УДК 658.26-52

**С.Л. Стасевский¹, А.А. Щербаков¹, Б.Н. Вишневский¹, Г.П. Войтковский¹,
Т.О. Капустина¹, А.А. Цуканов², А.С. Лебедев³**

1 Государственное предприятие «Украинский государственный институт по проектированию металлургических заводов»

2 Приднепровская Государственная Академия строительства и архитектуры

3 ПАО «Запорожсталь»

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ МЕТАЛУРГИЧЕСКОЙ ЭНЕРГЕТИКОЙ

В статье приведены схемы, режим работы и основные возможности предложенной авторами автоматизированной трехуровневой системы оперативного управления металлургической энергетикой, которая охватывает все технологические и энергетические агрегаты предприятия. Разработаны математическое и организационное обеспечение системы управления, а также алгоритм имитационного моделирования агрегатов и цехов предприятия. На примере предприятия с полным металлургическим циклом и годовым потреблением топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) 9 млн. т условного топлива показано, что применение разработанной системы управления позволяет сократить потребление ТЭР на 5 % и обеспечить годовой экономический эффект до 100 млн. \$/год.

DOI: 10.34185/0543-5749.2020-2-20-41

Постановка проблемы

В настоящее время в связи с ростом мировых цен на первичные виды топлива (нефть, природный газ и др.) и на производные от них вторичные виды энергии и энергоносители (электроэнергия, тепло, пар и др.) вопросы экономии топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) приобретают все возрастающее значение. Несмотря на эпизодические колебания этих цен в связи с мировыми экономическими кризисами и по другим причинам, экономия ТЭР становится определяющим фактором энергетической политики любого государства. Эта экономия может быть достигнута за счет применения современных энергосберегающих технологий и оборудования, утилизации вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) и вторичных горючих газов (ВГГ), а также автоматизацией управления металлургической энергетикой с оптимизацией оперативного топливно-энергетического баланса (ОТЭБ) предприятия.

Изложение основного материала

В [1] приведена концепция создания автоматизированной системы (АС) формирования и оптимизации топливно-энергетического баланса (ТЭБ) комбината полного металлургического цикла (КПМЦ), т.е. предприятия, имеющего в своем составе агломерационное, доменное, сталеплавильное, прокатное производства, а также необходимые конечные переделы металлопродукции и соответствующую промышленную энергетику, включающую теплосиловое, газовое, электротехническое, кислородно-компрессорное и водное хозяйства.

Для функционирования такой АС необходимо иметь математическое обеспечение, базирующееся на энерготехнологической модели предприятия и энерготехнологических характеристиках (ЭТХ) агрегатов, выражающих зависимости между их производительностью и расходом ТЭР. ЭТХ по предложению авторов должны быть аппроксимированы полиномами второй степени.

В [2] показано, что такая аппроксимация обеспечивает их большую точность по сравнению с линейными уравнениями, и удобство решения системы уравнений второго порядка, когда требуется нахождение первых производных (например, по методу неопределенных множителей Лагранжа или при использовании градиентных методов).

ГП «Укрگیпромез» и авторы занимаются данной проблемой с 1969 года – см. публикации [3 – 10] и др.

Известны следующие автоматизированные системы управления (АСУ) на металлургических предприятиях (действующие системы, опубликованные разработки и концепции).

В [3] изложены основные принципы и описан алгоритм имитационного моделирования цеховых систем предприятий черной металлургии на примере разработанной институтом «НИИА-Чермет» (г. Днепропетровск) еще в 1969 – 1973 гг. системы оперативного сменно-суточного планирования и управления трубопрокатным цехом № 5 Первоуральского Новотрубного завода. В 1973 г. в цехе была внедрена система автоматизированного учета продукции и хода производственного процесса – цеховой регистратор, который обеспечил автоматический ввод учетной информации в память тогдашней ЭВМ «Минск 32».

Успешная эксплуатация названной системы, начиная с 1974 г., подтвердила ее надежность и гибкость при изменении технологии, состава оборудования, номенклатуры товарной продукции и нормативной базы.

В [11] рассматриваются вопросы уменьшения затрат на энергию в черной металлургии на примере металлургических заводов «Крупн Шталь» в Бохуме и Райнхаузене (Германия). Указываются «необходимые предпосылки для создания функционирующей системы управления расходом энергии» на металлургическом заводе: наличие современного центрального пульта управления источниками энергии; применение имитирующих математических моделей и управляющих ЭВМ; полная регистрация всех материальных и энергетических потоков. Конкретно для указанных заводов была разработана АСУ, основанная на следующих принципах: математическое моделирование энерготехнологических установок; использование при аналитической разработке модели известных законов физики и химии, с помощью которых можно описать функциональное и динамическое поведение установки; проверка и, при необходимости, после подгонки получение статической либо динамиче-

ской модели; проведение при помощи имитационной модели имитирующих и оптимизирующих расчетов; при помощи математической модели ход металлургического процесса встраивается в систему управления расходом энергии так, что отклонения от заданного расхода энергии могут быть выявлены на ранней стадии и своевременно исправлены воздействием соответствующего управления; применение блочной структуры моделей.

Эти идеи и принципы во многом перекликались в то время с предложениями ГП «Укрگیпромез» и авторов, изложенными, в частности, в [1].

Следует также отметить работы проф. А. Зембика (Шльонская Политехника, г. Гливице, Польша), изложенные в [12].

В [1] также дан анализ АСУ по состоянию на 1993 г. С 1993 г. и до настоящего времени развитие АСУ продолжалось как отдельными авторами, так и фирмами-поставщиками металлургического оборудования. Здесь следует отметить работы д.т.н. Султангузина И. А. (РФ), при участии которого получили дальнейшее развитие системы «ОПТИМ», «ENERMK», упомянутая в [1], а также разработана и внедрена через ЗАО «Научно-технический центр «ЛАГ Инжиниринг», г. Москва, программно-информационная система «ОптиМет», оптимизирующая структуру металлургического производства и его сырьевую базу по 240 независимым оптимизируемым параметрам и по различным критериям оптимизации (согласно материалам указанного ЗАО).

В [13] авторы констатировали: «Несмотря на явный прогресс в автоматизации металлургического производства, связанный с использованием компьютерной технологии и созданием на ее базе АСУ ТП, необходимо отметить, что эффективность применения таких систем не отвечает современным требованиям к качеству управления металлургическими агрегатами. Эти требования предполагают необходимость перехода от использования отдельных локальных АСУ ТП к созданию общей системы управления металлургическими агрегатами, способной непрерывно функционировать при различных режимах их работы, т.е. практически полное время действия агрегата».

Была предложена «интеллектуальная» АСУ ТП, которая содержит координатный и параметрический контуры. Первый из них предназначен для регулирования (стабилизации) «координаты» объекта (например, температуры и химического состава чугуна в доменной плавке,

механической прочности готового агломерата с использованием соответствующих координатных управляющих воздействий). В параметрическом контуре осуществляется диагностирование текущего состояния агрегата, выявляются возможные причины ухудшения его работы, установка или корректировка параметрических управлений для ликвидации намечающегося или развивающегося расстройства технологического процесса. Первые образцы таких «интеллектуальных» АСУ ТП были внедрены на доменных печах №№ 1, 2, 6, 7, 8, 10, на агломашинах №№ 5, 6, 14, 16 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ММК), а также на доменной печи № 1 ОАО «Западно-Сибирский металлургический комбинат».

В [14] описано применение фирмой «Voest-Alpine Industrieanlagenbau» (VAI), Австрия, имитационного моделирования для конкретного случая охлаждения конвертерного газа в водогрейном охладителе. В [15] описана система оптимизации энергопотребления дуговой электросталеплавильной электропечи (ДСП), а в [16] – интегрированная автоматизированная система управления выработкой и потреблением тепловой энергии.

В [17] изложены принципы функционирования систем энергетического менеджмента для металлургических заводов, которые в определенной степени являются прообразом использования имитационного моделирования.

Согласно [18] предполагается, как перспектива на XXI век, «... поэтапное построение интегрированной системы управления всей производственной цепочкой – от поставщиков сырья и материалов до конечного потребителя, включающей самые современные разработки, как, например, информационные технологии, производственное планирование или искусственный интеллект», что «... должно дать возможность глобального улучшения производства и потребления энергии, а также получения дополнительных экологических преимуществ».

В [19] также в постановочном плане было подчеркнуто, что: «Функционирование крупного металлургического предприятия требует разработки и внедрения интегрированной компьютерной системы управления, которая обеспечивала бы экономическую устойчивость предприятия в сложных условиях рынка».

Она предназначена для формирования оптимальной производственной программы на заданный период времени, расчета потребности во всех видах ресурсов на производство, планирования

объемов прибыли от реализации прокатной продукции. Критерием оптимальности производственной программы служит достижение максимально возможной прибыли от реализации продукции при заданных ограничениях на производственные мощности агрегатов и технологические маршруты, а также на расход материалов, сырья и ТЭР.

В [20] описаны лишь концептуальные особенности формирования корпоративной информационной системы (КИС) металлургического предприятия, стратегическая задача которой – обеспечить максимальную прибыль за счет экстремальной оптимизации всех сфер его деятельности.

Действующие, разработанные и концептуально предложенные АСУ имеют следующие основные недостатки:

1. Отсутствие универсальности. Сложилась ситуация, когда фирмы-поставщики основного металлургического оборудования («SMS Group», «Siemens», «Danieli», японские, китайские и др. фирмы), а также вспомогательного оборудования поставляют вместе с ним АС управления соответствующим технологическим процессом (АСУ ТП). При этом каждая фирма имеет свои принципы и схемы разработки АСУ ТП, компоненты оборудования автоматизации и т.д. Эти АС являются локальными, и не могут быть использованы для другого оборудования или для всего предприятия. В связи с вышеуказанными особенностями АСУТП поставщиков оборудования в [20] отмечается: «Закупаемая вычислительная техника... и программное обеспечение... быстро морально стареют, вынуждая предприятие вкладывать дополнительные средства в их модернизацию...», «... средства оптимизации поставщики предпочитают заказчикам не раскрывать. Локальные модули оптимизации, как правило, поставляются с закрытым программным кодом, быстро морально устаревают, поскольку не могут корректироваться специалистами предприятия при изменении условий производства». В статье делается заключение, что «без универсальных оптимизационных средств КИС представляет собой просто набор дорогостоящего инструментария».

2. Система, предложенная для немецких заводов, согласно [11] не получила дальнейшего распространения на других предприятиях из-за указанных выше конкретных разработок фирм-поставщиков металлургического оборудования.

3. В [12] проф. А. Зембик резонно отмечал, что «для оперативного управления энергохозяйст-

вом промпредприятия необходимо формирование и оптимизация балансов для коротких временных промежутков, таких, как сутки и смена...». Однако, при этом в качестве исходных данных для формирования этих балансов автор предлагал среднечасовые значения величин энергопотребления по видам энергоресурсов и типам оборудования. Полученные на их основе графики предлагалось использовать при оптимизации процессов энергоснабжения. Однако, фактические графики энергопотребления, как правило, существенно отличаются резкими «пиками» и «провалами» при равенстве среднечасовых величин. В результате график энергоснабжения оказывается далеко не оптимальным. Поэтому вместо задания среднечасовых графиков следует провести имитационное моделирование работы металлургического оборудования в оптимальных режимах энергопотребления, что позволит получить оптимизированные сменные и суточные графики, в соответствии с которыми и будет проводиться имитационное моделирование работы энергетических цехов.

