Труфанов И.Д., Метельский В.П. ***Украина***
Андриянс И.А. ***Запорожье***
Лютый А.П.

Запорожский национальный технический университет
Электрометаллургический завод «Днепроспецсталь»

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА МОЩНОЙ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

Анализ состояния проблемы энергосбережения в электросталеплавлении и постановка задач исследований. Современный уровень рыночных отношений в общественном промышленном и агропромышленном производстве характеризуется низкими показаниями качествами использования первичных и вторичных энергоресурсов, бросовых материалов, нетрадиционных и возобновляемых источников энергии [1]. В то же время, вопросы эффективного использования энергии, разработки и реализации долгосрочных комплексных программ и проведения в хозяйственно-научной деятельности промышленных предприятий Государственной программы энергосбережения, создания и внедрения конкурентоспособных программ и мероприятий по снижению энергетической составляющей в цене товаров и услуг многие годы находятся в центре внимания органов власти, руководителей, научно-исследовательского и научно-технического персонала, общественности Украины. Этой проблеме посвящены ряд Законов Украины «Об энергосбережении», «об электроэнергетики», ряд специальных Постановлений КМ Украины по вопросам энергообеспечения и эффективного использования, на это направлены научные исследования и разработки по актуальнейшим аспектам многоплановой проблемы энергосбережения [2 и др.], в т.ч. труды авторов данной статьи. Основными положениями государственной политики энергосбережения в соответствии с Законом Украины «Об энергосбережении» являются положения о соблюдении энергетических стандартов и нормативов использования топлива и энергии. Вопросы научного обеспечения разработки оптимальных процессов управления и регулирования координат электротехнических комплексов и электротехнологии в электросталеплавлении являются целью ниже приведённых исследований.

Основные теоретические положения о повышении энергоэффективности электротехнологии электросталеплавлении. Указанные выше вопросы энергетической политики Украины, как обладающей мощным энерго-экономическим комплексом в горно-металлургической отрасли промышленности являются неотъемлемой частью нормативно-технического обеспечения не только электрометаллургической отрасли, но и всех потребителей электроэнергии и энергоресурсов. В соответствии с Законом Украины «Об энергосбережении» научные исследования в горно-металлургическом комплексе научное обоснование энергоэффективности динамического функционирования направлено на «встановлення комплексу обов’язкових норм, правил, вимог щодо раціонального використання та економії паливно-енергетичних ресурсів» [2]. Ниже приводятся основные теоретические положения научного обоснования разработки, проектирования и практической реализации энергосберегающего электротехнического комплекса мощных дуговых сталеплавильных печей ёмкостью 50-200т.

Рассматриваемый класс электротермических установок относится к высоковооружённых в энергетическом отношении (от 640 до 800 кВт/т установленной мощности печного трансформатора). Основным параметром энергоэффективности такого энергокомплекса является cosφ «короткой сети» дуговой сталеплавильной печи. Нами рассматриваются процессы синтеза оптимальных управлений для «короткой сети» дуговой сталеплавильной печи, оборудованной неуправляемой системой компенсации реактивной энергии на основе батареи статистических конденсаторов (БСК). Разработка научных положений синтеза оптимальный управлений для нелинейных объектов, каковыми являются «короткие сети» печных трансформаторов, проводится на основе моделей и законов динамики печного электрокомплекса [3], качественного анализа и синтеза параметров структуры системы регулирования координат, базирующихся на условии общности положения (УОП), качественной теории дифференциальных уравнений и анализе функциональных матриц [4], на базе чего находятся УОП для нелинейных объектов, используются способы определения особых управлений и бифуркаций оптимальных траекторий, задачи определения минимумов ресурсов с помощью качественной теории дифференциальных уравнений для конструирования регуляторов и моделей наблюдаемости нелинейных объектов.

