Лютый А.П., ***Украина***
Труфанов И.Д., Чумаков К.И., Савельев В.Г ***Запорожье***

Электрометаллургический завод "Днепроспецсталь"
Запорожский национальный технический университет

НАУЧНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СИНТЕЗА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ ДУГОВЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Введение. Основные направления энергетической политики рыночной экономики Украины определяются Государственной программой энергосбережения. При организации работ по ресурсосбережению ставится и выполняется целевая установка – обеспечение решения задач рационального использования энергоресурсов в необходимые сроки на основе передовых методов управления и приведения с их помощью в действие всех факторов ресурсосбережения. Для этих целей необходимо использовать принципиальные экономические и руководящие решения, предопределяющие: дальнейшее расширение прав и ответственности основного производственного звена за рациональное использование материальных ресурсов, совершенствование системы государственных руководящих материалов, введение сертификации предприятий для выбора оптимального варианта размещения и развития энергоемких производств с учетом требования ресурсозбережения и др. Данные факторы особенно актуальны для высокоэнергоемкого горно-металлургического комплекса Украины. Такие мероприятия в Запорожье проводятся в соответствии с "Комплексною програмою енергосбереження Запорізької області", затвердженої рішенням сесії обласної Ради народних депутатів від 30.06.95 №1 та распорядженням голови обласної державної адміністрації від 19.02.97 №82. Данной программой определены основные принципы управления и организации ресурсосбережения до 2010г. В настоящее время проводятся мероприятия второго этапа выполнения указанной программы.

Анализ научного состояния и постановка задач реализации энергоэффективных мероприятий по управлению оптимальными режимами энергопотребления. Ведущая роль в ресурсосбережении принадлежит научным коллективам и научно-техническим работникам предприятий. Основным источником энерго-экономической эффективности мероприятий по энерго- и ресурсосбережению являются мероприятия на локальном уровне. Рассматриваются основные проблемы синтеза энергосберегающего управления и структуры мощного электротехнического комплекса дуговых сталеплавильных печей емкостью 50-200т. Нами решаются задачи синтеза энергосберегающего оптимального управления двумя элекропечными трансформаторами ЭТЦН – 32000/35УЗ при их питании от цехового трансформатора ТДТН – 63000/150/35/6. На стороне 35кВ трансформатора ТДТН – 63000 установлена БСК 4,5 МВ·Ар. Задачей указанного синтеза является разработка структуры "короткой сети" с БСК трансформатора ЭТЦН – 32000 при его работе на ступенях 1 – 4 РПН при токе 28400А.

Основные результаты исследований и их обсуждение. С точки зрения теории оптимального управления энергоемкими технологическими процессами, машинами и установками рассматриваемый электротехнологический комплекс из двух электропечных агрегатов при их питании от цехового трансформатора представляет собой объект из параллельно соединенных звеньев, обладающих экстремальными характеристиками [1,2].

В данном случае применима методология оптимального управления на основе моделей оптимального эксперимента [3], которые разрабатываются на основе законов и задач математического моделирования стохастических систем, каковыми по нагрузке "коротких сетей" являются электропечные комплексы.

В соответствии с [4] объект управления описывается уравнением вида

$$d\vec{Q}_i / dt = f^i(\vec{Q}_i)\vec{U}_i - f_{ii}(\vec{Q}_i) \ , \tag{1}$$

где $\vec{Q}_i$ - i-й вектор энергопотока (электроэнергии, кислорода, окислителя, карбюризатора, раскислителя и т.д.); $\vec{U}_i$ - вектор управления. Управление для системы (1) вычисляется на основе принципа максимума. Гамильтониан для системы (1) имеет вид: $H(Q) = U\sum_{i=1}^{n} f^i(Q_i)\psi_i - \sum_{i=1}^{n} f_{ii}(Q_i)\psi_i$, при этом гамильтониан H(Q) достигает максимума при $U(t) = \mathrm{sgn}(\sum_{i=1}^{n} f^i(Q_i)\psi_i)\cdot 1$. Закон управления будет релейным, если выполняются условия общности положений оптимального управления, а количество интервалов управления определяется нулями суммы $\upsilon(t) = \sum_{i=1}^{n} f^i(Q_i(t))\psi_i(t)$. Необходимо определить функцию $\psi_i(t)$, для чего используется система:

$$\upsilon(t) = f^1(Q_i)\psi_{10} \exp\int_0^t F_1(Q_1, U)dt + f^2(Q_2)\psi_{20} \exp\int_0^t F_2(Q_2, U)dt + ... + f^n(Q_n)\psi_{20} \exp\int_0^t F_n(Q_n, U)dt \ . \tag{2}$$