4. Что касается работ д.т.н. Султангузина И. А. и ЗАО «Научно-технический центр «ЛАГ Инжиниринг», то, как нам представляется, оптимизация работы предприятия по 240 независимым критериям согласно системе «ОптиМет» аналогично более ранней системе «ENERMK» требует применения матричного метода с разработкой программного обеспечения для каждого отдельного предприятия, что во многом лишает ее универсальности.

Нами предлагается «Автоматизированная система оперативного управления металлур-

гической энергетикой» («АСОУМетЭнерго»), которая устраняет указанные недостатки и в своем наиболее общем виде обеспечивает: экономию ТЭР посредством оптимального распределения видов ТЭР между потребителями с учетом их ЭТХ; решение вопросов замены дорогих ТЭР более дешевыми, а также замены ТЭР, имеющих высокие удельные экологические затраты, на ТЭР, у которых эти затраты ниже; первоочередную загрузку агрегатов, имеющих лучшие ЭТХ, т. е. потребляющих меньше ТЭР на производство единицы продукции, если это возможно по условиям производства; оптимальное распределение нагрузки и ТЭР между агрегатами теплоэлектроцентрали-паровоздуховой станции (ТЭЦ-ПВС) и кислородной станции.

При разработке соответствующего программного обеспечения и подпрограмм она позволит: формировать материальный, частные и сводный балансы ТЭР; оптимизировать сводный ТЭБ по различным критериям (минимум покупных ТЭР, минимум загрязнения атмосферы, максимум прибыли, минимум затрат и др., а также в их совокупности); рассчитывать энергоемкость производства по промежуточным переделам и на конечную продукцию); вести прогнозное проектирование; оперативно решать вопросы управления энерготехнологической системы (ЭТС) предприятия, т. е. быть помощником диспетчера, работая в реальном времени; моделировать аварийные ситуации и др. Ниже приведены предложения, а также способы, методы, возможности и особенности реализации «АСОУМетЭнерго».

Ее структурная схема представлена на рис. 1.

Рис. 1. Структурная схема «АСОУМетЭнерго»

«АСОУМетЭнерго» является логическим продолжением и усовершенствованием разработанной в 90-х г.г. АС «ЭНТОПОС» – см. [1].

В предлагаемой «АСОУМетЭнерго» состав КППЦ включает в себя все необходимые переделы и вспомогательные хозяйства. Перечень ТЭР принят с максимальным охватом всех их видов: **покупные** – природный газ, кокс, уголь различных сортов, электроэнергия и др.; **ВГГ** – доменный газ, коксовый газ, конвертерный газ, ферросплавный газ; **горючие отходы собственного производства** – маслосодержащие, прочие горючие отходы; **энергоносители** (которые частично получаются из первых трех групп ТЭР) – пар различных параметров, тепло на отопление, вентиляцию (ОВ), химочищенная вода, питательная деаэрированная вода, холодное дутье для доменных печей, сжатый воздух и др.; **ВЭР** – пар различных параметров от котлов-утилизаторов (КУ) и систем испарительного охлаждения (СИО) технологических агрегатов и др.; **ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ**, выработанная ТЭЦ-ПВС на паре за счет сжигания ВГГ, на паре КУ и СИО, а также детандерами доменного газа (ДДГ) за счет использования энергии его давления на колошнике доменной печи.

Структура оптимизационной модели принята следующей. КППЦ рассматривается для трех уровней: 1 уровень – агрегаты, как структурные единицы цеха (нумерация строчными буквами: собственно агрегаты – j; ТЭР – i); 2 уровень – цехи, производства, хозяйства в целом, ЭТХ которых создаются на основе информации системы учета (нумерация заглавными буквами: потребители – J; ТЭР – I); 3 уровень – все предприятие (нумерация та же, что и во 2 уровне).

Оптимизация ведется на первом уровне в процессе имитационного моделирования предстоящих: смены, суток и 3-х суток.

Практически неограниченные возможности современной вычислительной техники по быстрдействию и объемам оперативной памяти позволяют в реальном времени управлять ЭТС металлургического производства с минимизацией удельных затрат ТЭР на каждом агрегате технологической цепи. Для этого операторы, управляющие технологическими процессами всех агрегатов, перед сменой получают оптимизированные графики энергоиспользования, а система оперативного учета должна обеспечить автоматическое слежение в реальном времени за их выполнением. При отклонениях энергопотребления более чем на 5 % автоматически проверяются и корректируются ЭТХ агрегатов и графики энергопотребления.

На первом уровне «АСОУМетЭнерго» оперативное сменно-суточное управление энергетикой каждого цеха функционирует в реальном времени.

Получая от второго уровня трехсуточные плановые задания по производству металлургической продукции, цеховые системы путем имитационного моделирования работы каждого агрегата и цеха в целом рассчитывают сменно-суточные графики их работы и соответствующие им графики потребления и генерации ТЭР. При этом оптимизируются расходы ТЭР каждым агрегатом и распределение ТЭР между агрегатами. Суммированием во времени графиков энергопотребления и выработки энергоресурсов всеми агрегатами по видам ТЭР получают сменно-суточные графики их потребления и выработки цехом.

Создание «АСОУМетЭнерго» начинается с разработки и поэтапного внедрения цеховых систем учета, которые должны вести в реальном времени сбор и обработку фактической информации о потреблении и выработке всех видов ТЭР, а также о ходе технологических процессов. Цеховые системы учета усредняют на шестиминутных интервалах фактические расходы и выработку каждого вида ТЭР и в реальном времени передают эту информацию на второй уровень. Функционирование цеховых систем учета ТЭР решает вопрос получения ЭТХ агрегатов, участков, цехов и предприятия в целом. Отдельные агрегаты и производственные участки общезаводского подчинения включены (условно) в состав цехов с родственными технологиями – агрегат j, а остальные – объединены (тоже условно) в один цех J.

Кроме того, каждому цеху вместе с производственной программой выделяются мощности ТЭР на общецеховые нужды: технологический транспорт, работу кранового оборудования и др.; на отопление, вентиляцию, ГВС, кондиционирование и освещение; на вычислительную и организационную технику; на столовую и другие административные и хозяйственно-бытовые нужды. Эти потребляемые цехом мощности ТЭР учитываются как расходуемые условным агрегатом j. При сменно-суточном имитационном моделировании производственно-технологического процесса цеха названный условно «административно-бытовой» агрегат учитывается, как и основные агрегаты цеха. Графики расхода мощностей ТЭР этого агрегата принимаются как среднестатистические за прошлые периоды с учетом сезона, времени суток, погоды и т. п. В этих графиках должны указываться среднечасовые мощности

расхода ТЭР. Цеховые системы оперативного учета в реальном времени накапливают информацию о состоянии агрегатов, которая необходима и является исходной для начала в любой момент имитационного моделирования энерготехнологических процессов цеха.

Суть имитационного моделирования согласно [3, 21, 22, 23] состоит в представлении хода технологического процесса на каждом агрегате в виде последовательности временных интервалов выполнения операций, порядок и длительность которых определяется технологией металлургического и энергетического производства и потребления (использования) ТЭР.

Состояние моделируемой системы в любой момент времени определяется совокупностью состояний каждого агрегата цеха, который может:

- 1) выполнять очередную технологическую операцию;
- 2) простаивать по различным причинам.

Особо выделяются простои в ожидании загрузки на выполнение очередной технологической операции. Момент времени начала ожидания загрузки в [3] и [21] назван особым состоянием агрегата и для упорядоченного перечня времен перехода каждого агрегата цеха через особое состояние введено понятие вектора (матрицы) состояния системы, который записывается в виде строки:

$$Y = Y(y_1; y_2; \dots y_j; \dots y_m), \quad (1)$$

где y_j – момент времени перехода j -го агрегата через особое состояние; j – номер агрегата; m – количество агрегатов в цехе.

Алгоритм и, соответственно, вектор состояния, описанные в [3] и [21], предназначены для имитационного моделирования только «металлургической» стороны технологических процессов, реализуемых агрегатом, а «энергетическая» сторона технологических процессов там не рассматривается. В указанных алгоритме и векторе состояния агрегат представляется как объект с одним входом и одним выходом.

А в цехах есть агрегаты, использующие ТЭР: с одним входом и одним выходом; с несколькими входами и одним выходом; с одним входом и несколькими выходами; с несколькими входами и несколькими выходами; генерирующие ТЭР; использующие и генерирующие ТЭР. Только перечисленное разнообразие видов агрегатов и необходимость усреднять мощности на шестиминутных интервалах, запоминание их величин и времен всех скачков потребления по различным видам ТЭР требуют существенных изменений в

структуре вектора состояния системы. Примерный макет структуры вектора состояния системы показан на рис. 2. Он будет корректироваться, изменяться и дополняться алгоритмистом и программистом с учетом особенностей языка программирования и структуры информационных массивов имитационной модели. Изменение компонент вектора состояния системы отражает (имитирует, моделирует) хронологическую последовательность хода планируемых энерготехнологических процессов по каждому агрегату цеха, а, следовательно, и по цеху в целом. Сами технологические процессы имитируются отдельными уравнениями или системами уравнений, оформленными в виде подпрограмм, к которым происходит обращение имитационной модели при загрузке агрегата очередной партией продукции для ее обработки.

Цеховая система оперативного учета корректирует вектор состояния при переходе агрегата цеха через особое состояние. При этом, если агрегат был загружен и выполняет очередную технологическую операцию, то в соответствии с технологическими нормами затрат времени на выполнение операции уточняется время ее окончания, которое и записывается в массив вектора состояния системы. Она также уточняет и фиксирует фактический момент времени перехода агрегата через особое состояние, сравнивает его с таким же в сменном план-графике текущей смены и при обнаружении отклонений, превышающих допустимую величину, передает откорректированный вектор состояния в имитационную модель и запускает ее для корректировки план-графика текущей смены. Если агрегат не был загружен для выполнения следующей технологической операции, и поступила информация о причине и ожидаемой длительности его простоя Δt , то соответственно увеличивается j -компонента вектора состояния. Таким образом, вектор состояния системы всегда отражает текущие состояния агрегатов цеха так, что имитационное моделирование технологического процесса цеха может быть начато в любой момент без затрат времени на подготовку исходной информации о состоянии агрегатов (об их занятости или готовности выполнять очередную технологическую операцию), которая всегда хранится в массиве этого вектора. Порядок следования операций на каждом агрегате, определяемый технологией или задаваемый вторым уровнем «АСОУМетЭнерго» на трое суток, всегда записан в памяти имитационной модели. В памяти цеховой ЭВМ также всегда хранятся необходимые техно-

логические и энерготехнологические нормативы и графики плановых простоев агрегатов. Кроме того, там хранятся и периодически обновляются ЭТХ

агрегатов. При этом их необходимо аппроксимировать по информации автоматического учета фактического объема производства и энергозатрат.

Рис. 2. Примерный макет структуры вектора состояния системы

Алгоритм работы имитационной энерготехнологической модели цеха заключается в поиске минимальной компоненты вектора состояния системы и ее увеличении на периодически и автоматически корректируемую нормативную величину длительности очередной операции или простоя, определении и запоминании технологических и энергетических показателей процесса. При выходе всех компонент вектора состояния за пределы заданного интервала моделирования (например, смены, суток) моделирование прекращается.