Основные результаты исследований и их обсуждение. В данном случае рассматривается электропечной комплекс, как состоящий из n-последовательно звен6ьев с одним управлением от регулятора мощности РММ-9522. В первом предположении каждое звено системы описывается векторно-матричным уравнением общего вида $\frac{d\vec{Q}}{dt} = [A](\vec{Q}) + [B](\vec{Q})\vec{U}$. В данном случае:

$$\frac{dQ_1}{dt} = f(Q)U - f_{11}(Q_1) = f_1(Q_1, U); \quad \frac{dQ_2}{dt} = f_{21}(Q_1, Q_2) - f_{22}(Q_2) = f_2(Q_1, Q_2); \ldots,$$
$$\frac{dQ_n}{dt} = f_{n(n-1)}(Q_{n-1}, Q_n) - f_{nn}(Q_n) = f_n(Q_{n-1}, Q_n). \tag{1}$$

На основании (1) имеем

$$[B(Q)] = [f(Q_1)0...0]^T; [A(Q)] = \begin{bmatrix} -f_1(Q_1) \\ f_2(Q_1, Q_2) \\ .... \\ f_n(Q_{n-1}, Q_n) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Общая форма математического описания объекта (1) конкретизируется следующим образом. Функции $f_{i(i-1)}(Q_{i-1}, Q_i)$ содержат, например, только координату Q_{i-1} и являются полиномами от соответствующих координат. В этом случае система (1) примет вид:

$$\frac{dQ_1}{dt} = b_1U - f_{11}(Q_1); \ \frac{dQ_2}{dt} = P_1(Q_1) - f_{22}(Q_2);..., \frac{dQ_n}{dt} = P_{n-1}(Q_{n-1}) - f_{nn}(Q_n), \quad (3)$$

где $\vec{Q}_i$ - потоки энергии: электрической, природного газа, кислорода, окатышей, агломерата, окислителей, карбюризаторов, рафинирующих, раскислителей и пр.; $\vec{U}$ - управления.

Определяющий детерминант $[D_n]$ [4] будет иметь вид:

$$\det[D_n] = b_1^n \left(\frac{\partial P_1(Q_1)}{\partial Q_1}\right)^{n-1} \left(\frac{\partial P_2(Q_2)}{\partial Q_2}\right)^{n-2} ... \frac{\partial P_{n-1}(Q_{n-1})}{\partial Q_{n-1}}. \quad (4)$$

При $\det[D_n]$=0 имеем:

$$\left(\frac{\partial P_1(Q_1)}{\partial Q_1}\right) = 0; \left(\frac{\partial P_2(Q_2)}{\partial Q_2}\right) = 0;..., \frac{\partial P_{n-1}(Q_{n-1})}{\partial Q_{n-1}} = 0. \quad (5)$$

Корни (5) определяют экстремальные точки. В экстремальных точках правые части системы дифференциальных уравнений (3) принимают максимальные или минимальные значения, т.е. и гамильтониан системы так же принимает экстремальные значения. Для дальнейшего анализа исполнительный регулятор РММ-9522 принимается инерционным и объект будет иметь следующее математическое описание:

$$\frac{dQ_1}{dt} = b_1U - a_{11}Q_1; \ \frac{dQ_2}{dt} = a_{21}Q_1; \frac{dQ_3}{dt} = a_{32}\left(Q_2 - kQ_2^2\right) - Q_3. \quad (6)$$

При значениях $b_1 = a_{11} = a_{21} = a_{32} = k = 1$ система (6) в векторно-матричной форме примет вид:

$$\frac{d\vec{Q}}{dt} = [A(Q)] + [B(Q)]\vec{U}, \text{где } [A(Q)] = \left[-Q_1 Q_1 Q_2 - Q_2^2 - Q_3\right]^T; [B(Q)] = [B] = [B_1] = [100]^T. \quad (7)$$