В данном случае должен быть решен вопрос о нулях полученной функции $\upsilon(t)$. Вычисляются нули решения системы n-го порядка. Для вышеуказанного объекта система уравнений [2] имеет вид:

$$\frac{dQ_1}{dt} = b_1U - k_1\sqrt{Q_1}; \frac{dQ_2}{dt} = b_2U - k_2\sqrt{Q_2}.$$
(3)

На координаты управления наложены ограничения: $0 \le U \le 1; 0 \le Q_1 \le b_1^2/k_1^2; 0 \le Q_2 \le b_2^2/k_2^2$. Ставится задача попадания на множество стационарных состояний, имеющее уравнение

$$\sqrt{Q_1} = [b_1k_2 / b_2k_1]\sqrt{Q_2} \quad (4)$$

за минимальное время. Записываем систему (3) в векторно-матричной форме:

$$\frac{dQ}{dt} = [A(\vec{Q})] + [B(\vec{Q})]\vec{U}; [B(Q)] = [B] = [B_1] = [b_1b_2]^T; [A(Q)] = \begin{bmatrix} -k_1 & \sqrt{Q_1} \\ -k_2 & \sqrt{Q_2} \end{bmatrix}.$$

Определяется матрица $[D_2] = [[B_1],[B_2]]$, [4]:

$$[B_2] = -\frac{\partial[A(Q)]}{\partial Q}[B_1] = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \frac{k_1}{2\sqrt{Q_1}} & 0 \\ 0 & \frac{k_2}{2\sqrt{Q_2}} \end{bmatrix}; [D_2] = \begin{bmatrix} b_1 & \frac{b_1k_1}{2\sqrt{Q_1}} \\ b_2 & \frac{b_2k_2}{2\sqrt{Q_2}} \end{bmatrix}; \det[D_2] = \frac{b_1b_2}{2}\left(\frac{k_2}{\sqrt{Q_2}} - \frac{k_1}{\sqrt{Q_1}}\right).$$

Условия общности положений оптимального управления не выполняется на линии, уравнение которой при $\det[D_2] = 0$ принимает вид:

$$k_2\sqrt{Q_1} - k_1\sqrt{Q_2} = 0. \quad (5)$$

Для применения к системе (3) принципа максимума составляется гамильтониан $H(Q) = (b_1\psi_1 + b_2\psi_2)U - \psi_1k_1\sqrt{Q_1} - \psi_2k_2\sqrt{Q_2}$, где максимум H(Q) достигается при условии $U(t) = \begin{Bmatrix} 1 \text{при} (b_1\psi_1 + b_2\psi_2) > 0 \\ 0 \text{при} (b_1\psi_1 + b_2\psi_2) < 0 \end{Bmatrix}$, т.е. уравнение должно быть релейным. Число интервалов управления определяется числом нулей функции $\upsilon(t) = b_1\psi_1(t) + b_2\psi_2(t)$. Для расчета нулей функции $\upsilon(t)$ находятся решения для ψ_1 и ψ_2, для чего составляется вспомогательная система уравнений для ψ_i:

$$\frac{d\psi_1}{dt} = -\frac{\partial H(Q)}{\partial Q_1} = \frac{k_1}{2\sqrt{Q_1}}\psi_1; \frac{d\psi_2}{dt} = -\frac{\partial H(Q)}{\partial Q_2} = \frac{k_2}{2\sqrt{Q_2}}\psi_2.$$