Трехсуточные графики энергопотребления каждого агрегата и выработки ВЭР усредняются на шестиминутных интервалах и суммированием мощностей по каждому виду ТЭР сводятся в единые графики энергопотребления и выработки ВЭР в целом по цеху, которые поступают на второй уровень «АСОУМетЭнерго». Эти графики являются исходной информацией для формирования вторым уровнем «АСОУМетЭнерго» графиков-заданий энергетическим цехам на выработку энергоресурсов, а энергоснабжающим под-

разделениям – на поставку покупных ТЭР. В соответствии с полученными графиками-заданиями система нижнего уровня «АСОУМетЭнерго» цехов ТЭЦ, ПВС, ТЭЦ-ПВС, электровоздуховной станции (ЭВС), компрессорной, паровой и водогрейной котельных, кислородной станции начинают имитационное моделирование своей работы в течение тех же трех суток. При этом моделирование турбокомпрессорного цеха ПВС и кислородной станции должно опережать моделирование котельного цеха ТЭЦ и ТЭЦ-ПВС, водогрейной и паровой котельных, т.к. графики энергопотребления первых определяют графики-задания вторых. Нагрузка между агрегатами цехов всегда распределяется оптимально, т.к. в соответствии с общей нагрузкой на цех выбирается количество параллельно работающих агрегатов с оптимальной эквивалентной ЭТХ, которая получается при оптимальном распределении нагрузок и ТЭР между агрегатами.

Р. Шеннон названием своей известной книги [22] поставил вопрос: «имитационное моделирование – искусство или наука?». Опыт и практика

успешной разработки и внедрения имитационного моделирования в металлургию еще до издания этой книги позволяет, по нашему мнению, сказать: это и наука, и искусство, и творчество. Для создания имитационной модели нужна высокая квалификация и настойчивый творческий труд разработчиков. При этом есть необходимость и трудности глубокого осмысления, изучения и полного понимания работы объектов и течения процессов, которые необходимо моделировать, выделения и концентрации их свойств и особенностей, назначения критериев их функционирования, включая, при необходимости, оптимизацию. Вопросы оптимизации авторы предполагают рассмотреть в отдельной статье.

В названной монографии Р. Шеннон рассмотрел только стохастические имитационные модели, которые создаются на основе теории вероятности, статистики, генерации случайных чисел и т. п. Имитационная модель исследуемого процесса запускается многократно (несколько сот запусков), и строятся кривые распределения значений параметров, характеризующих процесс. Повторения результатов при таком имитационном моделировании нет. Автор просто сообщает, что кроме стохастических существуют и детерминированные имитационные модели, которые при повторении запуска повторяют результаты. Металлургические и энергетические технологии на предприятиях строго нормированные и контролируемые, что позволяет без затруднений создавать детерминированные имитационные модели энергометаллургических агрегатов, используя их нормативные документы или отчеты специализированных организаций, выполнявших исследования, ремонт и наладку этих агрегатов.

Ниже приведены основные положения по математическому обеспечению предлагаемой системы.

В АСОУМетЭнерго металлургические процессы моделируются как действия над дискретно-событийными этапами производства продукции (заказ, партия, плавка, пакет и т. п.), выполнение которых обеспечивается соответствующими синхронными энергетическими процессами. При их имитационном моделировании объединяются основные принципы оперативного организационно-технологического управления в реальном времени металлургическими процессами (включая подсистемы: информационную и учета) и их обеспечивающими энергетическими процессами, имеющими металлургическую специфику. Речь идет о единых энергометаллургических процес-

сах, для эффективного управления которыми нужны энергометаллургические характеристики объектов управления, одна из которых уже упомянута в [1] и получила название энерготехнологической характеристики (ЭТХ). ЭТХ представляет собой зависимость количества произведенной металлургической продукции от количества затраченной на её получение энергии. Общепринятой единицей металлургической продукции является тонна – т. А в промышленной энергетике пока еще не введена одна единица измерения количества израсходованной энергии топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) – 1 ТЭР, а используются различные единицы для различных видов энергии: кВт·ч, Гкал, тонна условного топлива (с указанием теплоты сгорания) и др. Так что нам предоставлено право выбрать наиболее удобную единицу учета ТЭР. Предлагаем выбрать кВт·ч.

Если пренебречь расходом ТЭР на холостой ход агрегатов и прочими потерями, то ЭТХ энергометаллургического агрегата $\bar{P}(\bar{T})$ можно представить, как показано на рис. 3а.

$\bar{P}(\bar{T})$ – это идеализированная ЭТХ металлургического, а фактически энергометаллургического агрегата, так как металлургических агрегатов, не потребляющих энергии, нет. Математической записью такой ЭТХ (имитационной моделью) является

$$\bar{P}(\bar{T}) = k \cdot \bar{T}, \quad (2)$$

где $\bar{P}(\bar{T})$ – масса выработанной продукции, т; $\bar{T}$ – затраченная энергия, кВт·ч; $k = \text{tg} \varphi$ – наклон ЭТХ или её первая производная $\bar{P}'(\bar{T})$.

Подбором масштабов всегда можно получить $\varphi = 45^\circ$ ($k = \text{tg} \varphi = \text{tg} 45^\circ = 1$), а это означает, что ЭТХ можно записать в таком виде $\bar{P}(\bar{T}) = \bar{T}$, и всегда первая производная $\bar{P}'(\bar{T}) = 1$.

Следующая – это характеристика удельных расходов энергии (ХУРЭ). Математическая запись ХУРЭ такая

$$\bar{q}(\bar{T}) = \bar{T} / \bar{P}(\bar{T}) = \bar{T} / k \cdot \bar{T} = 1/k. \quad (3)$$

При подборе масштабов также $k = \text{tg} \varphi = \text{tg} 45^\circ = 1$ и $\bar{q}(\bar{T}) = 1$. Таким образом, удельные расходы энергии оставались бы постоянными при любой нагрузке агрегата.

Аналогично вела бы себя и обратная ХУРЭ характеристика эффективности энергоиспользования (ХЭЭИ)

$$\bar{F}(\bar{T}) = \bar{P}(\bar{T}) / \bar{T} = k \cdot \bar{T} / \bar{T} = k. \quad (4)$$

Рис. 3. Характеристики металлургических агрегатов:
 $P(T)$ – ЭТХ; $F(T)$ – ХЭЭИ; $q(T)$ – ХУРЭ; а – идеализированные; б – реальные

Как и ХУРЭ при $k = \tan \varphi = \tan 45^\circ = 1$ ХЭЭИ была бы постоянной, не зависящей от величины загрузки агрегата.

Если вникнуть в физический смысл ХЭЭИ и вспомнить, что $\bar{P}(\bar{T})$ – это полезно использованная энергия, а знаменатель ($\bar{T}$) – вся затраченная энергия, то физический смысл ХЭЭИ – это известный коэффициент полезного действия, который при отсутствии потерь всегда равен единице. Реальные агрегаты, из-за потерь холостого хода и других потерь, имеют нелинейные ЭТХ, которые согласно [1] хорошо аппроксимировать полиномами второй степени, даже для агрегатов, потребляющих или генерирующих несколько видов ТЭР.

Если размерности величин, откладываемых по осям абсцисс (кВт·ч) и ординат (т), разделить на размерность времени (час), то по оси абсцисс будет откладываться кВт·ч/ч = кВт, т.е. используемая агрегатом мощность, а по оси ординат т/ч – производительность агрегата. Соответствующие характеристики показаны на рис. 3б:

– энерготехнологическая (ЭТХ)

$$P(T) = B_0 + B_1 \cdot T + B_2 \cdot T^2 = \sum_{k=0}^2 B_k \cdot T^k; \quad (5)$$

– эффективности энергоиспользования (ХЭЭИ)

$$F(T) = \frac{P(T)}{T} = \frac{B_0}{T} + B_1 + B_2 \cdot T = \sum_{k=0}^2 B_k \cdot T^{k-1}; \quad (6)$$

– удельных расходов энергии (ХУРЭ)

$$q(T) = \frac{T}{P(T)} = \frac{1}{F(T)} = \frac{1}{\sum_{k=0}^2 B_k \cdot T^{k-1}}. \quad (7)$$

Реальный агрегат имеет максимальную производительность в точке М ЭТХ (рис. 3б) при использовании или генерации T_m кВт мощности, которая определяется из условия приравнивания нулю первой производной ЭТХ $P'(T)$.

$$dP(T)/dT = 2B_2 \cdot T_m + B_1 = 0,$$

откуда

$$T_m = -\frac{B_1}{2B_2} > 0, \text{ т.к. } B_2 < 0 \quad (8)$$

и

$$\begin{aligned} P(T_m) &= B_0 + B_1 \left(-\frac{B_1}{2B_2}\right) + B_2 \left(-\frac{B_1}{2B_2}\right)^2 = \\ &= B_0 - \frac{B_1^2}{2B_2} + \frac{B_1^2}{4B_2} = B_0 - \frac{B_1^2}{4B_2}. \end{aligned} \quad (*)$$

Из (6) аналогично получается значение потребляемой агрегатом мощности T_f , при которой он использует энергию с наибольшей эффективностью

$$dF(T)/dT = B_2 - B_0 \cdot T_f^{-2} = 0,$$

откуда

$$T_f = \sqrt{B_0/B_2}, (B_0/B_2 > 0, \text{ т.к. } B_0 < 0 \text{ и } B_2 < 0) \quad (9)$$

и

$$P(T_f) = 2B_0 + B_1 \cdot \sqrt{B_0/B_2}.$$

Из (7) приравниванием нулю первой производной ХУРЭ получаем величину используемой агрегатом мощности T_q при минимальном удельном расходе энергии

$$q'(T) = (1/F(T))' = -F'(T)/F^2(T) = 0,$$

откуда

$$F'(T) = B_2 - B_0 \cdot T_q^{-2} = 0$$

и

$$T_q = \sqrt{B_0/B_2} = T_f. \quad (10)$$

Если параллельно работают m агрегатов, потребляющих по одному виду ТЭР каждый, то их общая производительность равна сумме производительностей всех агрегатов:

$$П(T) = \sum_{i=1}^m \sum_{k=0}^2 B_{ki} \cdot T_i^k. \quad (11)$$

И общее потребление ТЭР будет равно сумме ТЭР, потребляемых каждым агрегатом:

$$T = \sum_{i=1}^m T_i. \quad (12)$$

Равенство (12) можно переписать в таком виде, разделив правую и левую части на T

$$\sum_{i=1}^m \frac{T_i}{T} = 1.$$

Обозначим $\frac{T_i}{T} = \theta_i$. Понятно, что θ_i – это величина долевого участия агрегата в общем потреблении ТЭР всеми m агрегатами, а сумма долевых частей всех агрегатов всегда равна 1:

$$\sum_{i=1}^m \theta_i = 1. \quad (13)$$

Таким образом, участие каждого агрегата j в общем потреблении ТЭР эквивалентным агрегатом (T) для каждого вида ТЭР

$$T_i = \theta_i \cdot T \quad (14)$$

и (11) можно записать в таком виде:

$$П(T) = \sum_{i=1}^m \sum_{k=0}^2 B_{ki} \cdot \theta_i^k \cdot T^k. \quad (15)$$

Из (15) следует, что коэффициентами ЭТХ эквивалентного агрегата будут:

$$B_k = \sum_{i=1}^m B_{ki} \cdot \theta_i^k \quad k=0,1,2.$$

А именно,

$$B_0 = \sum_{i=1}^m B_{0i}; B_1 = \sum_{i=1}^m B_{1i} \cdot \theta_i; B_2 = \sum_{i=1}^m B_{2i} \cdot \theta_i^2. \quad (16)$$

После этого ЭТХ эквивалентного агрегата можно переписать в таком виде:

$$П(T) = \sum_{k=0}^2 B_k \cdot T^k. \quad (17)$$

Однако, чтобы можно было пользоваться (17), необходимо решить, при каких значениях долевого участия каждого агрегата в расходе ТЭР θ_i будем по (16) определять коэффициенты B_1 и B_2 . Если воспользоваться основным принципом динамического программирования о том, что

режим параллельной работы группы агрегатов будет оптимальным только при оптимальном режиме работы каждого агрегата, т.е. при максимальной эффективности энергоиспользования каждого агрегата – при его расходе ТЭР в соответствии с (9)

$$T_{fi} = \sqrt{B_{0i}/B_{2i}},$$

то для наибольшей эффективности эквивалентного агрегата

$$T_f = \sqrt{B_0/B_2} = \sum_{i=1}^m T_{fi} = \sum_{i=1}^m \sqrt{B_{0i}/B_{2i}}.$$

Таким образом, эффективным долевым участием агрегата i будет:

$$\theta_i = \frac{T_{fi}}{T_f} = \sqrt{B_2/B_0} \cdot \sqrt{B_{0i}/B_{2i}}, \quad (*)$$

где $B_0 = \sum_{i=1}^m B_{0i} = \text{const}$.

