

УДК 621.316:621.365.2(07).14

СИСТЕМНЫЕ ФАКТОРЫ ОЦЕНКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРО- СТОХАСТИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ ЭНЕРГО- ЭФФЕКТИВНОСТИ

И. Д. Труфанов

Доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой*

Контактный тел.: 050-421-17-24

А. П. Лютый

Кандидат технических наук*

Контактный тел.: (061) 283-40-22

М. А. Поляков

Кандидат технических наук, доцент*

Контактный тел.: (061) 769-83-95

К. И. Чумаков

Ассистент*

Контактный тел.: 066-551-10-87

E-mail: adlas@mail.ru

А. В. Близняков

Кандидат технических наук, доцент*

*Кафедра «Электрические аппараты»**

Контактный тел.: (061) 769-83-95

Р. Б. Осипчук

Кафедра «Теплотехника и гидравлика»***

***Запорожский национальный технический университет
ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, Украина, 69063

Проводиться системне обґрунтування теоретичних підходів до рішення системо- та схемо технічних задач оцінки працездатності, реалізації алгоритмів динамічного функціонування та контурів корекції параметрів АСК електричного режиму потужного дугового сталеплавильного комплексу з мікроконтролерним ПИД регулятором потужності з забезпеченням ресурсо- та енергозбереження

Ключові слова: алгоритм, корекція, система, регулятор, енергозбереження

Проводится системное обоснование теоретических подходов к решению задач оценки работоспособности, реализации алгоритмов динамического функционирования и контуров коррекции параметров АСУ электрического режима дугового сталеплавильного комплекса с микроконтроллерным ПИД-регулятором мощности с обеспечением ресурсо- и энергосбережения

Ключевые слова: алгоритм, коррекция, система, регулятор, энергосбережение

In this article the authors carry out theoretical approaches grounding of tasks in the sphere of efficiency evaluation and realization of dynamic functioning algorithms and ASO parameters correction contours in powerful arc steel melting regime of steel melting complex with micro controller proportional-integral differential – power regulator with resource and energy saving provision

Keywords: algorith, correction, system, regulator, energysaving

Введение

Современный этап развития теории и практики энерготехнологического, электронного и функционального системного алгоритмического обеспечения автоматизации иерархических, в т. ч. энергоэкономических и электротехнологических компьютеризированных процессов, характеризуется схематическим доступом к Internet, специализированным электронным библиотекам по технологии плавления металлов и прецизионных сплавов на основе современной

электротехнологии и узкоспециализированных баз данных.

Такая методология призвана качественно обеспечить процессы лингвистического, математического, логико-семантического общесистемного методологического совершенствования, обобщения и агрегирования методов, моделей, законов автоматического управления и регулирования координат производства металла, с помощью которых определяются функциональные, структурные и информационные характеристики электромеханических систем электрометаллур-

гического назначения. Указанные факторы призваны обеспечить выполнение Программы энергосбережения Украины [1], региональных программ энергосбережения [2] (в частности, Запорожского региона) и на их основе Энергетической стратегии Украины до 2030 г.

Такие программы базируются на основе реализации последних достижений в области достижения в области компьютерной автоматизации технологических процессов и производства [3, 4]. Научное обеспечение в этой энергоёмкой отрасли выполняется на основе трудов научных коллективов Национального университета «Львовская политехника» [5-9], Запорожского национального технического университета [6], в т.ч. научно-производственных коллективов и др.

Процессы производственной адаптации электротехнических, силовых и управляющих электронных и компьютерных комплексов к статическим (детерминированным и стохастическим) условиям электрометаллургического производства максимально системно индивидуализируются (дифференцируются) и детерминируются, администрирование критериев сводится к минимуму, на основании чего промышленный компьютер является основным системным оператором - «пультовщиком» - плавильщиком.

Ведущие электротехнические и компьютерные фирмы *Computer Advantech, Samsung Electronics, Siemens*, корпорация «Квазар – Микро», *Philips Electronics* и др. приоритетным направлением развития НИР и ОКР и инженерных стратегических решений в области компьютерной и информационной технологии управления энергоэкономическими процессами энергопреобразования считают самодостаточным и полноценным электротехнологическое инновационное вооружение современной электрометаллургии.

Разработка стратегии, узловых и проблемно-ориентированных факторов системотехники электротехнических комплексов металлургического, в особенности электрометаллургического, назначения являются одним из ключевых принципов разработки современного глобализированного, компьютеризированного этапа инновационных технологий электрометаллургии высококачественных сталей специального назначения и прецизионных сплавов чёрных, тяжёлых чёрных, цветных и редких металлов в условиях электрометаллургических заводов на Украине. Данная стратегия соответствует Программе eEurope в рамках Лиссабонской стратегии и Зелёной карты Энергетической стратегии Европейского Союза. Она призвана повысить уровень конкурентоспособности экономики Украины. Повышение интенсивности энерготехнологических процессов динамического функционирования электрометаллургических агрегатов на базе инженерной психологии и теории компьютерной организации концептуально закрепляют за научными исследованиями в этой области новое (инновационное) направление компьютерного менеджмента при создании высокотехнологического и наукоёмкого продукта в области современного электротехнологического оборудования в горно-металлургическом комплексе.

В указанных условиях основным системно-информационным комплексом является компьютерно-ориентированный управляющий комплекс автоматизированного формирования законов идентификации,

адаптации, оптимизации, интерполяции и экстраполяции на базе алгоритмов, моделей и законов построения интегро-дифференциальных систем контроля различного иерархического уровня АСУТП и АСУП. Такая система в своём составе (в т.ч. в интерфейсах *Rs-232* и *RS-485*) имеет измерители (датчики) информации, преобразователи, нормализаторы и источники имитационных стандартных сигналов, её системометодологическое обеспечение в электрометаллургии (особенно стали) базируется на принципах построения отдельных интегрированных функциональных блоков и систем, вопросах определения допустимых пределов вариации параметров и характеристик информационной аппаратуры и выходных сигналов функциональных блоков, определяющих динамическое качество технической стойкости и работоспособности в промышленных условиях электрометаллургии, что определило

Актуальность решаемой задачи и постановку задач исследований

Электрометаллургия стали характеризуется наличием сложно-структурированных функциональных и алгоритмических связей между динамическими звеньями различной физической природы (электромагнитной, электронной, гидродинамической, теплотехнической, контрольно-информационной и др.).

На основании вышеизложенного, нами ставятся следующие задачи исследований в области реализации информационно-алгоритмического обеспечения электротехнологических процессов в направлении:

- дальнейшей концентрации энергии в плавильном пространстве с целью достижения высоких скоростей нагрева «садки» и градиентов температур печных элементов;

- реализации высокоэффективных по энерго- и ресурсосбережению законов линеаризованного и нелинейного экстраполяционного регулирования и распределения температур по объёму плавильного пространства и во времени с целью большой точности и стабильности соблюдения технологического режима на различных этапах и переделах плавления металла;

- регулирование утилизации теплоэнергетических потоков в любых плавильных атмосферах (окислительной, восстановительной, нейтральной и др.), а также в вакууме;

- повышение транспортабельности энергоносителей и функциональной простоты их подачи в плавильное пространство электропечи;

- резкого снижения вредного влияния металлургии на окружающую среду и среду обитания человека и животных.

При исследованиях энергоэффективности динамического функционирования электротехнологического агрегата электросталеплавления в направлении решения вышеозначенных задач реализуются следующие проблемы: увеличение ёмкости и мощности печного агрегата без увеличения количества обслуживающего персонала (важный социальный фактор); возрастания производительность и снижения себестоимость продукта; снижения удельных потерь энергоносителей и дополнительного вовлечения в производство вторич-

ных энергоресурсов и бросовых материалов; увеличения коэффициента полезного действия энергопреобразования энергопотоков в технологическую теплоту плавления металла.

В то же время возрастание мощности и функциональное усложнение электротехнических и электро-технологических печных комплексов, расширение технологических этапов и специфика их функционирования вызывают резкие колебания нагрузки сети питания, их несимметрию, что в свою очередь требует необходимость решения ряда электротехнических задач, сильно влияющих на конечную эффективность результатов их использования. Откуда следует, что главными задачами являются задачи повышения надёжности и энергетической экономичности работы самих печных агрегатов и систем их электро- и энергообеспечения, высокоэффективной стабилизации режимов энергопреобразования и плавильных агрегатов, рациональной организации и оптимизации режимов энерго- и электропотребления, снижения расходов энергоресурсов на единицу выпускаемой продукции.

Нами при аналитическом обосновании *законов и критериев оценки качества динамического функционирования электропечных агрегатов, характеризующих работоспособность систем электрооборудования и электроснабжения* приняты к рассмотрению вероятностные подходы и концепции разработки функциональной и алгоритмической структуры АСУЭР, АСУТП на локальном уровне двухуровневой АСУТП сталеплавильного цеха.

Исследования режимов работы электропечных агрегатов на основе вероятностных подходов и факторов позволяют охарактеризовать степень нестабильности электрических режимов электрических агрегатов и системный стохастический подход к разработке алгоритмической структуры информационного и регулирующего контуров АСУТП и цеховой АСУП. Указанный подход реализуется на основе научных положений [5, 6] дисперсионного анализа статистических характеристик электропечного агрегата.

1. Системные статистические факторы оценки работоспособности системы регулирования режима нагружения электротехнического сталеплавильного дугового агрегата

1). Для различных агрегатов дисперсии колебаний токов составляют [6] (в относительных единицах): $d = \frac{D_1}{D_{1max}} = (0,3 - 0,05) (D_{1max} = \frac{I_k^2}{4})$; I_k - ток эксплуатационного к. з.), откуда следует что оптимизация режимов работы ДСП, РПГ или подобных печей, вследствие их существенной нестационарности должна проводиться по критерию минимума дисперсии колебаний тока, откуда следуют пути решения задач оптимального проектирования САУ режимом электропотребления.

