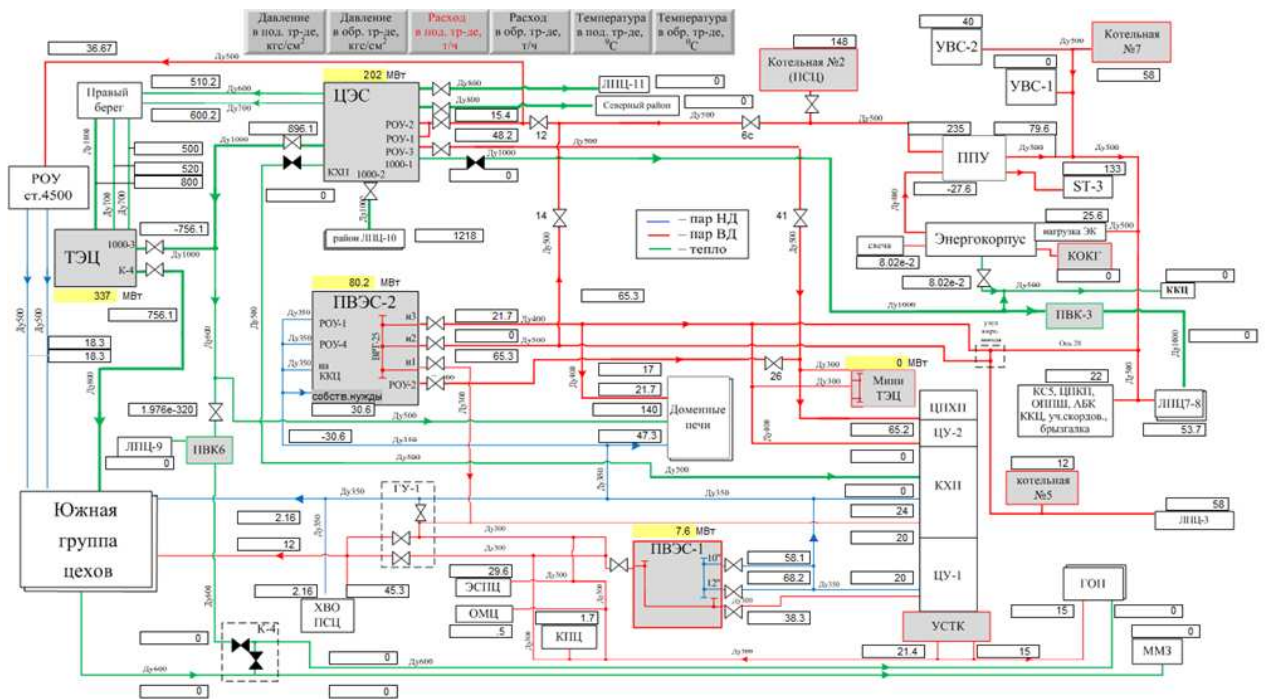


Рис. 10. Видеокادر макромодели системы паро- и теплоснабжения

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) с учетом режимов отпуска тепловой энергии в зависимости от фактических гидравлических режимов работы паровых и тепловых сетей.

## Выводы



1. Повышение энергетической эффективности металлургического производства может быть достигнуто на основе системной организации управления эффективностью металлургического предприятия с использованием концепции энергосберегающей станции-регулятора. На основе данной концепции на примере промышленной площадки ОАО «ММК» проведен системный анализ целей и задач интегрированного планирования и управления энергетической эффективностью теплоэнергетического комплекса металлургического производства с использованием данной концепции.

2. В качестве энергосберегающей станции-регулятора металлургического производства целесообразно использовать электрическую станцию, утилизирующую вторичные энергетические ресурсы. Предложены структура и функциональные алгоритмы автоматизированной системы управления эффективностью энергосберегающей станции-регулятора.

3. Предложенный подход к интегрированному планированию и управлению энергоемкостью технологических процессов металлургического производства внедрен в практику управления эффективностью теплоэнергетического комплекса ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

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. м<sup>3</sup>/ч), на главном регуляторе на 5 % (3,8 тыс. м<sup>3</sup>/ч);

- расход природного газа при тепловом режиме котла без химического недожога снизился соответственно в базовом режиме на 11% (0,73 тыс. м<sup>3</sup>/ч), на главном регуляторе на 7% (0,47 тыс. м<sup>3</sup>/ч).

В результате экономия природного газа на 1 котле ст.№5 составила 2 558 тыс.м<sup>3</sup> в год.

#### **Библиографический список**

1. Lovins A. *The Negawatt Revolution*. // *The Conference Board Magazine "Across the Board"*, Vol. XXVII No. 9, 1990, pp. 18-23.

2. Eyre N. *Energy saving in energy market reform—The feed-in tariffs option* // *Energy Policy Volume 52*, 2013, pp. 190–198.

3. Joskow, P.L. *What does a negawatt really cost? Evidence from utility conservation programs* / P.L. Joskow, D.B. Marron // *Energy*, 1992, J.13(4), pp. 41–74.

4. Steinberger J. K., J. van Niel, Bourg D. *Profiting from negawatts: Reducing absolute consumption and emissions through a performance-based energy economy*. / J. K. Steinberger, J. van Niel, D. Bour // *Energy Policy*, Volume 37, Issue 1, January 2009, pp. 361-370

5. Kazarinov, L.S. *Method of Multilevel Rationing and Optimal Forecasting of Volumes of Electric Energy Consumption by an Industrial Enterprise* / L.S. Kazarinov,

*T.A. Barbasova, O.V. Kolesnikova, A.A. Zakharova // Automatic Control and Computer Sciences, 2014, Vol. 48, No. 6, pp. 324–333.*

### References

1. Lovins A. The Negawatt Revolution. *The Conference Board Magazine “Across the Board”*, 1990, Vol. XXVII No. 9, pp. 18-23.
2. Eyre N. Energy Saving in Energy Market Reform – The Feed-in tariffs Option. *Energy Policy*, 2013 Vol. 52, pp. 190–198. DOI: 10.1016/j.enpol.2012.07.042
3. Joskow, P.L., Marron, D.B. What Does a Negawatt Really Cost? Evidence from Utility Conservation Programs. *Energy*, 1992, J.13(4), pp. 41–74.
4. Steinberger J. K., J. van Niel, Bourg D. Profiting from Negawatts: Reducing Absolute Consumption and Emissions through a Performance-based Energy Economy. *Energy Policy*, 2009, Vol. 37, Issue 1, pp. 361-370. DOI: 10.1016/j.enpol.2008.08.030
5. 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

*Барбасова Татьяна Александровна – доцент кафедры автоматизации и управления, к.т.н., tatyana [barbasova@mail.ru](mailto:barbasova@mail.ru)*

*Barbasova Tatiana Alexandrovna – PhD, associate professor of Automation and Control department of SUSU; tatyana [barbasova@mail.ru](mailto:barbasova@mail.ru)*