Согласно (13) $\sum_{i=1}^m \theta_i = 1$, следовательно, если просуммировать (*) и независимую от i величину $\sqrt{B_2/B_0}$ вынести за знак суммы, то получим:

$$\sqrt{B_2/B_0} \cdot \sum_{i=1}^m \sqrt{B_{0i}/B_{2i}} = 1,$$

откуда

$$\sqrt{B_2/B_0} = \left[\sum_{i=1}^m \sqrt{B_{0i}/B_{2i}} \right]^{-1}$$

и после подстановки в (*) получаем:

$$\theta_i = \frac{\sqrt{B_{0i}/B_{2i}}}{\sum_{i=0}^m \sqrt{B_{0i}/B_{2i}}}. \quad (18)$$

Соответственно, для характеристики эффективности энергоиспользования (ХЭЭИ) эквивалентного агрегата

$$F(T) = \sum_{i=1}^m \sum_{k=0}^2 B_k \cdot T^{k-1},$$

$$dF(T)/dT = B_2 - B_0/T^2 = 0,$$

откуда оптимальная величина мощности, потребляемой эквивалентным агрегатом:

$$T_f = \sqrt{B_0/B_2}.$$

Выразим мощность, потребляемую агрегатом i , как долевую часть T_{fi} :

$$T_{fi} = \theta_i \cdot T_f.$$

Оптимальная долевая часть θ_i агрегата

$$\frac{dF(\theta_i)}{d\theta_i} = -\frac{B_{0i}}{\theta_i^2} + B_{2i} \cdot T_f = 0,$$

откуда

$$\theta_i = \sqrt{B_{0i}/B_{2i} \cdot T_f} = \sqrt{B_{0i}/B_{2i}} / \sqrt{B_0/B_2} = \sqrt{B_2/B_0} \cdot \sqrt{B_{0i}/B_{2i}}. \quad (*)$$

А далее, как и в предыдущем случае, после (*) получается (18). Таким образом, мы видим, что возможно аналитическое объединение характеристик параллельно работающих (в пространстве и времени) фактических (физических) или «условных» агрегатов в один эквивалентный агрегат с характеристиками ЭТХ и ХЭЭИ в таком виде:

$$P(T) = \sum_{i=1}^m \sum_{k=0}^2 B_{ki} \cdot \theta_i^k \cdot T^k = \sum_{k=0}^2 B_k T^k$$

и

$$F(T) = \sum_{i=1}^m \sum_{k=0}^2 B_{ki} \cdot \theta_i^{k-1} \cdot T^{k-1} = \sum_{k=0}^2 b_k T^{k-1},$$

где

$$B_k = \sum_{i=1}^m B_{ki} \cdot \theta_i^k \text{ и } b_k = \sum_{i=1}^m B_{ki} \cdot \theta_i^{k-1} \quad (19)$$

или в развернутом виде

$$B_0 = \sum_{i=1}^m B_{0i}; \quad B_1 = \sum_{i=1}^m B_{1i} \cdot \theta_i;$$

$$B_2 = \sum_{i=1}^m B_{2i} \cdot \theta_i^2,$$

а

$$b_0 = \sum_{i=1}^m B_{0i} \cdot \theta_i^{-1}; \quad b_1 = \sum_{i=1}^m B_{1i};$$

$$b_2 = \sum_{i=1}^m B_{2i} \cdot \theta_i.$$

Такое объединение удобно во многих случаях, например, при прогнозном планировании работы цеха или всего предприятия на больших временных интервалах. Также удобно и нужно представлять характеристики агрегата, потребляющего m видов ТЭР, как эквивалентного m условным агрегатам, потребляющим по одному виду ТЭР и в других случаях.

Однако, решая вопросы оперативного управления металлургической энергетикой на малых временных интервалах (смена, сутки, декада), проанализируем, всегда ли нужно объединять параллельно работающие агрегаты участка в один эквивалентный агрегат. Представим, что на всех таких участках цеха агрегаты объединены в один эквивалентный агрегат. В результате окажется, что цех является цепочкой последовательно работающих агрегатов с различными ЭТХ и ХЭЭИ. В зависимости от того, какой вопрос решается – максимальной производительности цеха или максимальной эффективности энергоиспользования – для оптимизации будут использоваться ЭТХ или ХЭЭИ агрегатов. В условиях постоянного и значительного увеличения стоимости ТЭР, в качестве основных выбираем ХЭЭИ и, соответственно,

эффективные производительности агрегатов – f с эффективными расходами ТЭР – T_f .

В последовательной цепочке всегда найдется агрегат p с наименьшей оптимальной производительностью f_p , который и будет определять номинальную производительность цеха. Остальные агрегаты j в последовательной цепочке будут иметь оптимальную производительность, большую f_p . При этом $f_j > f_p$, $j \neq p$. Это учитывается при разработке программного обеспечения с использованием методики и «ноу-хау» авторов.

Перед разработкой имитационной модели цеха собирается информация, которая характеризует производительность агрегатов и удельные затраты ТЭР по различным номенклатурным видам и сортаментам продукции. Это могут быть паспортные данные оборудования, нормативы его производительности и удельных энергозатрат, имеющихся в цехах, техническом отделе службы главного энергетика или предприятия.

Для энергетического оборудования имеются диаграммы режимов завода-изготовителя, типовые характеристики и графики удельных расходов по энергетическому оборудованию ТЭЦ-ПВС, много информации содержится в имеющихся на заводах отчетах специализированных организаций по испытаниям оборудования.

По информации из указанных источников аппроксимируются предварительные ЭТХ и ХЭЭИ агрегатов, потребляющих или генерирующих один вид ТЭР, и агрегатов с многими видами ТЭР, которые должны рассматриваться как эквивалентные, объединяющие несколько условных агрегатов, потребляющих по одному виду ТЭР. Характеристики каждого условного агрегата получаются по результатам функционирующих в цехах систем учета. Эти системы должны разрабатываться и внедряться с опережением разработки и внедрения всей АСОУМет-Энерго. При отсутствии в цехе системы учета проводятся испытания агрегатов и разрабатывается имитационная модель цеха. С её помощью выполняется доводка предварительных ЭТХ и ХЭЭИ, полученных на основе информации заводов-изготовителей оборудования, а также результатов имеющихся и новых испытаний агрегатов, сравнением результатов моделирования с фактическими данными работы цеха. При этом в первую очередь выполняется корректировка и доводка самой имитационной модели, системы приоритетов загрузки агрегатов, длительности переналадок и плановых простоев и т.п.

Когда имитационная модель цеха начнет нормально функционировать (в смысле эквивалентности цеху), с её помощью получают графики потребления ТЭР агрегатами цеха по форме ведомости будущей системы учета АСОУМет-Энерго (см. таблицу 1), которые являются исходной информацией для определения коэффициентов ЭТХ и ХЭЭИ условных агрегатов, а также их долевого участия θ_i в потреблении каждого вида ТЭР эквивалентного агрегата и характеристик эквивалентных агрегатов.

По тем же программам будут определяться коэффициенты цеховых ЭТХ, ХЭЭИ и долевого участие агрегатов в потреблении цехом всех видов ТЭР θ_i и коэффициентов ЭТХ и ХЭЭИ условных агрегатов, входящих в эквивалентный агрегат, имитирующий цех.

Таким образом, определился ответ на вопрос о предварительном объединении ЭТХ и ХЭЭИ параллельно работающих агрегатов в характеристики эквивалентного агрегата. Ответ следующий: даже если ЭТХ и ХЭЭИ агрегатов будут одинаковыми для всех номенклатурных видов и сортовентов продукции, то маловероятным окажется вариант, когда оптимальные производительности в последовательной цепочке окажутся одинаковыми у всех агрегатов. Обязательно найдется «узкое место» – агрегат с минимальной оптимальной производительностью, который и определит количество параллельных агрегатов, работающих в оптимальных режимах на каждом участке цеха.

Аналитическое объединение характеристик агрегатов, работающих последовательно, в реальных цехах усложняется многими факторами (например, каждая садка группы параллельно работающих металлургических печей может быть сдвинута по времени, последовательные агрегаты отделки начинают обработку одной плавки со сдвигом в несколько минут и т. д.).

Сложности возникают потому, что необходимо в одной имитационной модели моделировать течение разных процессов. С одной стороны, это моделирование (развертывание) во времени металлургических процессов, а с другой – процессов потребления или генерирования различных видов ТЭР. И логика направляет нас в сторону предварительного получения общецеховых графиков потребления по каждому виду ТЭР и аппроксимации по ним (условным общецеховым J, I агрегатом, где J – номер цеха, а I – номер вида энергоресурса) ХЭЭИ и ЭТХ, которые затем уже объединять по (19) в единые общецеховые

ХЭЭИ и ЭТХ.

При имитационном моделировании функционирования металлургического производства на коротких временных интервалах (смена, сутки, декада) необходимо учитывать, что будут и внеплановые простои агрегатов, в частности, вызванные тем, что большинство агрегатов цеха всегда будет иметь эффективную производительность большую, чем f_p . Эти и другие вопросы решаются при реальном моделировании с учетом соответствующих предложений и «ноу-хау» авторов.

В каждый момент времени все агрегаты цеха работают параллельно (во времени). Они потребляют суммарные мощности по каждому виду ТЭР, а их общая производительность равна суммарной производительности всех агрегатов цеха. Такую информацию за смену, сутки или несколько суток работы цеха можно получить от системы учета в виде ведомости учета работы агрегатов или от имитационной модели в виде сменных, суточных и 3-х суточных графиков работы цеха и энергопотребления или генерации ТЭР по их видам. Согласно этой информации будут определяться (и корректироваться) коэффициенты ЭТХ и ХЭЭИ.

Учитывая вышеизложенное, в АСОУмет-Энерго принимается решение, что разработка цеховых систем оперативного управления ведется с отдельным имитационным моделированием работы каждого агрегата цеха, что обеспечивает большие возможности маневра в использовании оборудования.