2). Аппроксимация области работоспособности, в общем случае, проводится на основе решения системы неравенств $\sum_{i=1}^n a_i(c_{iv} - c_{im}) \leq 0$; $v=1, 2, \dots, N$ (n – размерность пространства конструктивных параметров $\{c\}$, N – число граничных (принятых к анализу) точек; c_{im} - координаты m -ой граничной точки, через которую проводится ограничивающая гиперплоскость; c_{iv} - координаты остальных точек ($v=1, 2, \dots, N$; $v \neq m$); a_i - неизвестные коэффициен-

ты, которые ниже принимаются как корректирующие, отсюда алгоритм коррекции на k -ом шаге при невыполнении неравенства с номером $ч$ будет иметь следующий вид: $a_i^2 = a_i^{k-1} - \lambda(c_{iv} - c_{im})$, $i=1, 2, \dots, n$. Коэффициент λ характеризует длину шага (кванта времени) и выбирается постоянным ($\lambda = const$) или из условия $\lambda \geq \sum_{i=1}^n a_i^{k-1} (c_{iv} - c_{im})^2$. При вычислении подобных координат для всех граничных точек с координатами c_{im} , $m=1, 2, \dots, N$ будет иметь: $\sum_{i=1}^n a_{im} c_i - \sum_{i=1}^n a_{im} c_{im} \leq 0$; a_{im} - приближение для m -ой граничной точки.

3). В случае невыпуклых областей рассматриваемых характеристик работоспособности используется теория сплайнов [13], где коэффициенты c_i принимаются в виде Φ -функций. В данном случае общая форма нелинейных неравенств принимает общий вид: $\sum_{i=1}^l a_{im} \Phi_i(c_1, c_2, \dots, c_n) \leq 0$; $m=1, 2, \dots, n$; $\Phi_i(c_1, c_2, \dots, c_n)$, $i=1, 2, \dots, N$). Если $l=N+1$, то коэффициенты a_{il} определяются из системы N однородных линейных уравнений с $N+1$ неизвестной величиной $\sum_{i=1}^l a_{il} \Phi_i(c_{1v}, c_{2v}, \dots, c_{nv}) = 0$; $v=1, 2, \dots, N$. Для уменьшения числа l применим МНК, где для каждой граничной точки составляется система линейных неравенств, из которых находятся a_{im} : $\sum_{i=1}^l a_{im} [\Phi_i(c_{ik}, c_{2k}, \dots, c_{nk}) - \Phi_i(c_{1m}, c_{2m}, \dots, c_{nm})] \leq 0$. Решение данной системы, например, методом последовательных приближений относительно точки a_{im} , получаем систему нелинейных неравенств, описывающих область значений коэффициентов (параметров), характеризующих работоспособность (по принятому критерию):

$$F_i = \sum_{i=1}^l a_{im} \Phi_i(c_1, c_2, \dots, c_n) - \sum_{i=1}^l a_{im} \Phi_i(c_{1m}, c_{2m}, \dots, c_{nm}) \leq 0; \quad m=1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

4). Для решения задач контроля качества нелинейная система (1) линеаризуется и находится допустимая величина отклонения ΔR линеаризованной зависимости $\bar{R} = \bar{F}(c)$ вида

$$\Delta R = \sum_{j=1}^n \frac{\partial F_i}{\partial c_j} \Big|_{c=c_0} \Delta c_j. \quad (2)$$

Достаточным условием сходимости итерационного процесса (2) в этом случае будет являться неравенство $\mu = 2nabq \leq 1$ ($a = \max \sum_{j=1}^n |g_{ij}|$ - m -норма матрицы G , b - норма вектора $\Delta \vec{c}$). Это соотношение определяет m -норму матрицы функций чувствительности второго порядка:

$$q = \max_k \sum_{k=1}^n \left| \frac{\partial^2 F_i}{\partial c_k \partial c_j} \right|_{c=c_0}. \quad (3)$$

5). Если параметризованная система содержит нелинейные элементы, то импульсная переходная функция линейной нестационарной части будет иметь вид:

$$k(t, \tau) = \sum_{i=0}^l \sum_{\mu=0}^m c_{i\mu} \phi_{\mu}(\tau) L_i(t), \quad (4)$$

где L_i - нормированные ортогональные функции, обобщающий коэффициент будет иметь вид:

$$d_{ml_j} = \sum_{f=1}^g \beta_{jf} \alpha_{mlf}.$$

Данное уравнение определяет область работоспособности, которая аппроксимируется системой линейных неравенств:

$$\sum_{\mu=0}^m \sum_{i=0}^l \gamma_{\mu k} \Delta c_{\mu i} + \sum_{f=0}^j \sum_{\mu=0}^m \sum_{i=0}^l \eta_{\mu f k} \Delta d_{\mu f k} \leq V_k; \quad (5)$$

где $\Delta c_{\mu i}$; $d_{\mu f}$ - отклонения параметров относительно номинальных значений $c_{\mu i}^0$, $d_{\mu f}^0$, $\gamma_{\mu k}^0$, $\eta_{\mu f k}$, V_k - постоянные коэффициенты, которые находятся при аппроксимации области работоспособности. Для разрешения (5) следует перестроить область работоспособности по параметрам $c_{\mu i}$, $d_{\mu f}$ в область работоспособности параметров элементов системы. Для определения алгоритма контроля линеаризуется выходной сигнал $\Delta z(t)$ по параметрам $c_{\mu i}$ и $d_{\mu f}$:

$$\Delta z(t) = \sum_{f=0}^j \sum_{\mu=0}^m \sum_{i=0}^l \Delta d_{\mu f} Q_{\mu f}(t) + \sum_{\mu=0}^m \sum_{i=0}^l \Delta c_{\mu i} Q_{\mu i}(t), \quad (6)$$

где $Q(t)$ - функция чувствительности по указанным параметрам:

$$Q_{\mu f}(t) = L_i(t) \int_0^t \gamma_{\mu}(\tau_2) \left\{ \sum_{k=0}^l \sum_{v=0}^m c_{vk}^0 L_k(\tau_2) \int_0^{\tau_2} \gamma_v(\tau_2) x(\tau_1) d\tau_1 \right\};$$

$$Q_{\mu i}(t) =$$

$$= \sum_{f=1}^j \int_0^t f \left(\sum_{k=0}^l \sum_{v=0}^m c_{kv}^0 \int_0^v \varphi_k(\tau) \cdot L_{\gamma}(v) x(\tau) d\tau \right)^{f-1} \int_0^v \varphi_{\mu}(\tau) L_i(v) \cdot x(\tau) d\tau \cdot$$

$$\sum_{\gamma=0}^m \sum_{v=0}^l d_{\gamma f} \gamma_v(v) L_{\gamma}(t) dv$$

При условии записи уравнения (7) для ряда значений t получим систему линейных уравнений относительно приращений параметров:

$$\Delta z(t_p) = \sum_{j=0}^j \sum_{\mu=0}^m \sum_{i=0}^l \Delta d_{\mu f} Q_{\mu f}(t_p) + \sum_{\mu=0}^m \sum_{i=0}^l \Delta c_{\mu i} Q_{\mu i}(t_p),$$

$p = 1, 2, \dots, N$ (N - число реализаций t):

$$N = (m+1)(l+1) + (m+1)(l+1)(j+1) \quad (8)$$

6). Статистический контроль нелинейных стационарных систем осуществляется на основе задачи контроля работоспособности нелинейной стационарной системы при наличии интенсивных помех. Разомкнутая система представляется моделью с разомкнутой главной обратной связью, для параметров которой задается область работоспособности вида:

$$\sum_{f=0}^j \sum_{i=0}^l c_{fi} \alpha_{fik} \leq \beta_k, \quad k = 1, 2, \dots, M, \quad (9)$$

где α_{fik} , β_k - постоянные коэффициенты (коэффициенты передачи).

7). Статистической оценкой (9) является взаимокорреляционная функция $R_{zx}(\tau_i)$ командного сигнала и выходного сигнала системы:

$$R_{zx}(\tau) = \sum_{f=0}^j \sum_{i=0}^l c_{fi} R_{fi}(\tau);$$

$$R_{fi}(\tau) = M[x(t+\tau)u_i(t)] = \int_{-\infty}^t L_i(t-\tau) k_{fi}(\tau) d\tau; \quad (10)$$

где $k_{fi}(\tau) = M[x^f(t) x(t+\tau)]$ - момент $(f+1)$ порядка от командного сигнала; L_i - импульсная переходная функция фильтров $L(p)$; R_{fi} - взаимокорреляционная функция командного сигнала $U_{fi}(t)$.

8). Контроль работоспособности при малых отклонениях параметров. Практические АСУТП (АСУЭР) локального уровня синтезируются при учёте допустимых диапазонов вариации параметров (10-20 %), при этом зависимость изменения характеристик от номинальной точки представляется возможным линеаризовать. Это существенно упрощает построение области работоспособности по измеряемым характеристикам по следующему алгоритму:

$$\Delta \bar{R}_v = \bar{R}_v - \bar{R}_{0v} = \sum_{j=1}^n S_{vj} \Delta c_j; \quad v = 1, 2, \dots, n; \quad \Delta c = G \Delta R, \quad (11)$$

где $S_{vj} = \left. \frac{\partial F}{\partial c_j} \right|_{c=c_0}$ - функция чувствительности в номинальной точке; $\Delta \bar{R} = (\Delta \bar{R}_v)$ - вектор отклонений измеряемых характеристик от R_{0v} при $\Delta \bar{c}$ - вектор отклонений от номинальных значений; $G = [g_{ij}]$ - матрица размерности $n \times n$, обратная матрица $Q = [q_{ij}]$, составленной из функций чувствительности $q_{ij} = \sum_{v=1}^n S_{vi} S_{vj}$.