Отсюда $\psi_1(t) = \psi_{10} \exp\int_0^t [k_1 / 2\sqrt{Q_1}]dt; \psi_2(t) = \psi_{20} \exp\int_0^t [k_2 / 2\sqrt{Q_2}]dt$. Далее составляется функция $\upsilon(t) = b_1\psi_{10} \exp\int_0^t [k_1 / 2\sqrt{Q_1}]dt + b_2\psi_{20} \exp\int_0^t [k_2 / 2\sqrt{Q_2}]dt$. При делении $\upsilon(t)$ на $\exp\int_0^t [k_2 / 2\sqrt{Q_2}]dt$ число нулей не изменяется, т.к. $\exp\int_0^t [k_2 / 2\sqrt{Q_2}]dt$ действительных нулей не имеет. Здесь необходимо составить вторую вспомогательную функцию $w(t) = b_1\psi_{10} \exp\int_0^t \left(k_1 / 2\sqrt{Q_1} - k_2 / 2\sqrt{Q_2}\right)dt + b_2\psi_{20}$, производная от которой $\frac{dw(t)}{dt} = b_1\psi_{10}\left(\frac{k_1}{2\sqrt{Q_1}} - \frac{k_2}{2\sqrt{Q_2}}\right)\exp\int_0^t\left(\frac{k_1}{2\sqrt{Q_1}} - \frac{k_2}{2\sqrt{Q_2}}\right)dt$. Функция $\frac{dw(t)}{dt}$ может иметь нули на линии $k_1\sqrt{Q_1} - k_2\sqrt{Q_2} = 0$, что совпадает с уравнением (5). Вне этой линии $dw(t)/dt$ нулей не имеет, тогда соотношение $N\{\upsilon(t)\} \le 1 + N\left\{\frac{dw(t)}{dt}\right\} = 1$. Следовательно, если траектории в процессе управления не попадают на линию $k_1\sqrt{Q_2} - k_2\sqrt{Q_1} = 0$, то управление должно иметь два интервала. При попадании траекторий на эту линию следует ожидать особых управлений. Коэффициенты k_1 и k_2 - вариативны, поэтому в пространстве $R_2\{Q_1, Q_2\}$ реализуется множество особых линий. В данном случае следует определить, когда особая линия совпадает с линией стационарных состояний, тогда уравнение последней должно удовлетворять и уравнению особой линии, т.е. $[b_1k_2 / b_2k_1]\sqrt{Q_2} = (k_1 / k_2)\sqrt{Q_2}$, отсюда имеем условие: $b_1 / b_2 = k_1^2 / k_2^2$, при соблюдении которого столбцы матрицы $[D_2]$ становятся линейно-зависимыми и пространство $R_2\{Q_1,Q_2\}$ вырождается в подпространство R_1, т.е. в прямую линию, уравнение которой $Q_1=[b_1k_2/b_2k_1]\sqrt{Q_2}$.

Если заданы граничные условия на особой линии (5), то существует оптимальное управление в R_1, содержащее один интервал. При $k_1=k_2=k, b_1=b_2=b$ особая линия и множество стационарных состояний имеют уравнение $Q_1=Q_2$, дифференциальное уравнение траекторий системы (3) в $R_2\{Q_1,Q_2\}$ для U=1 и U=0 имеет вид: $\frac{dQ_2}{dQ_1}=\frac{b-k\sqrt{Q_2}}{b-k\sqrt{Q_1}}$, интегрирование которого дает $\frac{\sqrt{Q_1}}{k}+\frac{b}{k^2}\ln(b-k\sqrt{Q_1})=\frac{\sqrt{Q_2}}{k}+\frac{b}{k^2}\ln(b-k\sqrt{Q_2})+C$. При начальных условиях на линии $Q_1=Q_2$, равных $Q_1=Q_2=0$, откуда C=0 и уравнение траектории принимает вид: $\frac{\sqrt{Q_1}}{k}+\frac{b}{k^2}\ln(b-k\sqrt{Q_1})=\frac{\sqrt{Q_2}}{k}+\frac{b}{k^2}\ln(b-k\sqrt{Q_2})$. Данное уравнение справедливо для любого $Q_1=Q_2$, поэтому траектория системы совпадает с линией стационарных состояний и принадлежит пространству R_1.

При U=0 имеем $dQ_2/dQ_1=\sqrt{dQ_2}/\sqrt{dQ_1}$ и при разделении переменных и интегрировании получаем: $Q_1=Q_2=C$. Если $Q_{10}=Q_{20}$, то C=0 и тогда получаем уравнение траектории, совпадающее с уравнением линии стационарных состояний, т.е. и при U-0 траектория принадлежит подпространству R_1.

Практические рекомендации по проектированию структуры управления. На практике следует иметь оценки законов управления при вариации коэффициентов дифференциальных уравнений. При $k_1=k_2=k=1$ принимаем $b_1=\text{var}$, при этом особая линия в $R_2\{Q_1,Q_2\}$ своего положения не меняет, а линия стационарного состояния изменяет. Обе линии начнут расходиться при следующих условиях: для практики принимается $b_1=0{,}8$ и строятся траектории в $R_2\{Q_1,Q_2\}$ для U=1 и U=0. Уравнение особой линии $Q_1=Q_2$, а уравнение линии стационарных состояний $Q_1=b^2Q_2=0{,}64Q_2$. При использовании уравнения для траекторий при U=1 имеем $\sqrt{Q_1}+0{,}8\ln(0{,}8-\sqrt{Q_1})=\sqrt{Q_2}+\ln(0{,}8-\sqrt{Q_2})+C_1$. При U=0 имеем $\sqrt{Q_1}=\sqrt{Q_2}+C_2$.