Уточним, что будет моделироваться и какие параметры при этом будут использоваться. Моделироваться будут металлургические процессы изготовления продукции, которые обеспечиваются энергозатратными процессами. Соответственно, параметрами моделирования будут количества ТЭР и получаемой продукции.

Однако, два названных параметра дают представление только об удельных энергозатратах, которыми интересуются, в основном, энергетики и экономисты, или об эффективности энергозатрат, которыми интересуются металлурги.

Удельные энергозатраты и эффективность энергоиспользования легко определить за прошлые периоды, когда известны фактические объемы производства и энергозатрат. А в оперативном управлении, тем более, в оперативном планировании на смену, сутки и несколько суток, их использовать практически невозможно.

Поэтому необходимо ввести ещё один пара-

метр, позволяющий с одной стороны учитывать интенсивность (эффективность) производства, а с другой – представлять последовательность этапов производства и, соответственно, энергоснабжения. Таким третьим параметром является **время**.

Количество продукции, произведенное за единицу времени, характеризует интенсивность или мощность производства. Производственники назвали этот параметр производительностью. А количество энергии, израсходованное в единицу времени, называется мощностью. Зависимость между эффективностью энергоиспользования и затрачиваемой мощностью ТЭР графически представлена на рис. 3б, а аналитически представляется функциональной зависимостью:

$$F_j(T_i) = \sum_{i=1}^m \sum_{k=0}^2 B_{kji} \cdot T_{ji}^{k-1}, \quad (22)$$

где $F_j(T_i) = \frac{P_j(T_i)}{T_i}$ – характеристика эффективности энергоиспользования; j – номер агрегата в цехе; i – номер вида ТЭР; k – номер коэффициента и показатель степени; B_{kji} – коэффициент ХЭ-ЭИ агрегата j по виду ТЭР i ; T_{ji} – мощность ТЭР вида i , потребляемая агрегатом j ; $P_j(T_i)$ – производительность агрегата j потребляющего ТЭР видов i , которая получается умножением $F_j(T_i)$ на мощность потребляемого агрегатом j энергоресурса T_{ji} :

$$P_j(T_i) = \sum_{i=1}^m \sum_{k=0}^2 B_{kji} \cdot T_{ji}^k. \quad (23)$$

Характеристики (22) и (23) должны быть аппроксимированы и по «условному» административно-хозяйственному агрегату.

При эксплуатации АСОУМетЭнерго может оказаться, что названные характеристики будут различаться по сменам (дневная, вечерняя, ночная), по суткам (рабочие, выходные и праздничные) по сезонам и условиям погоды (летние – зимние, тепло – холодно) и др.

Однако, учет третьего параметра – времени – в характеристиках агрегатов (22) и (23) еще не решает задачу планирования работы цеха на смену, сутки или несколько суток. Эту задачу можно решить, только **имитируя во времени работу всех агрегатов цеха, т.е. созданием имитационной модели цеха**.

Алгоритм имитационной модели цеха должен иметь блочную структуру, что существенно облегчает его корректировку в случае изменений номенклатуры продукции, оборудования, технологии и др.

Алгоритм центрального блока имитационной модели должен выполнять функции: поиска ми-

нимальной компоненты вектора состояния агрегатов цеха; обращение к блоку агрегата с минимальной компонентой для его загрузки очередной партией продукции; прием ответа блока агрегата и корректировка компоненты вектора состояния; прием информации от персонала цеха и системы учета (о простоях, их длительностях и причинах) и корректировка компонент вектора состояния агрегатов; прием директивной информации о корректировке графика плановых простоев и обращение к соответствующему блоку.

При разработке алгоритма функционирования имитационной модели цеха перечень функций её центрального блока может уточняться, но при этом должно соблюдаться требование: **центральный блок не должен отвлекаться на длительное время от выполнения основной своей функции – вести во времени вектор состояния агрегатов цеха**.

В алгоритмах функциональных блоков должны реализовываться функции, не связанные с вектором состояния непосредственно. Например, алгоритм блока агрегата должен предусматривать операции: разгрузка обработанной на агрегате партии на последующий склад, выбор очередной партии для загрузки агрегата (при отсутствии на складе перед агрегатом партии, не требующей его переналадки, или при свободном складе обращение к блоку определения длительности простоя или переналадки), определение длительности обработки загруженной партии, определение расходов ТЭР агрегатом и усреднение их мощностей на шестиминутных интервалах, запись информации в массивы сменно-суточных графиков.

Перед разработкой алгоритма имитационной модели цеха должны быть разработаны структуры и форматы: массивов нормативной информации; массивов и форматов директивной информации; информации системы учета; информации массивов агрегатов; вектора состояния агрегатов цеха; сменно-суточных графиков работы агрегатов и расходов ТЭР по видам; информации массивов партий продукции; правил выбора партии для загрузки каждого агрегата или системы приоритетов и др.

В процессе разработки алгоритмов цеховой системы оперативного управления структуры и форматы информационных массивов могут изменяться.

Алгоритмы системы с подробным описанием должны включаться в состав задания на программирование.

Энерготехнологическая характеристика (ЭТХ) и характеристика эффективности энергоиспользования (ХЭИ) любого агрегата j могут быть также представлены в таком виде

$$\begin{aligned} P_{j,\gamma} &= \sum_{i=1}^m \sum_{k=0}^2 B_{k,j,i} \cdot T_{j,i,\gamma}^k, \\ F_{j,\gamma} &= \sum_{i=1}^m \sum_{k=0}^2 B_{k,j,i} \cdot T_{j,i,\gamma}^{k-1} \quad \begin{matrix} \gamma = 1, 2, \dots, n \\ j = 1, 2, \dots, h \end{matrix} \end{aligned} \quad (24)$$

где $P_{j,\gamma}$, $F_{j,\gamma}$ – производительность агрегата (т/ч) и эффективность энергоиспользования ($\frac{\text{т}}{\text{ч}}/\text{кВт}$ или $\text{т}/\text{кВт} \cdot \text{ч}$); $T_{j,i,\gamma}$ – мощность потребляемого агрегатом j топливно-энергетического ресурса (ТЭР) i , кВт; $B_{k,j,i}$ – коэффициент ЭТХ агрегата; j – номер агрегата в цехе; i – номер вида ТЭР; k – номер

коэффициента характеристики и показатель степени; γ – номер строки в ведомости учета, в которой записаны мощности ТЭР, использованные или выработанные агрегатом – см. таблицу 1.

В «АСОУМетЭнерго» количества ТЭР учитываются непрерывно накопительными счетчиками, которые циклически опрашиваются ЭВМ цеховой системы учета с интервалом, например, 6 минут. Разности показателей счетчиков за каждый шестиминутный интервал пересчитываются в количество израсходованной или сгенерированной энергии вида i , и после деления на 0,1 часа (умножения на 10) записываются в строку j столбец i таблицы 1 уже как мощность в кВт.

Таблица 1. Примерный макет фрагмента информации ведомости учета мощностей ТЭР, используемых или генерируемых агрегатом № j при обработке партии продукции № ПП

№ ПП				№ j				Дата	
№ СП				$G_{j,\text{пп}}^*$				$t_{\text{пп}}$	
$\tau_{\text{пп}}$				τ_{γ}				$\tau_{\text{пп}} - \gamma \cdot \tau_{\gamma}$	
№ _i	1	2	...	i	...	s	$\sum_{i=1}^m T_{i,\gamma}$	$P_{j,\gamma}$	$F_{j,\gamma}$
№ _γ	1	2	...	i	...	s	$\sum_{i=1}^m T_{i,\gamma}$	$P_{j,\gamma}$	$F_{j,\gamma}$
1	$T_{1,1}$	$T_{2,1}$	...	$T_{i,1}$	...	$T_{s,1}$	$\sum_{i=1}^m T_{i,1}$	$G^* \cdot \tau_{\text{пп}}$	$\sum_{i=1}^s (B_{1,i} + \sqrt{B_{0,i} \cdot B_{2,i}}) **$
2	$T_{1,2}$	$T_{2,2}$	...	$T_{i,2}$	...	$T_{s,2}$	$\sum_{i=1}^m T_{i,2}$		
...	...	...	...	...	...	...	...		
γ	$T_{1,\gamma}$	$T_{2,\gamma}$	...	$T_{i,\gamma}$	...	$T_{s,\gamma}$	$\sum_{i=1}^m T_{i,\gamma}$		
...	...	...	...	...	...	...	...		
n	$T_{1,n}$	$T_{2,n}$	...	$T_{i,n}$	...	$T_{s,n}$	$\sum_{i=1}^m T_{i,n}$		

* – при уменьшении величины G в результате обработки на агрегате j она уточняется по результатам взвешивания (и в массиве ПП);

** – коэффициенты $B_{k,i}$ хранятся в массиве агрегата № j .

В таблице 1 приняты следующие обозначения: № ПП – номер партии продукции, которая будет обрабатываться агрегатами цеха; № СП – номер сортамента продукции; $t_{\text{пп}}$ – время начала обработки партии продукции; $\tau_{\text{пп}}$ – длительность обработки агрегатом партии продукции без учета простоев (за их вычетом); № j – номер агрегата в цехе; $G_{j,\text{пп}}$ – масса партии продукции, т; $\tau_{\gamma} = 6$ минут – интервал времени между соседними опросами счетчика учета расхода энергии; дата – календарная дата (год, месяц, сутки); № i – номер топливно-энергетического ресурса в общезаводском перечне ТЭР; s – последний номер в общезаводском перечне ТЭР; γ – номер последней записанной строки ведомости учета ТЭР по агрегату j ; $\sum_{i=1}^s T_{i,\gamma} = T_{j,\gamma}$ – полная мощность агрегата j в строке γ ; n – номер последней строки по партии продукции № ПП в формате ведомости

учета расхода ТЭР по агрегату j ; $P_{j,\gamma} = G^* \cdot \tau_{\text{пп}}$ – фактическая производительность агрегата j при обработке № ПП; $F_{j,\gamma} = \sum_{i=1}^s 2(B_{1,i} + \sqrt{B_{0,i} \cdot B_{2,i}})$ – эффективность энергоиспользования агрегата j .

Ведомости по форме таблицы 1 печатаются по каждому агрегату, в т. ч. и по условному административно-хозяйственному агрегату цеха.

Если в конце смены обработка партии на агрегате не закончена, то заполняется строчка $\tau_{\text{пп}}$, $\tau_{\text{пп}} - \gamma \cdot \tau_{\gamma}$; взвешивается обработанная часть партии $G_{\text{пп}}^{\text{обр.}}$ и записывается в массив закончившейся смены; вычисляется и записывается в массив следующей смены остаток $G_{\text{пп}}^* - G_{\text{пп}}^{\text{обр.}} \rightarrow G_{\text{пп}}^*$; записывается фактическое время начала обработки остатка партии $\tau_{\text{пп}}$ в следующей смене.

Печатаются ведомости учета мощностей ТЭР по всем агрегатам цеха за прошлую смену.

Синхронно с накоплением информации о расходе ТЭР в ведомости учета по каждому агрегату накапливается аналогичная информация общецеховой сменной ведомости по всем ТЭР – сменный баланс использования ТЭР цехом, формат которого разрабатывается с участием руководящего персонала цеха.

При аппроксимации ХЭЭИ агрегата (цеха, предприятия) по накопленным системой «АСОУМетЭнерго» значениям $F_{j,\gamma}$ и $T_{i,\gamma}$ используется метод наименьших квадратов.