При подстановке в (1) значений (11) имеем условие работоспособности в пространстве измеряемых характеристик:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \sum_{v=1}^n g_{iv} \Delta R_v \leq b_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} c_{0j}; \quad i = 1, 2, \dots, M;$$

$$\Delta R_{v \min}(\lambda) \leq \Delta R_v(\lambda) \leq \Delta R_{v \max}(\lambda). \quad (12)$$

и область вариации параметров обеспечения нормальной работоспособности.

На основании (12) имеем область вариации параметров при обеспечении номинальной работоспособности. При рассмотрении нелинейности определённого класса при детерминированного класса при детерминированном командном сигнале (при условии определённости функции чувствительности при стандартном сигнале управления) система (8) обращается и при подстановке в него (12) имеем:

$$\sum_{p=1}^N \sum_{\mu=0}^m \sum_{i=0}^l B_{\mu i} \gamma_{\mu k} \Delta z(t_p) + \sum_{p=1}^N \sum_{f=0}^j \sum_{\mu=0}^m \sum_{i=0}^l A_{\mu f} \eta_{\mu f k} \leq V_k;$$

$$\Delta d_{\mu f} = \sum_{p=1}^N A_{\mu f} \Delta z(t_p);$$

$$\Delta c_{\mu i} = \sum_{p=1}^N B_{\mu i} \Delta z(t_p); \quad k = 1, 2, \dots, M, \quad (13)$$

где $A_{\mu f}$, $B_{\mu i}$ - элементы обратной матрицы для систем уравнений (8).

9). Особенности процессов контроля работоспособности по характеристикам при больших вероятностных вариациях параметров.

В таком случае устанавливается линейная связь взаимокорреляционной функции $R_{zx}(\tau_i)$ и выходного (10) с параметрами объекта. При записи (10) для $N = (l+1)(j+1)$ значений τ и обращении системы получаемых уравнений находим условия работоспособ-

ности в пространстве значений взаимно-корреляционной функции.

$$\sum_{v=0}^N \sum_{f=0}^j \sum_{i=1}^1 \alpha_{\text{ifk}} A_{\text{vifk}} R_{\text{zk}}(\tau_k) \leq \beta_k; \quad k = 1, 2, \dots, M, \quad (14)$$

где A_{vifk} - элемент обратной матрицы (9) для различных значений τ .

Из значений $R_{\text{zx}}(\tau)$ получаем соотношения для моментов взаимокорреляционной функции

$$m_v = \int_0^{\infty} R_{\text{zx}}(\tau) \psi_v(\tau) d\tau; \quad m_v = \sum_{f=0}^j \sum_{i=0}^1 c_f l_{\text{vif}}, \quad v = 1, 2, \dots, N;$$

$$N = (1+1)(j+1),$$

где $l_{\text{vif}} = \int_0^{\infty} R_{\text{if}}(\tau) \psi_v d\tau$ - заранее вычисленные моменты, откуда имеем условие работоспособности в пространстве моментов взаимокорреляционной функции:

$$\sum_{v=0}^N \sum_{f=0}^j \sum_{i=0}^1 \alpha_{\text{ifk}} B_{\text{vifk}} m_v \leq \beta_k; \quad k = 1, 2, \dots, M, \quad (16)$$

Где B_{vifk} - элементы обратной матрицы системы (15), т. е. контроль производится путём вычисления моментов:

$$m_v = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \int_0^{\infty} z(t-\tau) \psi_v d\tau x(t) d(t) = \int_0^{\infty} R_{\text{zx}}(\tau) \psi_v d\tau. \quad (16.1)$$

На практике при настройке АСУ контроль работоспособности проводится при детерминированном управляющем (зондирующем) сигнале. В этом случае выходной сигнал будет пропорционален параметрам d_{vif} при любых отклонениях этих параметров:

$$z(t) = \sum_{f=0}^j \sum_{i=0}^1 \sum_{\mu=0}^m d_{\text{vif}} F_{\text{vif}}(t), \quad (17)$$

$$\text{где } F_{\text{vif}}(t) = \int_0^{\infty} x^f(\tau) \varphi_{\mu}(\tau) L_i(\tau) d\tau.$$

Контроль линейной нестационарной системы, имеющей $z(t) = \sum_{i=0}^1 \sum_{\mu}^m c_{\text{vif}} F_{\text{vif}}(t)$; $F_{\text{vif}}(t) = \int_0^t x(\tau) \varphi_{\mu}(\tau) L_i(\tau) d\tau$, по моментам взаимно-корреляционной функции (1.15) получим:

$$m_v = \sum_{f=0}^j \sum_{i=0}^1 \sum_{\mu=0}^m d_{\text{vif}} l_{\text{vif}}; \quad v = 1, 2, \dots, \rho; \\ \rho = (m+1)(1+1)(j+1); \\ l_{\text{vif}} = \int_0^{\infty} F_{\text{vif}}(t) \psi_v(t) dt. \quad (18)$$

Здесь сигналы $F_{\text{vif}}(t)$ - элементы обратной матрицы (18), т. е. контроль осуществляется путём измерения моментов выходного сигнала и проверки условий работоспособности:

$$\sum_{v=1}^{\rho} \sum_{f=0}^j \sum_{\mu=0}^m \sum_{i=0}^1 \eta_{\text{vifk}} A_{\text{vifk}} m_v \leq V_k; \quad k = 1, 2, \dots, M. \quad (18.1)$$

Для контроля работоспособности по дисперсиям выходных сигналов фильтров (датчиков) в соответствии с (17) при представлении автокорреляционной функции комбинацией линейно-независимых функций $R(t) = \prod_{i=1}^n c_j i(t)$ или $R_p = \sum_{i=1}^n c_i \varphi_i(p)$; $p \equiv \frac{d}{dt}$, получаем модель объекта в форме операторной передаточной функции

$$W_{\text{ок}} = \frac{\sum_{i=1}^n c_{i,y+z} \varphi_i(p) - \sum_{i=1}^n c_{iy} \varphi_i(p)^{-1/2}}{\sum_{i=1}^n c_{i,x+z} \varphi_i(p) - \sum_{i=1}^n c_{ix} \varphi_i(p)^{-1/2}}, \quad (19)$$

где параметрами модели служат коэффициенты c_i , для которых методами граничных, матричных или статических испытаний определяют условия работоспособности. Контроль работоспособности объекта управления сводится к определению коэффициентов c_i по методу МНК ($m > n$) или путём ортогональной интерполяции в соответствии с (15):

$$D_j = \frac{k_j^2}{T_j} \sum_{i=1}^n c_i \varphi_i(p) \Big|_{p=\frac{1}{T_j}}, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (20)$$

и к проверке условий работоспособности, полученных в пространстве коэффициентов $\{c_i\}$.

10). Системотехника контроля работоспособности дискретных систем определяет условие нахождения c_j в допустимой области (пределах), описываемой линейными неравенствами:

$$\sum_{j=0}^N a_{mj} c_j \leq b_m; \quad m = 1, 2, \dots, M. \quad (21)$$

В этом случае задача определения характеристик выходного сигнала $y(nT)$ дискретной системы в соответствии с [13] представляется рядом Вольтерра:

$$y(nT) = y_0 + \sum_{m_1=0}^{\infty} k_1(m_1T) x(nT - m_1T) + \\ + \sum_{m_1=0}^{\infty} \sum_{m_2=0}^{\infty} k_2(m_1T, m_2T) x(nT - m_1T) \cdot \\ x(nT - m_2T) + \dots + \\ + \sum_{m_1=0}^{\infty} \dots \sum_{m_v=0}^{\infty} k_v(m_1T, m_2T, \dots, m_vT) x(nT - m_1T) \dots x(nT - m_vT). \quad (22)$$

В соответствии с [8] для линейной дискретной САУ в (22) следует оставить (ограничиться) только второй член. Динамические свойства САУ зависят от c_i , поэтому $k_v(m_1T, m_2T, \dots, m_vT)$ также являются функциями c_j , информация о которых заключается в выходном сигнале. Для малых отклонений параметров от номинальных значений имеем:

$$\Delta y(nT) = c_0 + \sum_{m_1=0}^{\infty} \sum_{j=1}^N \frac{\partial k_1(m_1T)}{\partial c_j} x(nT - m_1T) \Delta c_j + \\ + \sum_{m_1=0}^{\infty} \sum_{m_2=0}^{\infty} \sum_{j=1}^N \frac{\partial k_2(m_1T, m_2T)}{\partial c_j} \cdot \\ x(nT - m_1T) x(nT - m_2T) \Delta c_j + \dots + \\ + \sum_{m_1=0}^{\infty} \dots \sum_{m_v=0}^{\infty} \sum_{j=1}^N \frac{\partial k_v(m_1T, m_2T, \dots, m_vT)}{\partial c_j} \cdot \\ \Delta c_j x(nT - m_1T) x(nT - m_2T) \dots x(nT - m_vT). \quad (23)$$

Вычисление функций чувствительности следует производить с помощью многомерного дискретного преобразования Лапласа. В этом случае (23) следует представить в виде

$$\Delta y(nT) = \sum_{j=0}^N G_j(nT) \Delta c_j, \quad (24)$$

где $G_j(nT)$ - функция чувствительности по c_j , вычисляемая при синтезе САУ. При $n = n_0, n_1, \dots, n_N$ имеем

$$\Delta y(n_k T) = \sum_{j=0}^N G_j(n_k T) \Delta c_j; \quad k = 1, \dots, N. \quad (25)$$

где при обращении (25) определяется Δc_j , $j = 1, 2, \dots, N$: $[\Delta c_j] = [G_j(n_k T)]^{-1} [\Delta y(n_k T)]$. При подстановке $c_j = c_{j\text{ном}} + \Delta c_j b$ (1.21) получаем условия работоспособности по координатам (измеряемым) выходного сигнала САУ.