При задании граничных условий в различных полупространствах (в зоне расплава ванны и синтетического шлака) могут иметь место два случая. Начальные условия заданы в первой полуплоскости, а конечные – во второй. Оптимальное релейное управление существует, траектории при U=1 пересекают особую линию $Q_1=Q_2$. Начальные условия заданы во второй полуплоскости, а конечные – в первой. Для данной совокупности граничных условий оптимального управления не существует, траектории при U=0 не пересекают особую линию. На практике эксплуатация представляет особый интерес, когда граничные условия задаются на линии стационарных состояний (когда возможен нестационарный обмен энергией между печными трансформаторами). Тогда область оптимальных траекторий сужается, а особая линия $Q_1=Q_2$ не влияет на оптимальное управление. При изменении коэффициентов k_1 и k_2 меняется положение особой линии и линии стационарных состояний, однако характер оптимальных управлений не изменяется и остается таким же, как и при изменении коэффициентов b_1 и b_2. Из анализа следует, что оптимальные управления при $k_1=\text{var}$, $k_2=\text{var}$, $b_1=\text{var}$, $b_2=\text{var}$ могут сопровождаться бифуркационными явлениями, которые выражаются в том, что малые изменения коэффициентов b_i и k_i приводят к изменению качественной картины оптимального управления и траекторий, т.е. к изменению топологии траекторий. При $b_1/b_2=k_1^2/k_2^2$ все оптимальные траектории располагаются на линии $Q_1=(b_1k_2/b_2k_1)\sqrt{Q_2}$, т.е. в пространстве R_1, если граничные условия заданы на ней. Оптимальное управление имеет один интервал. При малой вариации b_i и k_i меняется структура пространства управления (в виде второго полупространства). Оптимальное управление имеет при этом не более двух интервалов, а оптимальные траектории состоят из криволинейных отрезков. При $b_1/b_2=k_1^2/k_2^2$ объект управления является не грубым. Он становиться грубым, когда изменяются коэффициенты b_i и k_i, которые можно принять за бифуркационную пару. В данном случае следует определить матрицу:

$$[B_3]=\frac{\partial[B_2(Q)]}{\partial Q}([A(Q)+[B]U])-\frac{\partial[A(Q)]}{\partial Q}[B_2(Q)]=\begin{bmatrix}\frac{b_1k_1^2}{2Q_1} & -\frac{b_1^2k_1}{4\sqrt{Q_1^3}}U\\ \frac{b_2k_2^2}{2Q_2} & -\frac{b_2^2k_2}{4\sqrt{Q_2^3}}U\end{bmatrix}.[D_2']=\begin{bmatrix}b_1\,\frac{b_1k_1^2}{2Q_1} & -\frac{b_1^2k_1}{4\sqrt{Q_1^3}}U\\ b_2\,\frac{b_2k_2^2}{2Q_2} & -\frac{b_2^2k_2}{4\sqrt{Q_2^3}}U\end{bmatrix},$$

где матрица $[D_2']=[[B_1],[B_2]]$.

Из условия $\det[D_2']=0$ определяется U_{oc}, равное $U_{oc}'=\dfrac{2(k_1^2Q_2-k_2^2Q_1)\sqrt{Q_1Q_2}}{b_1k_1\sqrt{Q_2^3}-b_2k_2\sqrt{Q_1^3}}$.

Если параметры $k_1=k_2=b_1=b_2=1$ (уставки трансформаторов одинаковые), тогда $U_{oc}'=\dfrac{(Q_2-Q_1)\sqrt{Q_1Q_2}}{\sqrt{Q_2^3}-\sqrt{Q_1^3}}$.

На особой линии при $Q_1=Q_2$ управление $U_{oc}=0/0$. Управление не определяется и не может быть любым, в т.ч. оптимальным. Траектории, соответствующие этому управлению, определяются следующим образом. Подставляется U_{oc} в (3) и при делении уравнения системы почленно имеем:

$$dQ_2/dQ_1=\left(\sqrt{Q_2}\,(2\sqrt{Q_1}Q_2-\sqrt{Q_1^3}-\sqrt{Q_2^3})\right)/\left(\sqrt{Q_1}\,(\sqrt{Q_2^3}+\sqrt{Q^3-2}\sqrt{Q_2}Q_1)\right). \tag{6}$$

Согласно (6) в пределе наклон траекторий становиться равным наклону особой линии $Q_1=Q_2$, а производная на самой линии не определена.