На ранних стадиях разработки «АСОУМетЭнерго» при отсутствии в цехе действующей системы учета выработки продукции, расхода ТЭР и документальной информации, позволяющей аппроксимировать ХЭЭИ и ЭТХ оборудования, их получают экспериментальным путем непосредственно во время работы агрегатов. Методику аппроксимации характеристик, а также организацию проведения экспериментов и обработки их результатов для агрегатов с одним, двумя и более видами ТЭР предполагается изложить в отдельной публикации.

Объектами имитационного моделирования на втором уровне «АСОУМетЭнерго» являются цеха, а основным инструментом моделирования – ХЭЭИ и ЭТХ цехов.

При имитационном моделировании технологических процессов на коротких временных интервалах (смена, сутки, несколько суток) ХЭЭИ и ЭТХ агрегата отражают энергозатраты только в период его фактической оптимальной загрузки. Простои по различным причинам и холостой ход агрегатов при краткосрочном моделировании учитываются отдельно.

При моделировании на больших интервалах времени (декада, месяц, квартал и др.) цех в целом выступает как единый объект моделирования – учет отдельных деталей технологических процессов, с одной стороны, не имеет смысла, а с другой – невозможен в связи с неопределенностями портфеля заказов, сортамента продукции, рыночной конъюнктуры, лицензирования и ограничений на покупные виды ТЭР, прогнозов погоды (долгосрочных) и др.

До ввода в эксплуатацию цеховых систем учета (например, в процессе проектирования) при функционирующей системе имитационного моделирования хода технологических процессов ЭТХ на таких временных интервалах как декада, месяц, квартал может быть получена следующим образом.

Имитационное моделирование работы цеха во всех деталях ведется не на трое суток, а на

десять. При моделировании заполняются три массива информации по форме таблицы 1 соответственно по дневной, вечерней и ночной сменам с усреднением энергозатрат и производительности цеха по каждому часу. По каждой из указанных трех таблиц методом наименьших квадратов определяются коэффициенты ХЭЭИ и ЭТХ цеха по дневной, вечерней и ночной сменам соответственно в виде (24) и записываются в отдельных массивах уже с этими коэффициентами $D_{K,J,I}$

$$\begin{aligned} F_{J,I,\gamma} \cdot \sum_{I=1}^m \sum_{K=0}^2 D_{K,J,I} T_{J,\gamma}^{K-1} \\ \Pi_{J,I,\gamma} \cdot \sum_{I=1}^m \sum_{K=0}^2 D_{K,J,I} T_{J,\gamma}^K \quad \gamma = 1, 2, \dots, n \\ I = 1, 2, \dots, h. \end{aligned} \quad (27)$$

При функционирующих цеховых системах учета уже при истечении первой декады ХЭЭИ и ЭТХ цехов будут откорректированы автоматически с использованием фактических графиков энергозатрат. В ходе дальнейшей эксплуатации «АСОУМетЭнерго» ЭТХ будут автоматически корректироваться по графикам фактического энергопотребления и выработки ВЭР каждым цехом. Полученные в результате имитационного моделирования трехсуточные графики потребления ТЭР и выработки ВЭР, поступающие на второй уровень «АСОУМетЭнерго» от цеховых систем, объединяются по видам ТЭР в единые общезаводские планы-графики энергопотребления и выработки ВЭР, на основе которых формируются графики-задания энергетическим цехам для имитационного моделирования их трехсуточной работы.

Кроме информации, поступающей от цеховых систем на второй уровень «АСОУМетЭнерго» от производственно-технического и планового отделов предприятия и управления главного энергетика, должна систематически поступать следующая информация: по основным агрегатам – графики плановых остановок, ожидаемые длительности послеаварийных ремонтов, порядок выполнения заказов, партий, плавов и других объемов металлопродукции, нормативы по производительности цеха в целом и по энергозатратам при различном сортаменте, маркам стали, ограничения и рекомендации по использованию ТЭР и др.; по условным агрегатам – прогнозы погоды, ее сезонные и суточные особенности, выходные, праздничные и другие нерабочие дни, статистические данные по энергозатратам в различное время суток, в рабочие, выходные и праздничные дни. В реальном времени от цеховых систем на второй уровень поступает

информация о фактическом выполнении плановых заданий по производству металлопродукции, о расходах и выработке энергии и энергоносителей. На второй уровень также поступает информация о скорректированных ХЭЭИ и ЭТХ цехов. Моделируется, начиная с текущего момента и до конца месяца, функционирование каждого цеха. При этом, по первым трем суткам используются графики, полученные от цеховых систем, по периоду до конца текущей декады выделяются сутки, а до конца месяца – декады.

Третий уровень «АСОУМетЭнерго» – это общезаводская система текущего планирования и управления энергетикой цехов на временных интервалах: текущие трое суток, текущая декада, текущий месяц, прогнозное планирование.

Выводы

1. Разработанная ГП «Укрگیпромез» и авторами и предложенная к поэтапному внедрению автоматизированная система оперативного управления металлургической энергетикой «АСОУМетЭнерго» позволит сократить удельные энергозатраты в металлургии Украины и сделать балансы ТЭР металлургических предприятий близкими к оптимальным.

2. Внедрение предложенной «АСОУМетЭнерго», например, на комбинате полного металлургического цикла с годовым потреблением всех топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в количестве 9 млн. т условного топлива в год ориентировочно позволит сэкономить около 5 % этого годового потребления ТЭР. В пересчете на покупной природный газ эта экономия составит около 400 млн. м³/год. При его стоимости 250\$/1000 м³ годовой экономический эффект может составить около 100 млн. \$/год.

3. Предложенная «АСОУМетЭнерго» может быть внедрена также на предприятиях других отраслей промышленности и по вертикали, вплоть до всего хозяйства страны, как единого «условного» энерготехнологического агрегата, что позволит Правительству и руководству регионов разрабатывать перспективные планы развития экономики и своевременно принимать решения, способствующие ее оптимальному функционированию.

4. ГП «Укрگیпромез» и авторы предлагают определение энергетических характеристик агрегатов и разработку программного обеспечения «АСОУМетЭнерго» для конкретных предприятий проводить совместно с их специалистами, которые хорошо знают свои агрегаты и их особенности.

Библиографический список

1. Вишневский Б. Н., Банников Ю. Г., Никитюк В. В., Цуканов А. А. Концепция создания автоматизированной системы формирования и оптимизации топливно-энергетического баланса металлургического предприятия. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1993. № 2. С. 58–62.
2. Шакалова Т. В., Цуканов А. А. Оптимальное распределение нагрузки и топлива между парогенераторами ТЭЦ. *Сталь*. 1988. № 2. С. 105–107.
3. Уманский Н. Н., Цингауз В. Х., Цуканов А. А., Чердниченко Н. А. Оперативное планирование с применением метода имитационного моделирования. *Бюллетень ЦНИИЧМ*. 1975. № 14. С. 55–56.
4. Вишневский Б. Н., Виноградник М. В., Царфина А. Г. Оптимизация режима многоступенчатой бойлерной установки ТЭЦ с помощью ЭВМ. *Промышленная энергетика*. 1980. № 11. С. 32–34.
5. Вишневский Б. Н., Басевич Л. М., Пирожков В. Л., Степанов В. М., Виноградник М. В. Испытание головного образца турбины Т-30-90-1 и разработка ее энергетических характеристик. *Энергомашиностроение*. 1983. № 7. С. 30–33.
6. Зайцев А. И., Митновицкая Е. А., Левин Л. А., Вишневский Б. Н. Автоматизированная система оптимизации проектных решений по составу оборудования ТЭЦ-ПВС металлургического предприятия. *Сталь*. 1989. № 5. С. 90–93.
7. Вишневский Б. Н., Буйнов А. В., Дышлевич И. И., Котов К. И. Энерготехнологическое моделирование агломерационного производства. *VII Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna "Gospodarka Ciepła i eksploatacja pieców przemysłowych". Poraj k. Częstochowy*. 6-9.10.1999. С. 317.
8. Вишневский Б. Н., Хейфец Р. Г., Цуканов А. А. Энерготехнологическое моделирование прокатного стана. Металлургическая теплотехника. *Сборник научных трудов Государственной металлургической академии Украины (Энергетика. Металлургия)*. 1999. Т. 2. С. 123–126.
9. Вишневский Б. Н. Энерготехнологическое моделирование сталеплавильного производства. *Сучасні проблеми металургії. Наукові праці*. 2001. Т. 3. Матеріали науково-практичної конференції “Проблеми і перспективи одержання конкурентноздатної продукції в гірничо-металургійному комплексі України” (Круглий стіл-2000). С. 219–225.

10. Вишнеvский Б. Н. Энерготехнологическая модель работы доменной печи. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2008. № 1. С. 136–137.

11. Фетт Ф. Н., Ре М., Штрошайн Х. Управление расходом энергии и прогноз потребности в энергии для металлургического завода. *Черные металлы*. 1993. № 6. С. 68–81.

12. Ziembik A. Systemy energetyczne. Wydawnictwo Politechniki Slaskiej, 1991. 311 с.

13. Соловьев В. Н., Павлова Е. А., Краснобаев В. А. Интеллектуальная автоматизированная система управления металлургическими агрегатами. *Черные металлы*. 2004. Июль-август. С. 26–29.

14. Энгельман А., Хубер Р., Унгер К. Моделирование нестационарного режима работы холодильника и контура системы охлаждения отходящего конвертерного газа. *Черные металлы*. 2004. Октябрь. С. 66–70.

15. Штольц Д. Системный подход к снижению энергозатрат. *Черные металлы*. 2012. Март. С. 66–72.

16. Хиршфельдер Э. Системы энергетического менеджмента для металлургических заводов. *Черные металлы*. 2005. Апрель. С. 72–75.

17. Новые инициативы черной металлургии по стабилизации экономики. *Черные металлы*. 2010. Август-сентябрь. С. 118–119.

18. Суковатин И. В. Развитие автоматизированной системы управления НТМК. *Сталь*. 1995. № 1. С. 68–71.

19. Ченцов А. В., Чесноков Ю. А., Шаврин С. В. Балансовая логико-статистическая модель доменного процесса. Екатеринбург: УрО РАН, 2003.

20. Кидяев С. В., Чертов Ю. А. Концептуальные особенности формирования корпоративной информационной системы металлургического предприятия. *Сталь*. 2006. № 10. С. 69–75.

21. Вишнеvский Б. Н., Кривченко Ю. С. Топливо-энергетический баланс промышленного предприятия и его оптимизация. *V Ogolnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna "Gospodarka Cieplna i eksploatacja piecow przemyslowych". Poraj K. Czesochowy. 8-11.10.1997*. С. 281.

22. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. Пер. с английского под ред. Е. К. Масловского. Москва : Мир, 1978.

23. Строгалев В.П., Толкачева И.О. Имитационное моделирование : уч. пособие. Москва : изд. МГТУ им. Баумана, 2008.