11). Для повышения помехоустойчивости рассмотренного метода контроль можно производить не по ординатам выходного сигнала системы, а по некоторым интегральным оценкам. В данном случае (24) представляется в обобщённом операторном виде:

$$A * \Delta y(nT) = \sum_{j=0}^N A * G_j(nT) \Delta c_j, \quad (26)$$

где A - линейный нестационарный оператор; $*$ - знак воздействия оператора. В этом случае необходимо при построении области работоспособности по измеряемым характеристикам пересчитать границу области работоспособности по параметрам в границе области работоспособности по измеряемым характеристикам, после чего проведенный контроль сводится к проверке соответствия изменяемых характеристик области работоспособности.

При наличии высокого уровня помех на входе и выходе исследование таких факторов качества динамического функционирования по работоспособности следует проводить статистическими методами (по взаимно-корреляционной функции входа и выхода, для чего (24) следует умножить на стандартный сигнал $x(nT - \lambda T)$ и воздействовать оператором усреднения A_1 :

$$A_1 * [\Delta y(nT) x(nT - \lambda T)] = \sum_{j=0}^N A_1 * [G_j(nT) x(nT - \lambda T) \Delta c_j]. \quad (27)$$

При $\lambda = \lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_n$ получим систему уравнений для нахождения Δc_j ; $G_j^* = A_1 * [G_j(nT) x(nT - \lambda T)]$ - заранее вычисленные функции чувствительности.

Для повышения достоверности результатов целесообразно измерять корреляционную функцию по каналу «вход-выход» $y_{\text{ном}}(nT)$ фильтра (датчиков тока и напряжения u_2 РПН), являющегося моделью системы регулирования длины дуги ДСП, т. е. вместо (1.27) будем иметь:

$$A_1 * [\Delta y(nT) y_{\text{ном}}(nT - \lambda T)] = \sum_{j=1}^N A_1 * [G_j(nT) y_{\text{ном}}(nT - \lambda T) \Delta c_j]; \quad (28)$$

где функции чувствительности $G_j^* = A_1 * [G_j(nT) y_{\text{ном}}(nT - \lambda T)]$ определяются на стадии синтеза системы.

12). При проведении контроля при больших отклонениях (вариациях) по (21) достигается большая универсальность. При этом для определения значений параметров с повышенной степенью точности при-

менимы итерационные методы решения нелинейных уравнений (например, беспоскоковый градиентный метод), который реализуется без перестройки вспомогательных операторов. В то же время следует отметить, что и в данном случае система является достаточно сложной с алгоритмической точки зрения. В случае исследования линеаризованной системы можно существенно упростить алгоритм контроля, если в качестве параметров использовать коэффициенты разложения q_j импульсной системы $k(nT)$ в ряд по какой-либо системе линейно-независимых функций $\phi_i(nT)$:

$$k(nT) = \sum_{i=0}^{N_1} q_i \phi_i(nT), \quad (29)$$

где контроль с помощью (25), (27), (28), (19) допускает любые отклонения параметров q_j .

Например, система управления режимом ДСП-50 (регулирования длины дуги) в линеаризованном изображении при управлении от МПК S7-315 имеет вид (рис. 1):

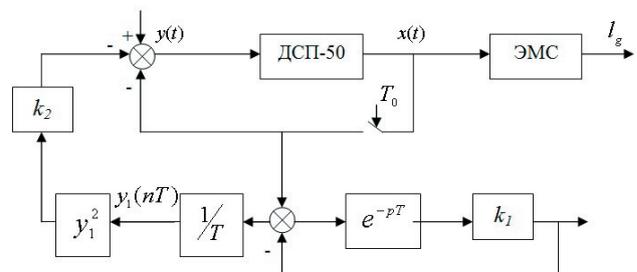


Рис. 1. АСУЭР ДСП-50 (канал перемещения электродов)

На рис. 1: ЭМС – электромеханическая система (ЭПУ 2-2 ... УХЛ4); l_g - длина дуги; $T_0 = T$ - постоянная квантования, равная 1 с; $k_1 = k_2 = 1$ (изменяемые работоспособности допускает отклонение параметров в 1% и она будет описываться системой уравнений: $k_1 - 1,01 \leq 0$; $k_2 - 1 \leq 0$; $0,99 - k_2 \leq 0$. На вход системы подаётся квантованный сигнал интегрального типа $x(t) = t$. В этом случае $y(nT) = nT + k_2 [(1/T)(nT - k_1(nT - T))]^2$, на основании чего система уравнений для отклонений будет иметь вид: $y(nT) - y_{\text{ном}}(n_1 T) = \Delta y(n_1 T) = \Delta k_2 - 2(n_1 - 1)T \Delta k_1$; $y(n_2 T) - y_{\text{ном}}(n_2 T) = \Delta y(n_2 T) = \Delta k_2 - 2(n_2 - 1)T \Delta k_1$. При $n_1 T = 1$, $n_2 T = 2$ область работоспособности для измеренных ординат $y_1(1)$ и $y_2(2)$ будет иметь вид: $0,5y(1) - 0,5y(2) + 0,49 \leq 0$; $0,5y(2) - 0,5y(1) - 0,501 \leq 0$; $y(1) - 2,01 \leq 0$; $1,99 - y(1) \leq 0$. Допустим $k_2 = 1,02$; $k_1 = 1$ и при этом $y(1) = 2,02$; $y(2) = 3,02$. В этом случае не удовлетворяется третье уравнение $2,02 - 2,01 = 0,01 > 0$, что свидетельствует о выходе параметров из области работоспособности.

13). Системный подход к аппроксимации контролируемой характеристики системой линейно-независимых функций. При параметризации системы необходимо решение задачи аппроксимации функций (реакции системы на стандартный задающий сигнал) с помощью системы линейно-независимых функций заданного вида (системы ортогональных функций или полиномов). Определение оптимального масштаба времени при конечном числе членов аппроксимирующего ряда определяет точность аппроксимации, т.

е. ставится задача определения масштабирующего коэффициента τ аппроксимирующих функций $\varphi_i(\tau)$: $y(t) = \sum_{i=1}^n c_j \varphi_j(\tau)$ (n - число членов разложения; c_i - коэффициенты аппроксимации; $\varphi_i(\tau)$ - известная система линейно-независимых функций с параметрически заданными масштабам времени. Для решения данной задачи используется критерий минимума средневзвешенного квадратического отклонения [8, 9, 11] аппроксимирующей функции от значений характеристики или определяются коэффициенты c_i из условия минимума средневзвешенного квадратического отклонения. Для функции веса $\gamma(t)$ имеем:

$$\int_0^{\infty} [y(t) - \sum_{i=0}^n c_j(\tau) \varphi_j(\tau)]^2 \gamma(t) dt = \min;$$

$$\int_0^{\infty} y(t) \gamma(t) \varphi_i(\tau) dt = \int_0^{\infty} \sum_{j=1}^n c_j(\tau) \gamma_j(\tau) \varphi_i(\tau) \gamma(t) dt;$$

$$i = \overline{0-n};$$

$$\int_0^{\infty} y(t) \gamma(t) \left[\frac{dc_i(\tau)}{d\tau} \varphi_i(\tau) + \frac{d\varphi_i(\tau)}{dt} c_j(\tau) \right] dt = \int_0^{\infty} \sum_{i=0}^n c_i(\tau) \varphi_i(\tau) \left[\frac{dc_i(\tau)}{d\tau} \varphi_i(\tau) + \frac{d\varphi_i(\tau)}{dt} c_i(\tau) \right] dt, \quad (30)$$

Представление (31) позволяет решить задачу формирования коэффициентов: $c_k = \int_0^{\infty} y(t) \varphi_k(t) \gamma(t) dt$; $k = \overline{0-m}$, и функций $\beta_{ik}(\tau)$, $i = \overline{0-n}$.

Для получения разложения (31) наиболее рационально использовать, например, полиномы Лаггера $L_k(t)$ при $\lambda(t) = \exp(-t)$ и $L_0(t) = 1$: $L_k(\tau) = \beta_{k0}(\tau) L_0(t) + \beta_{k1}(\tau) L_1(t) + \dots + \beta_{kk}(\tau) L_k(t)$. Выражения для β_{ik} определяются разложением на слагаемые изображений по Лапласу полиномов Лаггера: $\{L_k(\tau)\} \rightarrow \frac{1}{\tau} L_k(\frac{p}{\tau}) = \frac{(p-\tau)^k}{p^{k+1}}$; $\{L_k(t)\} \rightarrow L_k(p) = \frac{(p-1)^k}{p^{k-1}}$, откуда следует $L_0(\tau) = \beta_{00}(\tau) L_0(t)$; $\beta_{00} = 1$; $L_1(\tau) = \beta_{10}(\tau) L_0(t) + \beta_{11}(\tau) L_1(t)$; $\beta_{10} = 1 - \tau$; $\beta_{11} = \tau$; $L_2(\tau) = \beta_{20}(\tau) L_0(t) + \beta_{21}(\tau) L_1(t) + \beta_{22}(\tau) L_2(t)$; $\beta_{20} = (1-\tau)^2$; $\beta_{21} = 2\tau(1-\tau)$; $\beta_{22} = \tau^2$ и т. д.