Матрица $[D_3]$ определяется значениями матриц $[B_2]$ и $[B_3]$:

$$[B_2] = -\frac{\partial[A(Q)]}{\partial Q}[B_1] = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1-2Q_2 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}; [B_3] = -\frac{\partial[A(Q)]}{\partial Q}[B_2] = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1-2Q_2 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1-2Q_2 \end{bmatrix};$$

$$[D_3] = [[B_1],[B_2],[B_3]] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 1-2Q_2 \end{bmatrix}; \ \det[D_3] = 2Q_2 - 1.$$

При $\det[D_3]$=0 имеем уравнение особой плоскости $Q_2 = 0.5$ в пространстве $R_3\{Q_1, Q_2, Q_3\}$. Количество нулей в соответствии [4] определяется из соотношения $N \le 2 + N[1 - 2Q_2]$. Особое управление реализуется при движении по плоскости $Q_2 = 0.5$. При использовании рекуррентного соотношения $[B(Q)] = \left[B_\gamma(\vec{Q}, \vec{U})\right] = \frac{\partial\left[B_{\gamma-1}(\vec{Q}, \vec{U})\right]}{\partial Q}\left\{\left[A(\vec{Q})\right] + \left[B(\vec{Q})\vec{U}\right]\right\} - \left\{\frac{\partial\left[A(\vec{Q})\right]}{\partial Q} + \frac{\partial[B(Q)]}{\partial Q}\vec{U}\right\}\left[B_{\gamma-1}(\vec{Q}, \vec{U})\right]; [B_1(Q)] = [B(Q)]$ для рассматриваемого случая определяем $[B_4]$:

$$[B_4] = \frac{\partial\left[B_3(\vec{Q})\right]}{\partial Q}\left\{A(\vec{Q}) + [B]\vec{U}\right\} - \frac{\partial\left[A(\vec{Q})\right]}{\partial Q}\left[B_3(\vec{Q})\right] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U - Q_1 \\ Q_1 \\ Q_2 - Q_2^2 - Q_3 \end{bmatrix} -$$

$$- \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1-2Q_2 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1-2Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ -2Q_2 + 2(1-2Q_2) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Матрица (8) не содержит управления $\vec{U}$, поэтому определяется:

$$[B_5]=\frac{\partial[B_4(Q)]}{\partial Q}\{[A](Q)+[B]U\}-\frac{\partial[A(Q)]}{\partial Q}[B_4(Q)]=\begin{bmatrix}0&0&0\\0&0&0\\-2&-4&0\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}U-Q_1\\Q_1\\Q_2-Q_2^2-Q_3\end{bmatrix}-$$

$$-\begin{bmatrix}-1&0&0\\1&0&0\\0&1-2Q_2&-1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1\\-1\\-2Q_2+2(1-2Q_2)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1\\-1\\-2U-4Q_1+3(1-2Q_2)\end{bmatrix}, \quad (9)$$

откуда детерминанты имеют вид:

$$\det[D_3']=[[B_1],[B_2],[B_5]]=2U+4Q_1-3(1-2Q_2);\det[D_3'']=[[B_1],[B_3],[B_5]]=2U+4Q_1-2(1-2Q_2);\det[D_3''']=[[B_2],[B_3],[B_5]]\equiv 0 \quad (10)$$

При $\det[D_3']=0$ и $\det[D_3'']=0$ имеем особые управления как функции координат: $U_{0C1}=\frac{3}{2}(1-2Q_2)-2Q_1$; $U_{0C2}=(1-2Q_2)-2Q_1$. При движении на особой плоскости $Q_1=0$ и $Q_2=0.5$ имеем $U_{0C2}=0$. Имеем условия Пуанкаре-Бендиксона [4] проводится качественное исследование (10), для чего в(10) подставляются особые управления

$$\frac{dQ_1}{dt}=U_{0C1}-Q_1=\frac{3}{2}(1-2Q_2)-2Q_1-Q_1=\frac{3}{2}-3Q_2-3Q_1;\frac{dQ_1}{dt}=U_{0C2}-Q_1=1-2Q_2-2Q_1-Q_1=$$