References

1. Vishnevskii, B. N., Bannikov, I. U. G., Niki-tiuk, V. V., Tsukanov, A. A. (1993). Kontseptsiiia sozdaniia avtomatizirovannoi sistemy formirovaniia i optimizatsii toplivno-ehnergeticheskogo balansa metallurgicheskogo predpriiatiia. *Metallurgicheskaia i gornorudnaia promyshlennost*, (2), 58-62

2. Shakalova, T. V., Tsukanov, A. A. (1998). Optimalnoe raspredelenie nagruzki i topliva mezhdu parogeneratorami TEHTS. *Stal*, (2), 105-107

3. Umanskii, N. N., Tsingauz, V. KH., Tsukanov, A. A., Cherednichenko, N. A. (1975). Operativnoe planirovanie s primeneniem metoda imitatsionnogo modelirovaniia. *Biulleten TsNIChM*, (14), 55-56

4. Vishnevskii, B. N., Vinogradnik, M. V., Tsar-fina, A. G. (1980). Optimizatsiia rezhima mnogostupenchatoi boilernoi ustanovki TEHTS s pomoshchiu EHVM. *Promyshlennaia ehnergetika*, 1980, (11), 32-34

5. Vishnevskii, B. N., Basevich, L. M., Pirozhkov, V. L., Stepanov, V. M., Vinogradnik, M. V. (1983). Ispytanie golovnoogo obraztsa turbiny T-30-90-1 i razrabotka ee ehnergeticheskikh kharakteristik. *Ehnergomashinostroenie*, (7), 30-33

6. Zaitsev, A. I., Mitnovitskaia, E. A., Levin, L. A., Vishnevskii, B. N. (1989). Avtomatizirovannaia sistema optimizatsii proektnykh reshenii po sostavu oborudovaniia TEHTS-PVS metallurgicheskogo predpriiatiia. *Stal*, (5), 90-93

7. Vishnevskii, B. N., Buinov, A. V., Dyshlevich, I. I., Kotov, K. I. (1999). Ehnergotekhnologicheskoe modelirovanie aglomeratsionnogo proizvodstva. *VII Ogolnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna "Gospodarka Cieplna i eksploatacja piecow przemyslowych". Poraj k. Czesochowy. 6-9.10.1999*

8. Vishnevskii, B. N., Kheifets, R. G., Tsukanov, A. A. (1999). Ehnergotekhnologicheskoe modelirovanie prokatnogo stana. *Metallurgicheskaia teplotekhnika. Sbornik nauchnykh trudov Gosudarstvennoi metallurgicheskoi akademii Ukrainy (Ehnergetika. Metallurgiiia)*, 2, 123-126

9. Vishnevskii, B. N. (2001). Ehnergotekhnologicheskoe modelirovanie staleplavilnogo proizvodstva. *Suchasni problemy metalurhii. Naukovi pratsi. 2001. T. 3. Materialy naukovo-praktychnoi konferentsii "Problemy i perspektyvy oderzhannia konkurentnozdatoi produktsii v hirnycho-metalurhiinomu kompleksi Ukrainy" (Kruhlyi stil-2000)*, 219-225

10. Vishnevskii, B. N. (2008). Ehnergotekhnologicheskaiia model raboty domennoi pechi. *Metallurgicheskaiia i gornorudnaia promyshlennost*, (2), 58-62

lurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost, (1), 136-137

11. Fett, F. N., Re, M., & Shtroshain, K. H. (1993). Upravlenie raskhodovaniem ehnergii i prognoz potrebnosti v ehnergii dlia metallurgicheskogo zavoda. *Chernye metally*, (6), 68-81

12. Ziembik, A. (1991). Systemy energetyczne. Wydawnictwo Politechniki Slaskiej

13. Solovev, V. N., Pavlova, E. A., & Krasnobaev, V. A. (2004). Intellectualnaia avtomatizirovannaja sistema upravleniia metallurgicheskimi agregatami. *Chernye metally*, liul-avgust, 26-29

14. Ehngelman, A., Khuber, R., & Unger, K. (2004). Modelirovanie nestatsionarnogo rezhima raboty kholodilnika i kontura sistemy okhlazhdeniia otkhodiashego konvertnogo gaza. *Chernye metally*, Oktiabr, 66-70

15. Shtolts, D. (2012). Sistemnyi podkhod k snizheniiu ehnergozatrast. *Chernye metally*, Mart, 66-72

16. Khirshfelder E. H. (2005). Systemy ehnergeticheskogo menedzhmenta dlia metallurgicheskikh zavodov. *Chernye metally*, April, 72-75

17. Novye initsiativy chernoi metallurgii po stabilizatsii ehkonomiki. (2010). *Chernye metally*, Av-

gust-sentiabr, 118-119

18. Sukovatin, I. V. (1995). Razvitie avtomatizirovannoi sistemy upravleniia NTMK. *Stal*, (1), 68-71.

19. Chentsov, A. V., Chesnokov, I. U. A., & Shavrin, S. V. (2003). *Balansovaja logiko-statisticheskaja model domennogo protsessa*. Ekaterinburg: URO RAN

20. Kidiaev, S. V., & Chertov, I. U. A. (2006). Kontseptualnye osobennosti formirovaniia korporativnoi informatsionnoi sistemy metallurgicheskogo predpriiatiia. *Stal*, (10), 69-75

21. Vishnevskii, B. N., & Krivchenko, I. S. (1997). Toplivno-ehnergeticheskii balans promyshlennogo predpriiatiia i ego optimizatsiia. *V Ogolnopol'ska Konferencja Naukowo-Techniczna "Gospodarka Cieplna i eksploatacia piecow przemyslowych". Poraj K. Czestochowy. 8-11.10.1997*

22. Shennon, R. (1978). *Imitatsionnoe modelirovanie sistem - iskusstvo i nauka*. Per. s angliiskogo pod red. E. K. Maslovskogo. Moskva: Mir

23. Stogalev, V. P., & Tolkacheva, I. O. (2008). *Imitatsionnoe modelirovanie uch. posobie*. Moskva: izd. MGTU im. Bauman

Стасевський Станіслав Леонідович, Державне підприємство «Український інститут по проектуванню металургійних заводів», м. Дніпро, Україна. ORCID: 0000-0002-4841-1111. E-mail: gipromez@ceo.com.ua

Щербakov Олександр Олександрович, Державне підприємство «Український інститут по проектуванню металургійних заводів», м. Дніпро, Україна. ORCID: 0000-0003-1090-9894. E-mail: shcherbakov@ukrgipro.dp.ua

Вишневський Богдан Миколайович, Державне підприємство «Український інститут по проектуванню металургійних заводів», м. Дніпро, Україна. ORCID: 0000-0002-5824-5794. E-mail: postmaster@gipromez.dp.ua

Войтковський Геннадій Петрович, Державне підприємство «Український інститут по проектуванню металургійних заводів», м. Дніпро, Україна. ORCID: 0000-0001-5290-1095. E-mail: Voitkovskiy.hp@ukrgipro.dp.ua

Капустіна Тетяна Олегівна, Державне підприємство «Український інститут по проектуванню металургійних заводів», м. Дніпро, Україна. ORCID: 0000-0002-5956-1465. E-mail: kapustina.to@ukrgipro.dp.ua

Цуканов Олександр Артемович, Придніпровська Державна Академія будівництва та архітектури, м. Дніпро, Україна. ORCID: 0000-0002-1130-3109. E-mail: Kirillovat183@gmail.com

Лебедєв Олексій Сергійович, ПАТ «Запоріжсталь», м. Запоріжжя, Україна. ORCID: 0000-0003-3748-5761. E-mail: lebedev140880@inloud.com

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛІННЯ МЕТАЛУРГІЙНОЮ ЕНЕРГЕТИКОЮ

Мета. Метою виконаних авторами досліджень та розробок є створення автоматизованої тривірневої системи оперативного управління металургійною енергетикою. Ця система при наступному підключенні підпрограм виробничого планування, фінансово-економічної та комерційної діяльності, забезпечення сировиною та ресурсами з врахуванням охорони довкілля стане інтегрованою комп'ютерною системою,

яка забезпечить економічну стабільність підприємства в складних умовах сучасного ринку.

Методика. Імітаційне моделювання роботи кожного агрегату і цеху, як сукупності агрегатів. При цьому загальнозаводські витрачання паливно-енергетичних ресурсів на опалення, вентиляцію, кондиціювання, освітлення, транспорт та ін. відносяться до окремого «умовного» цеху. Розробка і використання характеристик агрегатів: енерготехнологічних, ефективності енергоспоживання та питомого використання енергії. Постійне уточнення характеристик агрегатів через задані відрізки часу згідно з результатами імітаційного моделювання їх роботи. Взагалі виконується імітаційне моделювання металургійних процесів виробництва продукції, які супроводжуються процесами споживання та одночасної генерації паливно-енергетичних ресурсів агрегатами і цехами. Параметрами моделювання є кількість паливно-енергетичних ресурсів і отримуваної продукції. Використання принципів динамічного програмування. Розробка автоматизованої системи, що пропонується, на основі багаторічного досвіду проектування авторами металургійних підприємств, цехів та агрегатів, включаючи будівництво, авторський нагляд, автоматизацію, розрахунки паливно-енергетичних балансів та ін.

Результати. Розроблені ідеологія, схема та режим роботи запропонованої автоматизованої системи оперативного управління металургійною енергетикою, котра отримала назву «АСОУМетЕнерго». Описані можливості цієї системи. Розроблене математичне та організаційне забезпечення, а також план її поетапного впровадження на підприємстві. Розроблена методика, основні поняття та параметри імітаційного моделювання агрегатів і цехів. Розроблені математичні залежності та формули для енергетичних характеристик агрегатів, які працюють з одночасним споживанням і генерацією декількох видів паливно-енергетичних ресурсів, а також для знаходження оптимальних параметрів роботи агрегатів, коли їх енергетичні характеристики апроксимовані поліномами другого ступеню. Отримані формули для об'єднання характеристик декількох агрегатів в один агрегат. ДП «УкрДіпроМез» та автори пропонують розробляти програмне забезпечення «АСОУМетЕнерго» для конкретних підприємств спільно з їх спеціалістами, які добре знають свої енерготехнологічні агрегати.

Наукова новизна. Вперше розроблена і запропонована для впровадження автоматизована система оперативного управління металургійною енергетикою «АСОУМетЕнерго», яка обіймає всі технологічні та енергетичні агрегати підприємства. Розроблені її ідеологія, математичне та організаційне забезпечення. Розроблений алгоритм імітаційного моделювання агрегатів та цехів підприємства. Всі характеристики агрегатів – енерготехнологічні, ефективності енергоспоживання та питомого використання енергії апроксимуються поліномами другого ступеню. Це забезпечує їх більшу точність в порівнянні з лінійними рівняннями та зручність рішення системи рівнянь другого порядку, коли потрібно знаходити перші похідні (наприклад, при використанні методу невизначених множників Лагранжа або градієнтних методів). Розробка методів отримання енергетичних характеристик багатопаливних агрегатів, а також агрегатів, що використовують і одночасно генерують декілька видів паливно-енергетичних ресурсів. Об'єднання енергетичних характеристик двох та більше агрегатів в характеристику одного об'єднаного агрегату. Блочна структура «АСОУМетЕнерго», що забезпечує її універсальність.

Практична цінність. Запропонована авторами система «АСОУМетЕнерго» може бути поетапно впроваджена на металургійних підприємствах, а також в інших галузях промисловості. Розроблені авторами принципи, методики, алгоритми та аналітичні залежності можна використовувати для прогнозного планування виробництва продукції і споживання паливно-енергетичних ресурсів всієї промисловості, а також всього господарства країни, як єдиного «умовного» енерготехнологічного агрегату. Стаття може бути корисною для проектувальників, спеціалістів-енергетиків та металургів, а також для студентів вищих технічних навчальних закладів.