В соответствии с системой уравнений (30) при заданном n и известных выражениях $\frac{dL_k}{d\tau} = \frac{d\beta_{kj}(\tau)}{d\tau} L_0(t) + \frac{d\beta_{k1}(\tau)}{d\tau} + \dots + \beta_{kk}(\tau) L_k(\tau) / \frac{d\beta_{kj}(\tau)}{d\tau}$ - производная $\beta_{kk}(\tau)$ по τ , откуда имеем из первых $n+1$ уравнений зависимость коэффициентов $c_i(\tau)$ от коэффициентов $c_k = \int_0^{\infty} y(t) L_k(t) \exp(-t) dt$ и функций $\beta_{ik}(\tau)$, а из $(n+2)$ -го уравнения после подстановки в него определяем по измеренным c_k оптимальное значение τ . В этом случае для определения τ вместо $(n+2)$ -го уравнения вида $\int_0^{\infty} |y(t)| dt - \int_0^{\infty} \left| \sum_{i=0}^n c_i(\tau) \varphi_i(\tau) \right| dt = 0$.

14). Расчёт коэффициентов аппроксимации, обеспечивающего минимум взвешенного СКО при изменении функции веса ($\gamma(t) = \exp(-\alpha t)$) следует производить с учётом зависимости $c_i = f(\alpha)$.

Для рассматриваемого случая

$$\int_0^{\infty} \left[y(t) - \sum_{i=0}^n c_i L_i(t) \right]^2 \exp(-\alpha t) dt = \min;$$

$$\int_0^{\infty} y(t) L_i(t) \exp(-\alpha t) dt = \int_0^{\infty} \left[\sum_{i=0}^n c_j L_j(t) \right] \exp(-\alpha) L_i(t) dt.$$

При $\alpha = 1/\tau$ и замене переменных имеем: $\int_0^{\infty} y(t) L_i(t) \exp(-\alpha t) dt = c_i(\alpha) + \tau \int_0^{\infty} \sum_{j=0}^n c_j L_j(\tau t) L_i(\tau t) \exp(-t) dt$. При учёте вышеприведенного соотношения $L_k(\tau) = \beta_{k0}(\tau) L_0(t) + \beta_{k1}(\tau) L_1(t) + \dots + \beta_{kk}(\tau) L_k(t)$ и условиях ортогональности и ортонормирования интеграла $\int_0^{\infty} L_i(t) L_j(t) \exp(-t) dt = \begin{cases} 1 & \text{при } j=i, \\ 0 & \text{при } j \neq i, \end{cases}$ получаем аналитическую зависимость коэффициентов c_k от измеренных значений коэффициентов $c_i(\alpha)$.

2. Схемотехническая реализация алгоритмов оценки работоспособности электротехнических комплексов электросталеплавления

Анализ динамических показателей качества функционирования систем автоматического регулирования координат электродных комплексов на основе электронно-контакторных элементов показывает, что реализация управления в ходе плавки по статическим критериям в реальном масштабе времени сдерживалась из-за ограниченных возможностей по быстродействию и объёмам измерений параметров.

Переход к созданию САУ на основе промышленных ЭВМ открывает широкие перспективы для дальнейшего развития и внедрения в практику управления многокомпонентных вероятностных (детерминированных и стохастических) законов и критериев при оперативном (дифференциальном) и в течении принятого времени (интегрального) контроля системных технологических показателей, что в значительной степени повышает эффективность использования электродных агрегатов и делает более оправданным использование самих ЭВМ в энергоёмких производствах с точки зрения предоставленных ею возможностей контроля и управления значительно большим числом параметров и, следовательно, более алгоритмически качественной оптимизации и адаптации управления на различных уровнях иерархии АСУТП и АСУП.

В таких алгоритмах уделяется особое внимание тем вопросам, без решения которых самоуправление по вероятностным критериям и характеристикам является, как правило, малоэффективным, а в некоторых случаях и ошибочным. Это вопросы определения законов распределения, используемых при формировании статистических показателей управления, случайных колебаний тока, напряжения, температур и др., а также вопросы проверки стационарности и эргодичности процесса на информативных участках выборок.

В этом случае на современном этапе развития теории и практики автоматизации процессов, машин и технологических комплексов горно-металлургического комплексов назначения базовыми являются два основных направления построения систем на основе теоретических предпосылок вероятностного вида линейных систем управления.

1). Использование обобщённых статистических (дифференциальных и интегральных) критериев по

ряду информационных показателей процесса плавки объясняется простыми соображениями: изменение любого из параметров (группы параметров) вызывает изменение всех других (по крайней мере большинства) электрических и технологических параметров печи. В общем случае, многосвязная (параметрически и векторно) и вероятностная природа поведения дуговой ЭТУ (в особенности ДСП) требует соответственно и связно-стохастического управления, реализация которого возможна только на основе управляющей ЭВМ.

При управлении работой ДСП важным является определение времени перехода на очередной интервал (этап) плавки: расплавление и «размыв» колодцев, карбонизации, поворот ванны, карбюризация, подвалка, переход к обезгаживанию, окислению, рафинированию, раскислению и пр.

2). Наиболее простыми в рассматриваемом случае комплексным критерием распознавания момента перехода является сумма дисперсий колебаний токов всех фаз ДСП. Физически это объяснимо просто: при выполнении функций очередного этапа, например, образования «болота» и «озера» жидкого металла под всеми тремя фазами, отсутствие непроплавленных кусков шихты или легирующих добавок, возникновение температурной, электромагнитной, химической и др. неоднородностей сопровождается минимизацией количественных характеристик как дисперсии тока одной фазы печи D_{I_i} , так и суммарной дисперсии:

$$D_{I_A} + D_{I_B} + D_{I_C} = \sum D_{I_{i \rightarrow \min}} \quad (32)$$

Количественные показатели изменения значения дисперсии колебаний фазных токов показали, что на мощных печах (ДСП) их снижение от начала расплавления твёрдой «завалки» до образования «озера» жидкого металла составляет от 200 до 15%, т. е. более чем в 10 раз.

Нами на основании положений [4, 5-7] разработана и реализована в заводских условиях система управления режимом плавления в ДСП-50, функциональная схема которой приведена на рис. 2.

В соответствии с рис. 2, алгоритм управления ДСП по сумме дисперсии её фаз следующий: в печь в начале расплавления вводится 70-80% энергии, необходимой для расплавления фиксированного количества «завалки» (путём взвешивания). Затем управление по принципу дозирования прерывается и проводятся замеры дисперсии токов фаз либо по программе ЭВМ по формуле

$$D_{I_i} = \frac{1}{T} \int_0^T [I_i(t) - \bar{I}_i]^2 dt, \quad (33)$$

[где i – номер фазы (1, 2, 3 или А, В, С)], либо с помощью дисперсиометра, содержащего устройство центрирования (совокупность фильтра среднего тока – математического ожидания - $\bar{I}_i(t)$ и операционного усилителя $I_i(t) - \bar{I}_i(t)$, функционального блока возведения в квадрат (квадратора) центрированного слу-

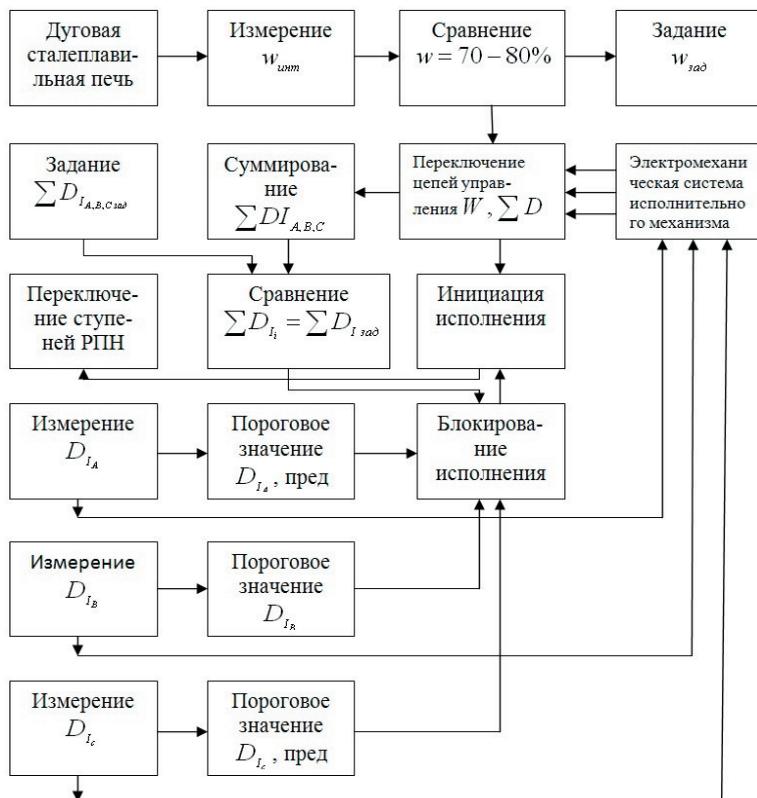


Рис. 2. Алгоритмическая структура управления режимом электропотребления по минимуму дисперсии

чайного процесса (инвертор) и устройства усреднения (интегратор) за выбираемые отрезки времени. Затем дисперсии токов фаз по соотношению (2.1) суммируются и при снижении величины $\sum D_{I_i} \leq (0,15 - 0,20) I_n$ производится переключением РПН печного трансформатора на следующий интервал (этап) плавки, после чего управление по сумме дисперсий прерывается и вновь управление производится дозированием (на основе системы-дозатора СТУ-004 (7004) при ведении очередного этапа плавки с циклическими повторами описанного алгоритма.

Для исключения ошибочного управления в случае «дикой фазы» ($D_{I_1} = D_{I_2} = 0$, а $\sum D_{I_i} = D_{I_3}$) вводится дополнительная операция сравнения измеренных дисперсий токов фаз со значением, например, $(0,06 - 0,08) I_{ном}$ и в случае превышения этого значения при помощи пороговых уставок проводится блокирование управления по сумме дисперсий, несколько увеличивая контролируемый период плавки до того времени, пока дисперсия тока фазы, недовыполнившей свои функции, не снизится до директивного уровня.