Составляется $[D_2'']=[[B_2],[B_3]]$, равная: $[D_2'']=\begin{bmatrix}\dfrac{b_1k_1}{2\sqrt{Q_1}} & \dfrac{b_1k_1^2}{2Q_1}-\dfrac{b_1^2k_1}{4\sqrt{Q_1^3}}U\\ \dfrac{b_2k_2}{2\sqrt{Q_2}} & \dfrac{b_2k_2^2}{2Q_2}-\dfrac{b_2^2k_2}{4\sqrt{Q_2^3}}U\end{bmatrix}$, из выражения детерминанта которой определяется U_{oc} следующего вида $U_{oc}''=\left(2(k_1\sqrt{Q_2}-k_2\sqrt{Q_1})\sqrt{Q_1Q_2}\right)/\left(b_1Q_2-b_2Q_1\right)$. На особой линии при $k_1=k_2=b_1=b_2=1$ управление U_{oc}'' имеет вид: $U_{oc}''=\left(2(\sqrt{Q_2}-\sqrt{Q_1})\sqrt{Q_1Q_2}\right)/\left(Q_2-Q_1\right)$.

Если $Q_1=Q_2$, то $U_{oc}''=0/0$, т.е. оно опять не определено, может быть любым, в т.ч. оптимальным. Находим траектории, соответствующие особому управлению. При подстановке U_{oc}'' в (3) имеем:

$$dQ_1/dt=\left(\sqrt{Q_1}Q_2-2Q_1\sqrt{Q_2}+\sqrt{Q_1^3}\right)/\left(Q_2-Q_1\right);\ dQ_2/dt=\left(2\sqrt{Q_1}Q_2-Q_1\sqrt{Q_2}-\sqrt{Q_2^3}\right)/\left(Q_2-Q_1\right). \tag{7}$$

При делении (7) имеем $dQ_2/dQ_1=\sqrt{Q_2}/\sqrt{Q_1}$. Если $Q_1=Q_2$, то производная равна (-1), это означает, что особые траектории при различных начальных условиях под прямым углом направлены к особой линии.

Выводы. Проведенный анализ позволяет установить, что: 1) если все печные электротехнические комплексы питаются от одного цехового трансформатора, то управление содержит не более {U}интервалов, и знаки на интервалах чередуются (n-1) раз; 2) если среди парралельно включенных объектов имеются одинаковые, то в Rn образуется особый конус Ri. Размерность конуса Ri определяется числом линейно-независимых строк в матрице [Dn], т.е. числом одинаковых звеньев. Она может меняться от 1 до n-1. Тогда, если граничные условия принадлежат особому конусу, существует оптимальное управление, количество интервалов которого не более размерности этого конуса {i}. Если граничные условия заданы в Ri и в Rn, то оптимального уравнения для них не существует. Данные выводы справедливы для любых правых частей дифференциальных уравнений (модели/объекта); 3) управление параллельными объектами обладает бифуркационными свойствами. Малая вариация коэффициентов приводит к изменению размерности пространства управления и топологической картины оптимальных траекторий; 4) пространство Rn разбивается особыми плоскостями или поверхностями на отдельные подпространства. Среди них имеется одно, соответствующее области достижимости, существует оптимальное управление, переводящее координаты на линию стационарных состояний. Если начальные условия заданы вне области достижимости, то координаты объекта следует вначале перевести в область достижимости, в которой существует оптимальное управление. Данный процесс достигается кусочно-постоянным управлением. Для сугубо стохастических случаев нагрузки на отдельных объектах следует воспользоваться методикой [4], и параметры моделей для печей указанного класса определяются по результатам исследований [5].

Литература.

1. Эффективное энергоиспользование и альтернативная энергетика/А.Н. Криволапов, И.К. Лассен, Э.П. Островский и др.; Под ред. А.К. Шидловского. – Киев: Українські енциклопедичні знання, 2000. – 302С.
2. Элементы теории систем и численные методы моделирования процессов тепломассопереноса/ В.С. Швыдкий, Н.А. Спирин, М.Г. Ладыгичев и др.; Под ред. В.С. Швыдкого. – М.: ИНТЕРМЕТ ИНЖИНИРИНГ, 1999. – 520 С.
3. Фёдоров В.В. Теория оптимального эксперимента. – М.: наука, 1971. – 312 С.
4. Чернецкий В.И. Математическое моделирование стохастических систем. – Петрозаводск: Изд-во Петрозаводского гос. ун-та, 1994. – 488 С.
5. Труфанов И.Д. Системы оптимизации режимов работы мощных дугових сталеплавильних печей на основе интегрального критерия энергосбережения. Дисс. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук. – Запорожье, 2001. – 530с.