$$=1-2Q_2-3Q_1;\frac{dQ_2}{dt}=Q_1;\frac{dQ_3}{dt}=Q_2-Q_2^2-Q_3.$$

Решается система первых двух уравнений, которая является линейной $\frac{dQ}{dt}=[A_{1,2}]Q+(B_{1,2})$; $[A_1]=\begin{bmatrix}-3&-3\\1&0\end{bmatrix}$; $[A_2]=\begin{bmatrix}-3&2\\1&0\end{bmatrix}$; $[B_1]=\begin{bmatrix}3/2\\0\end{bmatrix}$; $[B_2]=\begin{bmatrix}1\\0\end{bmatrix}$. Характеристический полином (определитель) имеет вид:

$$\Delta_1(\mu)=\begin{bmatrix}-3-\mu&-3\\1&0-\mu\end{bmatrix}=\mu^2+3\mu^2+3=0;\ \mu_{1,2}=-1.5\pm\sqrt{-0.75};\ \Delta_2(\mu)=$$

$$=\begin{bmatrix}-3-\mu&-2\\1&0-\mu\end{bmatrix}=\mu^2+3\mu\ +2=0;\ \mu_{1,2}=-1.5\pm 0.5;\ \mu_1=-1;\mu_2=-2.$$

Исключая колебательные процессы управления, принимаются к рассмотрению $U_{0C2}=(1-2Q_2)-3Q_1$, откуда для особого управления решения $Q_1(t)\ Q_2(t)$ реализуется по формуле Коши [4]:

$$Q(t)=\exp\left\{\begin{matrix}[A_2]tQ_0+\int_0^t\exp\{[A_2](t-\tau)\}[B_2]d\tau;Q_1(t)=C_1\exp(-t)+C_2\exp(-2t);\\Q_2(t)=0.5+C_1'\exp(-t)+C_2'\exp(-2t)\end{matrix}\right\}.$$

При подстановке $Q_2(t)$ в (8) получим $Q_3(t)=0.25+C_1''\cdot\exp(-2t)+C_2''\exp(-3t)+C_3''\cdot\exp(-4t)$. При $t\to\infty$, $Q_1\to 0, Q_2\to 0; Q_3\to 0.25$ имеем семейство особых траекторий с устойчивым узлом [4]. Из данного семейства оптимальной является траектория $Q_1=0, Q=0.5$, движение по которой за минимальное время, исключая сам узел. Применительно к условиям управления механизмом газокислородными горелками, последний описывается синусоидальной функцией, откуда имеем следующую систему уравнений:

$$\frac{d\vec{Q}_1}{dt}=b_1\vec{U}-a_{11}Q_1;y=k\sin Q_1;\frac{d\vec{Q}_2}{dt}=y-Q_2=k\sin Q_1-Q_2, \quad (11)$$

где y - функция расхода природного газа. На координаты и управление наложены ограничения: $|U|\le\pi$; $0\le Q_1\le\pi$; $0\le Q_2\le k\sin\pi/2$. Статическая характеристика системы (11) при данных условиях имеет экстремум при $Q_1=\pi/2$, поэтому линия содержит участок с особым управлением $U_{0C1}=(a_{11}/b_1)/(\pi/2)$, которому соответствует закон оптимального управления. Качественный анализ этого управления проводится при:

$$\frac{d\vec{Q}}{dt}=[A(Q)]+[B(Q)]\vec{U};\ [A(Q)]=\begin{bmatrix}0\\k\sin Q_1-Q\end{bmatrix};\ [B(Q)]=[B]=[B_1]=[b_1 0]^T.$$

Определяется матрица $[D_2]=[[B_1],[B_2]]$ из соотношений:

$$[B_2]=-\frac{\partial[A(Q)]}{\partial Q}[B_1]=\begin{bmatrix}0&0\\k\cos Q_1&-1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}b_1\\0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0\\-bk\cos Q_1\end{bmatrix};[D_2]=\begin{bmatrix}b_1&0\\0&-bk\cos Q_1\end{bmatrix};\det[D_2]=-b_1^2k\cos Q_1.$$