3). Рассмотренный алгоритм управления является практически однопараметрическим и не учитывает ряд других факторов, определяющих качество технологических процессов. Для учёта ряда других факторов и характеристик определённого этапа плавки нами [6] был разработан и реализован на печах ДСП-50 и ДСВ-60 связно-стохастический критерий, формируемый по ряду дисперсии разнохарактерных показателей к ряду дисперсии разнохарактерных показателей электропечного процесса: комплексный критерий определяется как сумма предыдущего значения отклонения и комплексного сигнала коррекции измеренных

и прогнозируемых отклонений фазного тока, активной мощности, температуры газов под сводом, скорости схода шихты (образования «колодцев») от заданных, т. е., если при управлении только по дисперсиям токов фаз реализуется достаточно простой алгоритмически и в реализации закон (по обобщённому статистическому критерию), то при использовании связно-стохастического критерия реализуется адаптивно-экстремальный вид уравнения, физический смысл которого заключается в том, что главным моментом оптимального электрода является поддержание оптимального температурного градиента подэлектродной зоны ванны печи (центр-конец электрода).

На рис. 3 показана функциональная схема алгоритма формирования обобщённого статистического критерия управления положением конца электрода (мощности, длины дуги) печи по закону Герды Айрон. Комплексный сигнал коррекции представляет собой сумму корректирующих сигналов по каждому информативному параметру, преобразованному на соответствующий коэффициент. Формирование сигнала коррекции по фазному току включает в себя:

а) определение рассогласования измеренного значения $I_{ф}$ с заданным (директивным) номинальным значением (функция 7, рис. 3).

$$\Delta I_{ф.ном} = I_{ф} - I_{ф.зад}; \tag{34}$$

б) формирование электрического сигнала рассогласования отклонения $\Delta I_{ф}$ от прогнозируемого $\Delta I_{ф.пр}$ (14-я операция)

$$\Delta I_{ф.рас} = \Delta I_{ф.ном} - \Delta I_{ф.пр}; \tag{35}$$

в) формирование корректирующего сигнала по каналу измерения фазного тока (операция 20)

$$\Delta I_{ф.кор} = \Delta I_{ф.рас} k_i, \tag{36}$$

где электрический сигнал, пропорциональный величине k_i , формируется в виде (51-я операция):

$$k_i = \frac{G_{\Delta I}^2}{G_{\Delta I_{ф.ном}}^2 + G_{\Delta I}^2 N}, \tag{37}$$

где $G_{\Delta I_{ф.ном}}^2$ - дисперсия электрического сигнала, формируемого пропорционально измеренному отклонению фазного тока (операция 50); $G_{\Delta I}^2$ - дисперсия электрического сигнала, пропорциональная входному сигналу на регулятор перемещения электродов (длины дуги) (41-я операция); N - номер такта (дискретности времени), определяемый из соображений устойчивости вычислений.

Значения дисперсий $G_{\Delta I_{ф.ном}}^2$ и $G_{\Delta I}^2$ измеряются алгоритмически или приборно (отмечено выше). Коэффициенты по другим каналам формируются аналогично.

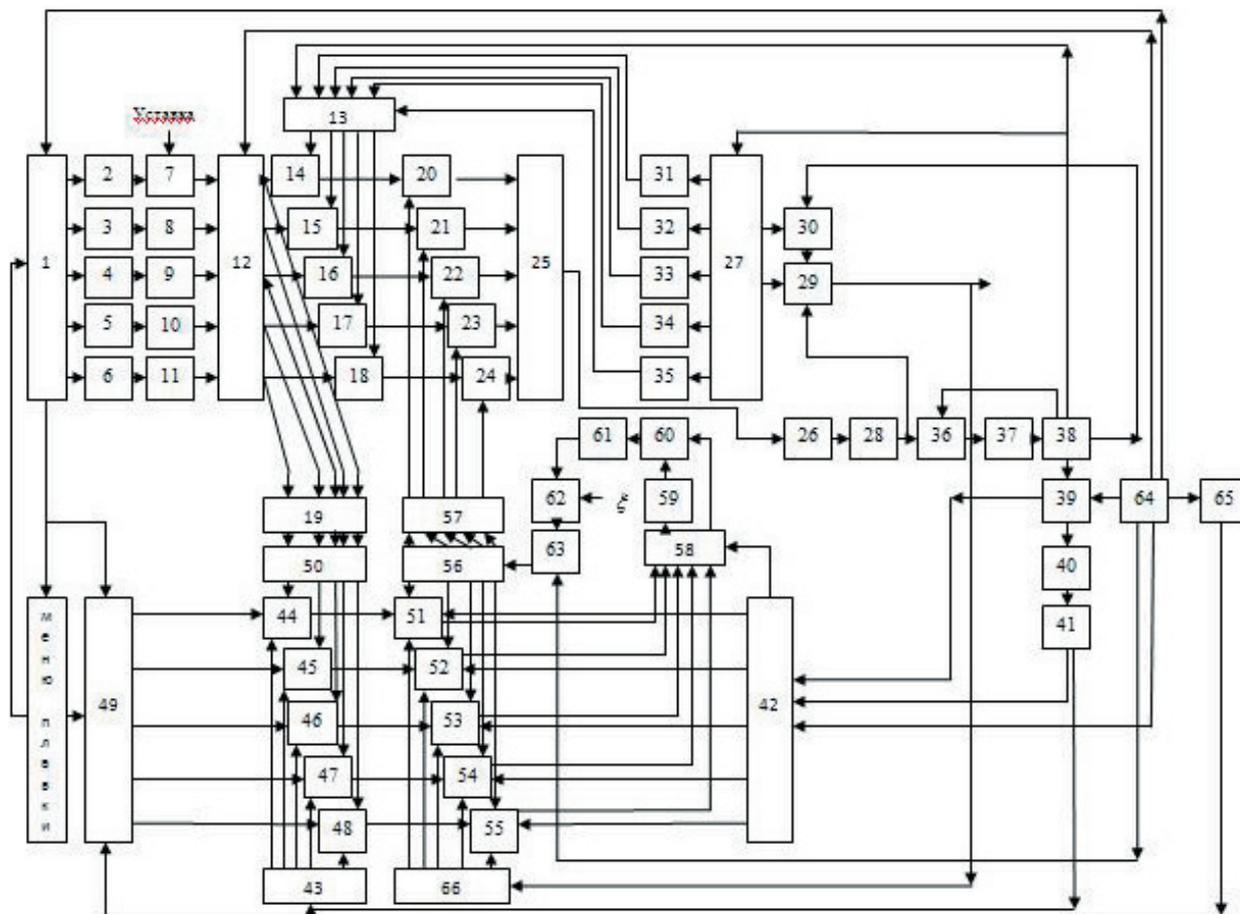


Рис. 3. Система формирования связно-стохастического комбинированного сигнала коррекции АСУЭР дуговой печи ДСП-50

4) Сигналы коррекции по каждому информационному показателю тока I , активной мощности P , скорости проплавления шихты (колодцев) V_m , среднего давления под сводом p , средней температуры под сводом печи τ , полученные путём умножения ошибок экспоненциального прогнозирования.

$$\begin{aligned}\Delta I_{\text{ф. рас}} &= \Delta I_{\text{ф. ном}} - \Delta I_{\text{ф. пр}}; \Delta P_{\text{рас}} = \Delta P_{\text{ном}} - \Delta P_{\text{пр}}; \\ \Delta V_{\text{ш}} &= \Delta V_{\text{ш. ном}} - \Delta V_{\text{ш. пр}}; \Delta P = \Delta P_{\text{ном}} - \Delta P_{\text{пр}}; \\ \Delta \tau &= \Delta \tau_{\text{ном}} - \Delta \tau_{\text{пр}}\end{aligned}\quad (38)$$

на формирование по всем (указанным) пяти каналам коэффициентов

$$\begin{aligned}k_I &= \frac{G_{\Delta I}^2}{G_{\Delta I_{\text{ф. ном}}}^2 + G_{\Delta I}^2 + N}; k_P = \frac{G_{\Delta I}^2}{G_{\Delta P_{\text{ном}}}^2 + G_{\Delta I}^2 + N}; \\ k_{V_m} &= \frac{G_{\Delta I}^2}{\Delta V_{\text{ш. ном}} + G_{\Delta I}^2 + N}; k_{\tau} = \frac{G_{\Delta I}^2}{G_{\Delta \tau_{\text{ном}}}^2 + G_{\Delta I}^2 + N},\end{aligned}\quad (39)$$

суммируются и суммарный (результатирующий сигнал используется для управления длиной дуги (перемещением электрода).

В соответствии с вышеизложенными положениями АСУЭР ДСП-50 работает следующим образом. Электрические сигналы от печи 1, получаемые от датчиков 1-6 (рис. 3), пропорциональные фазному току I , активной мощности P , средней скорости V_m , среднему давлению под сводом, средней температуры под сводом печи τ поступают на блоки 7-11, где сравниваются с заданными электрическими сигналами. Полученные с блоков сравнения 7-11 электрические сигналы рассогласований поступают на схему сравнения 12 (компаратор). При появлении разрешающего импульса с генератора 64 схемы совпадения 12 и 13 срабатывают, обеспечивая тем самым синхронную работу корректирующих звеньев. Электрические сигналы с блоков 14-18 вычитания, рассогласований, измеренных и прогнозируемых, поступают на блоки умножения 20-24, где формируются сигналы коррекции по каждому каналу путём умножения ошибок экспоненциального прогнозирования (38) на электрические сигналы, пропорциональные специальным сформированным коэффициентам, поступающим с запоминающего устройства 57.