Ключові слова: автоматизована система, оперативне управління, агрегат, цех, підприємство, продукція, паливно-енергетичні ресурси, енерготехнологічна характеристика, характеристика ефективності енергоспоживання, характеристика питомого використання енергії, імітаційне моделювання, імітаційна модель агрегату, імітаційна модель цеху, графік енергоспоживання.

Stanislav Stasevskyi, State-enterprise Ukrainian Institute For Designing Iron and Steel Works, Dnipro, Ukraine. ORCID: 0000-0002-4841-1111. E-mail: gipromez@ceo.com.ua

Oleksandr Shcherbakov, State-enterprise Ukrainian Institute For Designing Iron and Steel Works, Dnipro, Ukraine. ORCID: 0000-0003-1090-9894. E-mail: shcherbakov@ukrgipro.dp.ua

Bohdan Vyshnevskiy, State-enterprise Ukrainian Institute For Designing Iron and Steel Works, Dnipro, Ukraine. ORCID: 0000-0002-5824-5794. E-mail: postmaster@gipromez.dp.ua

Hennadii Voitkovskiy, State-enterprise Ukrainian Institute For Designing Iron and Steel Works, Dnipro, Ukraine. ORCID: 0000-0001-5290-1095. E-mail: Voitkovskiy.hp@ukrgipro.dp.ua

Tetiana Kapustina, State-enterprise Ukrainian Institute For Designing Iron and Steel Works, Dnipro, Ukraine. ORCID: 0000-0002-5956-1465. E-mail: kapustina.to@ukrgipro.dp.ua

Oleksandr Tsukanov, Pridneprovsky State Academy for Construction and Architecture, Dnipro, Ukraine. ORCID: 0000-0002-1130-3109. E-mail: Kirillovat183@gmail.com

Oleksii Lebedev, PJSC «Zaporozhstal Steel Plant», Zaporozhye, Ukraine. ORCID: 0000-0003-3748-5761. E-mail: lebedev140880@inloud.com

AUTOMATED DISPATCH CONTROL SYSTEM OF ENERGY PRODUCTION IN METALLURGICAL INDUSTRY

Purpose. The purpose of the research and developments prepared by the authors is to create three-level automated dispatch control system of energy production in metallurgical industry. This system, when subsequent connection of subprograms for production planning, financial, economic and commercial activities, supply of raw materials and resources taking into account environmental protection, will become an integrated computer system that will ensure the economic stability of the enterprise in the difficult conditions of the modern market.

Methods. The operation of each unit and shop as a set of units is simulated. At the same time, the plant-wide consumptions of fuel and energy resources for heating, ventilation, air conditioning, lighting, transportation, etc. are related to a separate "conventional" shop. The characteristics of the units such as energy-technological characteristics, energy efficiency and specific energy consumption are developed and used. The characteristics of units are constantly specified at predetermined time intervals according to the results of simulation of their operation. In general, the metallurgical production processes accompanied by consumption processes and the simultaneous generation of fuel and energy resources by units and shops are simulated. The simulation parameters are the amount of fuel and energy resources and the resulting products. The principles of dynamic programming are used. The proposed automated system was developed by authors based on many years of experience in designing of metallurgical enterprises, shops and units, including construction, field supervision, calculation of fuel and energy balances, etc.

Results. The ideology, schemes and operation mode of the proposed automated dispatch control system of energy production in metallurgical industry, which is called "ASOUMetEnergo", were developed. The capabilities of this system were described. The mathematical and organizational support, as well as a plan for its phased implementation in the enterprise were prepared. The methodology, basic concepts and parameters for simulation of units and shops were elaborated. Mathematical dependencies and formulas were developed for the power characteristics of units that work with the simultaneous consumption and generation of several types of fuel and energy resources, as well as for finding the optimal parameters for the operation of units when their energy characteristics were approximated by polynomials of the second degree. Formulas for combining the characteristics of several units in one unit were obtained. GP Ukrigiprom and the authors propose to develop the software "ASOUMetEnergo" for specific enterprises together with their specialists, who are well aware of their energy and technological units.

Originality. The automated dispatch control system of energy production in metallurgical industry "ASOUMetEnergo" covering all process and energy units of the enterprise was developed and proposed for implementation for the first time. Its ideology, mathematical and organizational support were elaborated. The algorithm for the simulation of units and shops of the enterprise was prepared. All characteristics of the units such as energy-technological characteristics, energy efficiency and specific energy consumption were approximated by polynomials of the second degree. This ensured their greater accuracy in comparison with linear equations and the convenience of solving a system of second-order equations when the first derivatives shall be found (for example, when using the method of undetermined Lagrange multipliers or gradient methods). The methods for obtaining the energy characteristics of multi-fuel units, as well as units that use and simultaneously generate several types of fuel and energy resources were developed. The energy characteristics of two or more units were combined in the characteristic of one joint unit. The block structure of ASOUMetEnergo was provided for its versatility.

Practical implications. The ASOUMetEnergo system proposed by the authors can be phased in at metallurgical enterprises, as well as in other industries. The principles, methods, algorithms and analytical dependencies developed by the authors can be used for forecast planning of production and consumption of fuel and energy resources for the entire industry, as well as for the entire economy of the country, as a single "conventional" energy technology unit. The article may also be useful for designers, power engineers and metallurgists, as well as for students of higher technical educational institutions.

Key words: automated system, dispatch control, unit, shop, enterprise, products, fuel and energy resources, energy and technological characteristics, energy efficiency characteristics, specific energy consumption characteristics, simulation, unit simulation model, shop simulation model, energy consumption schedule.

Стасевский Станислав Леонидович, Государственное предприятие «Украинский институт по проектированию металлургических заводов», г. Днепр, Украина. ORCID: 0000-0002-4841-1111. E-mail: giprometz@ceo.com.ua

Щербakov Александр Александрович, Государственное предприятие «Украинский институт по проектированию металлургических заводов», г. Днепр, Украина. ORCID: 0000-0003-1090-9894. E-mail: shcherbakov@ukrgipro.dp.ua

Вишневский Богдан Николаевич, Государственное предприятие «Украинский институт по проектированию металлургических заводов», г. Днепр, Украина. ORCID: 0000-0002-5824-5794. E-mail: postmaster@giprometz.dp.ua

Войтковский Геннадий Петрович, Государственное предприятие «Украинский институт по проектированию металлургических заводов», г. Днепр, Украина. ORCID: 0000-0001-5290-1095. E-mail: Voitkovskiy.hp@ukrgipro.dp.ua

Капустина Татьяна Олеговна, Государственное предприятие «Украинский институт по проектированию металлургических заводов», г. Днепр, Украина. ORCID: 0000-0002-5956-1465. E-mail: kapustina.to@ukrgipro.dp.ua

Цуканов Александр Артемович, Приднепровская Государственная Академия строительства и архитектуры, г. Днепр, Украина. ORCID: 0000-0002-1130-3109. E-mail: Kirillovat183@gmail.com

Лебедев Алексей Сергеевич, ПАО «Запорожсталь», г. Запорожье, Украина. ORCID: 0000-0003-3748-5761. E-mail: lebedev140880@inloud.com

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ МЕТАЛУРГИЧЕСКОЙ ЭНЕРГЕТИКОЙ

Цель. Целью выполненных авторами исследований и разработок является создание автоматизированной трехуровневой системы оперативного управления металлургической энергетикой. Эта система при последующем подключении подпрограмм производственного планирования, финансово-экономической и коммерческой деятельности, обеспечения сырьем и ресурсами с учетом охраны окружающей природной среды станет интегрированной компьютерной системой, которая обеспечит экономическую устойчивость предприятия в сложных условиях современного рынка.

Методика. Имитационное моделирование работы каждого агрегата и цеха, как совокупности агрегатов. При этом общезаводские расходы топливно-энергетических ресурсов на отопление, вентиляцию, кондиционирование, освещение, транспорт и др. относятся к отдельному «условному» цеху. Разработка и использование характеристик агрегатов: энерготехнологических, эффективности энергоиспользования и удельных расходов энергии. Постоянное уточнение характеристик агрегатов через заданные промежутки времени по результатам имитационного моделирования их работы. В общем производится имитационное моделирование металлургических процессов производства продукции, которые сопровождаются процессами потребления и одновременной генерации топливно-энергетических ресурсов агрегатами и цехами. Параметрами моделирования являются количества топливно-энергетических ресурсов и получаемой продукции. Использование принципов динамического программирования. Разработка предлагаемой автоматизированной системы на основе многолетнего опыта проектирования авторами металлургических предприятий, цехов и агрегатов, включая строительство, авторский надзор, расчет топливно-энергетических балансов и др.

Результаты. Разработаны идеология, схемы и режим работы предлагаемой автоматизированной

системы оперативного управления металлургической энергетикой, которая получила название «АСОУМетЭнерго». Описаны возможности этой системы. Разработано математическое и организационное обеспечение, а также план ее поэтапного внедрения на предприятии. Разработана методика, основные понятия и параметры имитационного моделирования агрегатов и цехов. Разработаны математические зависимости и формулы для энергетических характеристик агрегатов, которые работают с одновременным потреблением и генерацией нескольких видов топливно-энергетических ресурсов, а также для нахождения оптимальных параметров работы агрегатов, когда их энергетические характеристики аппроксимированы полиномами второй степени. Получены формулы для объединения характеристик нескольких агрегатов в один агрегат. ГП «Укргипромез» и авторы предлагают разрабатывать программное обеспечение «АСОУМетЭнерго» для конкретных предприятий совместно с их специалистами, которые хорошо знают свои энерготехнологические агрегаты.

Научная новизна. Впервые разработана и предложена к внедрению автоматизированная система оперативного управления металлургической энергетикой «АСОУМетЭнерго», которая охватывает все технологические и энергетические агрегаты предприятия. Разработаны ее идеология, математическое и организационное обеспечение. Разработан алгоритм имитационного моделирования агрегатов и цехов предприятия. Все характеристики агрегатов – энерготехнологические, эффективности энергоиспользования и удельных расходов энергии аппроксимируются полиномами второй степени. Это обеспечивает их большую точность по сравнению с линейными уравнениями и удобство решения системы уравнений второго порядка, когда требуется нахождение первых производных (например, при использовании метода неопределенных множителей Лагранжа или градиентных методов). Разработка методов получения энергетических характеристик многотопливных агрегатов, а также агрегатов, использующих и одновременно генерирующих несколько видов топливно-энергетических ресурсов. Объединение энергетических характеристик двух и более агрегатов в характеристику одного объединенного агрегата. Блочная структура «АСОУМетЭнерго», что обеспечивает ее универсальность.

Практическая значимость. Предложенная авторами система «АСОУМетЭнерго» может быть поэтапно внедрена на металлургических предприятиях, а также в других отраслях промышленности. Разработанные авторами принципы, методики, алгоритмы и аналитические зависимости можно использовать для прогнозного планирования производства продукции и потребления топливно-энергетических ресурсов всей промышленности, а также всего хозяйства страны, как единого «условного» энерготехнологического агрегата. Статья может быть полезна для проектировщиков, специалистов-энергетиков и металлургов, а также для студентов высших технических учебных заведений.

Ключевые слова: автоматизированная система, оперативное управление, агрегат, цех, предприятие, продукция, топливно-энергетические ресурсы, энерготехнологическая характеристика, характеристика эффективности энергоиспользования, характеристика удельных расходов энергии, имитационное моделирование, имитационная модель агрегата, имитационная модель цеха, график энергопотребления.

Рукопис надійшов 28.03.2020