Общий сигнал коррекции формируется как сумма корректирующих сигналов по каждому измеряемому параметру с помощью сумматора 25. Результатирующий сигнал поступает на второй сумматор 26, где происходит сложение сигнала коррекции с прогнозируемыми на один временной тактовой импульс электрическим сигналом, пропорциональным отклонению положения зоны подэлектродного номинального значения, поступающего с распределительного устройства 27. Далее сформированный электрический сигнал с выхода коммутатора 26 через блок 28 задержки на один тактовый временной импульс поступает на третий сумматор 36. Электрический сигнал с третьего сумматора 36 через функциональный преобразователь 37 поступает на исполнительный блок 38 регулятора длины дуги печи 1. В этом блоке отрабатывается корректирующее воздействие, в результате чего электрод перемещается в сторону устранения ком-

плексного рассогласования показателя суммарного сигнала отключения измеренных параметров и экспоненциально-прогнозируемого отклонения. Электрический сигнал с блока 28 поступает на шестой блок умножения 29, где перемножается с электрическим сигналом, пропорциональным экспоненциально-прогнозируемому сигналу коррекции, поступающему в запоминающее устройство 30 из подсистемы экспоненциального прогнозирования, которая формирует его в соответствии с переходной характеристикой печи. Результатирующий электрический сигнал с блока умножения 29, пропорциональный прогнозируемому на один временной такт Δt отклонению, через распределительное устройство 27 для обеспечения сравнения на блоках 14-18 электрических сигналов одной физической природы поступает на входы усилителей 31-35, коэффициенты передачи (усиления) которых выбираются равным коэффициентам передачи датчиков 2-6. Таким образом, происходит разделение общего электрического сигнала прогнозирования на составляющие.

Одновременно с подачей через схему совпадения 13 электрических сигналов на блоки 14-18 срабатывают фильтры низкой частоты блоков 19 и 40 дисперсиометры 41-50. Эти устройства выделяют высокочастотные помехи электрических сигналов на выходе объекта управления (печи) 1 через блоки 2-6, 7-11, 12 и входе через блоки 38, 39 АСУЭР пещью, а также измеряют с помощью блоков 41-50 их дисперсии. На сумматорах 44-48 электрические сигналы, пропорциональные дисперсиям по измеряемым входным сигналам с блока 41 и распределительного устройства 43, суммируются с дисперсией выходного сигнала от второго дисперсиометра 50 и с номером тактового импульса, поступающего через четвёртое распределительное устройство 49 со счётчика 65 временных тактовых импульсов, вырабатываемых генератором 64. Интервалы временных тактовых импульсов (Δt - период работы) генератора 64 устанавливается такими, на которых печь 1 находится в стационарном состоянии.

Электрические сигналы, пропорциональные значениям коэффициентов, определяющих долю ошибки прогнозируемых сигналов по каждому информационному каналу, формируются в делителях 51-55 как отношение дисперсии входного электрического сигнала от второго распределительного устройства 42 к общим дисперсиям по каждому информационному каналу с сумматоров 44-48. Блок 66 предназначен для изменения составляющих ошибки (для учёта ошибок по скорости и ускорению нарастания сигнала) делителей 51-55. Электрические сигналы с выходов делителей 51-55 поступают на четвёртую схему совпадения и по приходу разрешающего сигнала с пятой схемы совпадения 63 через запоминающее устройство 57 на блоки умножения 20-24. Введение от счётчика 65 импульсов через распределительное устройство 49 и сумматоры 44-48 электрических сигналов, пропорциональных номеру тактовых импульсов, на которых производятся операции деления в блоках 51-56, обеспечивает постоянное уменьшение сигнала коррекции, т. к. в противном случае процесс измерения и коррекции будет расходящимся и сигнал коррекции будет недопустимо высок. Сумматор

58 осуществляет сложение в делителях 51-58 всех сформированных электрических сигналов, пропорциональных коэффициентам, определяющим долю ошибки, прогнозируемых сигналов по каждому информационному каналу, а сравнение этого суммарного электрического сигнала с предыдущим своим значением, получаемым с помощью второго блока задержки 59, осуществляется в шестой схеме сравнения 60. Если разность этих сравниваемых электрических сигналов по своему модулю, полученному в блоке 61, становится меньше некоторого значения ξ , характеризующую зону нечувствительности, т. е. происходит стабилизация значений коэффициентов, то пороговый блок 62 отключает четвертую схему совпадения 56. Тем самым, в запоминающем устройстве 57 фиксируются последние значение коэффициентов, полученные с предыдущего шага операций по их формированию через блоки 40, 41, 42, 50, 65, 43, 49, 44-48 в делителях 51-51.

Таким образом, основная идея алгоритма коррекции включает не только создание комбинированного сигнала по группе стохастических показателей, но и реализация предвращения (дифференциальной составляющей заслона) при регулировании направления рассогласования, чтобы коррекция учитывала динамику предыдущего течения процесса. Последнее может достигаться на основе регрессионного анализа, по количественной характеристике коэффициента линейной регрессии.

3. Основные результаты опытно-экспериментальных исследований качества работоспособности в условиях Электрометаллургического завода «Днепроспецсталь» (г. Запорожье)

Системотехническая адаптация моделей (21-31) к условиям печи ДСП-50 завода «Днепроспецсталь», оборудованной АСУЭР на основе МПК S7-315 и регулятором мощности (длины дуги) РММ-9522 с электромеханической системой на базе преобразователя ЭПУ2-2-3807-4327 УХЛ4 и «рейки-шестерни» проводилась применительно к алгоритмам (рис. 2 и 3) (минимума дисперсии и связно-стохастическому), разрешаемым решением нелинейных дифференциальных уравнений вида $F(\frac{dx}{dt}, x, t) = 0$ (x_1 – напряжение ступени РПН печного трансформатора 32 МВ·А, x_2 – ток «короткой сети»). Численное интегрирование систем $\frac{dx}{dt} = F(\frac{dx}{dt}, x, t)$ проводилось на основе метода «запаздывания», при этом использовалось разрешение относительно производной по методу Рунге-Кутта, где при вычислении функции $F(\frac{dx}{dt}, x, t)$ на j -ом шаге интегрирования вместо производной $\frac{dx}{dt}$ в момент t принимается её значение на шаге $(j-1)$, при этом ограничивается использованием разложения $F(x, t)$ в ряд Тейлора линейным членом: $\Delta F = F(q_c, x, t) + \frac{\partial F(q_c, x, t)}{\partial q} \Delta q$; $q_c = \frac{dx}{dt}$; $t_c \leq t$; $\Delta q = q - q_c$. По условию $\Delta F = 0$, поэтому $F(q_c, x, t) + \frac{\partial F(q_c, x, t)}{\partial q} \Delta q = 0$, откуда имеем: $\frac{dx}{dt} = F(q_c, x, t) / \frac{\partial F(q_c, x, t)}{\partial q}$. Решение относительно Δq даёт:

$$\Delta q_{1,2} = \frac{-\frac{\partial F}{\partial q} \pm \sqrt{(\frac{\partial F}{\partial q})^2 - 2 \frac{\partial^2 F}{\partial q^2} F}}{\frac{\partial F}{\partial q} (1 + \sqrt{1 - 2 \left[\frac{\partial^2 F}{\partial q^2} / (\frac{\partial F}{\partial q})^2 \right] F})} / \frac{\partial^2 F}{\partial q^2}$$

В рассматриваемом случае $\frac{dx}{dt}$ непрерывная функция, поэтому $\Delta q \rightarrow$ при $t \rightarrow t_c$ и окончательное решение имеет вид:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dx}{dt} \Big|_{t=t_c} + \frac{\frac{\partial F}{\partial q} (1 - \text{sign} \frac{\partial F}{\partial q} \sqrt{1 - 2 \left[\frac{\partial^2 F}{\partial q^2} / (\frac{dF}{dq})^2 \right] F})}{\partial^2 F / \partial q^2} \quad (40)$$

Функции, полученные при решении (40), далее исследовались по алгоритмам (27)-(32) применительно к основным статистическим характеристикам плавления штампованной стали (табл. 1).

Номинальные значения параметров табл. 1 приняты по ГОСТ 13109-97 и ГОСТ 23875-79. Количественные характеристики качества потребляемой электроэнергии дисперсионного анализа динамического функционирования АСУЭР показаны в табл. 2, где верхние пределы вариации характеристик имеют значения при регулировании по закону Герды Айрон, верхние – при коррекции координат регулятора РММ-9522 (на печи ДСП-50) и РМГ-7222 (печь ДСВ-60) по связно-стохастическому критерию, учитывающему вариации параметров тока, активной мощности, скорости проплавления колодцев, среднего давления газов под сводом, средней температуры под сводом печи.

Коэффициенты коррекции по указанным технологическим параметрам вычислялись по соотношениям (39).

Параметры моделей (1) - (31) и на их основе качественные характеристики динамического функционирования АСУЭР дугового сталеплавильного комплекса на базе гидромеханического регулятора мощности в комплексе с микроконтроллером ПИД – типа наиболее рационально с вычислительной точки зрения выполнять на основе гидродинамических критериев в форме чисел: Бонда $Bo = \Delta p g d^2 / G$; эктакции $E_c = (c_{нач} - C)(c_{нач} - C^*)$; Фруда $Fr = w^2 / g l$; Фурье (тепловое) $F\delta_t = 0_t t / l^2$; Фурье (массы) $F\delta_m = D\tau_c / l^2$; Галилея $G_a = g r^2 l^3 / \eta^2$; Грасгофа (тепловое) $G_{r_t} = g l^3 b_t (t^* - t) \rho^2 / \eta^2$; Грасгофа массы $G_{r_m} = g l^3 \Delta p \rho / \eta^2$; Капицы $K_a = g \eta^4 / \rho_{ж} G^3$; Казанцева $K = \rho w^2 / \rho_{ж} g d$; Кутателадзе $K_u = \rho^{0.5} w / (\rho_{ж} g G)^{0.25}$; Лапласа $L_p = \rho_{ж} l G / \eta^2$; Нуссельта $Nu = atk$; Пекле тепловое $Pe_t = W l / a_t$; Пекле диффузионное $Pe_d = w l / Di$; Рейнольдса $Re = w \rho / \eta$; Шмидта $S_c = v / Di$; Шервуда $sh = \beta l / Di$; Струхалия $St = \omega l / w$; Стантона тепловое $St_t = \alpha / c_i w l$; Стантона массы $St_D = \beta / w$; гомотронности $\bar{T} = \tau w / l$; Тэйлора $Ta = \rho w^2 \eta^2 / \rho_{ж} G^2$; Вебера $We = \rho w^2 l / G$; В данных числах принято: c_i - удельная теплоёмкость; l - параметр взаимодействия; G - массовый расход; h - высота; g - расход; w - скорость; P - давление; d, D - диаметр; ρ - плотность; G - поверхностное натяжение.

Таблица 1

Основные статистические характеристики технологического процесса печи ДСВ-50 по периодам плавки

Период плавки	P_1 , мВт	$\cos\phi$, о. е.	$\frac{k_{НСУ}}{k_{НСГ}}$, о. е.	$\frac{I_{эл}}{I_{2ном}}$, о. е.	ΔU , % U_n	ΔU , СКО, %
Пуск на 1-ю ступень, 1-е проплавление колодцев	19,63-15,27	0,73-0,75	$\frac{4,55}{2,97}$	$\frac{2,82}{0,74}$	$\frac{28,72}{13,25}$	$\frac{6,22}{4,03}$
			Подъём электродов	0,83	--	--
2-е проплавление колодцев	15,21-19,08	0,69-0,63	$\frac{13,67}{5,78}$	$\frac{2,52}{0,66}$	$\frac{16,79}{11,74}$	$\frac{7,08}{3,64}$
			Размывание колодцев	0,78	-	-
3-е проплавление колодцев	15,96	0,75	$\frac{11,26}{5,23}$	$\frac{2,77}{0,83}$	$\frac{17,28}{8,26}$	$\frac{8,01}{2,56}$
			Перепуск электродов			
Плавление с овалами шихты	14,03-17,68	0,67-0,71	$\frac{14,24}{6,29}$	$\frac{3,02}{1,72}$	$\frac{18,13}{7,48}$	$\frac{6,73}{3,26}$
			Подвалка шихты			
Плавление	16,17-17,46	0,76-0,69	$\frac{7,66}{3,44}$	$\frac{2,69}{1,91}$	$\frac{9,14}{5,36}$	$\frac{8,22}{4,82}$
			Осмотр печи, плавление	12,64-13,65	0,79-0,73	$\frac{8,07}{4,22}$
Размывание колодцев, плавление	12,43-21,73	0,73	$\frac{6,11}{4,06}$	$\frac{1,92}{0,96}$	$\frac{6,53}{3,24}$	$\frac{5,71}{3,04}$
			Взятие 1-ой пробы	1,09	-	-
Начало окисления	18,33-13,36	0,68-0,74	$\frac{6,02}{3,06}$	$\frac{2,09}{1,06}$	$\frac{5,22}{3,14}$	$\frac{2,27}{0,46}$
			Подача извести	0,77	-	-
Окисление	17,96-11,42	0,71	$\frac{8,96}{5,32}$	$\frac{1,12}{0,32}$	$\frac{14,96}{4,27}$	$\frac{6,96}{0,39}$
			Переключение на 3-ю ступень	0,63	-	-
Окисление	15-6,38	0,74	$\frac{12,74}{4,83}$	1,63	6,03	$\frac{2,96}{0,82}$
			Скачивание шлака, переключение на 5-ую ступень	0,73-0,24	-	-
Начало рафинирования	6,42-7,22	0,78	$\frac{3,27}{2,93}$	1,81	6,03	$\frac{3,06}{0,613}$
			Переключение на 14-ю ступень	0,47	-	-
Рафинирование	9,21-4,28	0,77	$\frac{4,81}{2,98}$	1,43	5,96	$\frac{3,11}{0,86}$
			Рафинирование, ввод присадок	6,43	0,81	$\frac{8,26}{4,11}$
Рафинирование, переключение на 12-ю ступень, взятие 2-й пробы металла	7,32-3,04	0,72	$\frac{8,96}{4,63}$	1,92	8,06	$\frac{3,27}{0,47}$
			Выпуск металла			

Таблица 2

Показатели качества электроэнергии на основе дисперсионного анализа АСУЭР ДСП-50

Показатель	Аналитическое выражение	Численные значения		Дисперсия
		min	max	
Отклонение напряжения, %	$\delta U = (u - u_n) \cdot 100 / U_n$	0,5	10,7-13,4	12,7-23,2
Отклонение частоты	$\Delta f = (f - f_n) \cdot 100 / f_n$	0,02	0,98-0,75	1,24-0,97
Размах изменения напряжения, %	$\delta U_i = (U_i - U_{i+1}) \cdot 100 / \sqrt{2} U_n$	0,2	4,32-2,08	7,28-6,09
Доза колебаний напряжения	$\psi = (1,0) \int_{t-\theta}^t g_f^2 U_f^2 dt$	0,01	1,14-0,73	2,08-5,09
Коэффициент несинусоидальности кривой напряжения, %	$k_{hcu} = \sqrt{\sum_{n=2}^N U_n^2} \cdot 100 / U_n$	0,5	14,73-8,06	3,92-13,04
Коэффициент неси-нусоидальности тока, %	$k_{hci} = \sqrt{\sum_{n=2}^N I_n^2} \cdot 100 / I_n$	0,5	11,74-9,26	4,28-16,92
Коэффициент гармонической составляющей напряжения, %	$k_{nn} = 100 U_n / U_{ном}$	0,2	7,83-5,92	11,84-17,63
Коэффициент обратной последовательности, %	$k_{2и} = 100 U_{2(1)} / U_{ном}$	0,2	3,05-0,62	8,58-5,09
Коэффициент нулевой последовательности, %	$k_{0и} = 100 U_{0(1)} / U_{ном,ф}$	0,2	4,17-1,12	3,12-5,41
Коэффициент амплитудной модуляции	$k_{мод} = U_{нв,а} - U_{ма} / 2\sqrt{2} U_n$	0,5	0,79-1,36	8,23-4,17

Заклучение

Разработанные алгоритмы регулирования координат электропечного трансформаторного агрегата с локальной АСУЭР на РММ-9522 (РМГ-7222) значительно снижает несимметрию, несинусоидальность и колебания напряжения и тока «короткой сети» печей ДСП-50 (ДСВ-60), что исключает факторы снижения качества электроэнергии и обеспечивают ресурсо- и энергосбережение и повышение на их основе энергоэкономических показателей динамического функционирования АСУТП цехового уровня и АСУТП – заводского.

Литература

- 1 Энергосбережения в рыночных условиях: Материалы семинара, Київ, 30 березня – 1 квітня 2004. – Київ: Український центр перепідготовки та навчання, 2004. – 223 с.
- 2 Комплексна програма енергосбереження Запорізької області. – Запоріжжя: Обласна науково-технічна рада з енергосбереження, 1997. – 162 с.
- 3 Более 50 лет деятельности в области информационных технологий. – Харьков: АОЗТ «Тяжпромавтоинатика», 2004. – 96 с.
- 4 Всё необходимое для автоматизации: Решения на базе персональных компьютеров: ADVANTECH: Русское издание, 2001. – 356 с.
- 5 Лозинський О. Ю. Системи керування режимом дугових сталеплавильних печей на основі ймовірнісних моделей процесів. – Дис. ... докт. техн. наук. – Львів: НУ «Львівська політехніка», 1996. – 367 с.
- 6 Труфанов И. Д. Системы оптимизации режимов работы мощных дуговых сталеплавильных печей на основе интегрального критерия энергосбережения. - Дисс. ... докт. техн. наук. – Запорожье. – Запорожский национальный технический университет, 2001. – 530 с.
- 7 Паранчук Я. С. Багатокритеріальна оптимізація режимів електропечного комплексу «дугова сталеплавильна піч – електропостачальна мережа». – Дис. ... докт. техн. наук. – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2006. – 375 с.
- 8 Марущак Я. Ю. Синтез електромеханічних систем на основі узагальненого характеристичного полінома. – Дис. ... докт. техн. наук. – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2002. – 353 с.
- 9 Гудим В. І. Методи та засоби керування режимами систем електропостачання потужних дугових сталеплавильних печей. – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2002. – 341 с.
- 10 Заика В. Т. Методы повышения эффективного электрообеспечения и энергоиспользования подземных горных машин и установок угольных шахт. – Дисс. ... докт. техн. наук. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2001. – 350 с.
- 11 Гуль А. И. Параметрическая оптимизация многокритериальных интегрирующих электромеханических систем по критерию максимальной добротности и запаса стойкости. – Дисс. ... докт. техн. наук. – Харьков: НТУ «Харьковский политехнический институт», 2004. – 485 с.
- 12 Бойко Н. И. Научные основы создания электротехнологических установок для высоковольтных импульсных воздействий. – Дисс. ... докт. техн. наук. – Харьков: НТУ «Харьковский политехнический институт», 2003. – 567 с.
- 13 Нильсон Э., Алберг Дж., Уолш Дж. Теория сплайнов и её приложения / Пер. с англ. – М. Мир, 1972. – 316 с.