При $\det[D_2]$=0 имеем: $-b_1^2 \cos Q_1 = 0$. Данное равенство выполняется при $Q_1 = \pi/2$ (при полном повороте газового механизма), т.е. получим особую линию. Для определения особого управления вычисляется $[B_3] = \frac{\partial[B_2(Q)]}{\partial Q}\{[A](Q)+[B]U\} - \frac{\partial[A](Q)}{\partial Q}[B_2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ b_1 k \sin Q_1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_1 & U \\ k \sin Q & -Q_2 \end{bmatrix} -$

$-\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ k\cos Q_1 & -1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 0 \\ -bk\cos Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ (b_1 U - a_{11}Q_1)b_1 k \sin Q_1 - b_1 k Q_1 \end{bmatrix}$.

Составляются определители $\det[D_2'] = [[B_1],[B_3]] = b_1^2 k[(b_1 U - a_{11}Q_1)\sin Q_1 - \cos Q_1]$; $\det[D_2''] = [[B_2],[B_3]]$.

При $\det[D_2']$=0 определяется особое уравнение вида $U_{0C} = \frac{a_{11}}{b_1} + \frac{1}{b_1}\frac{\cos Q_1}{\sin Q_1}$. При $Q_1 = \pi/2$ величина $U_{0C} = \left(a_{11}/b_1\right)\left(\pi/2\right)$. При движении по линии $Q_1 = \pi/2$ необходимо в момент достижения этой линии произвести переключение управления от 1 до $U_{0C} = \left(a_{11}/2b_1\right)\pi$ и стабилизировать на этом значении. При достижении точки на статической характеристики и при стабилизации координат в этой точке управление необходимо принять равным $U = \left(a_{11}/b_1\right)\arcsin Q_2/k$.

Для проведения качественного исследования особых управлений необходимо принять $a_{11} = b_1 = 1$, т.е. $\frac{dQ_1}{dt} = U_{0C} - Q_1 = Q_1 + \frac{\cos Q_1}{\sin Q_1} - Q_1 = \frac{\cos Q_1}{\sin Q_1}; \frac{dQ_2}{dt} = \sin Q_1 - Q_2$, откуда решение для $Q_1 : \int \frac{\sin Q_1}{\cos Q_1} = \int tgQ_1 dQ_1 = \int dt;\ -\ln\cos Q_1 = t + C_1;\ \cos Q_1 = \exp\left[-\left(t + C_1\right)\right]$. При $t \to \infty$ $Q_1 \to \pi/2$, т.е. решение стремится к особой линии. При подставке $Q_1(t)$ во второе уравнение имеем $\frac{dQ_2}{dt} + Q_2 = \sin\arccos\exp[-(t + c_1)]$, которое при интегрировании даёт $Q_2(t) = \exp(-t)\cdot\left[\int \sin\arccos\exp\left(-\left(t + c_1\right)\right)\exp t dt + C_2\right]$. Анализ данного выражения показывает, что при $t \to \infty$ $Q_2 \to 1$, т.е. имеем устойчивый узел, в котором состояние равновесия простое и грубое, поэтому характер управления и траекторий не зависит от вариации коэффициентов в правых частях дифференциальных уравнений, обособленных дисперсией нагрузки теплотехнического фракта дуговой печи.

Выше проведенный численный анализ динамики электропечного комплекса выполнен применительно к условиям печи ДСП-50 при питании от печного трансформатора ЭТЦН-32000/35 У3 при уставках РПН: 1-407 В, 2-388 В, 3-371 В, 4-355 В, ток ступеней 1-4-28400Ф (низкой стороны). Печной трансформатор кабелем АСБГ 3×150 (3шт), L=0.39 км питается от цехового трансформатора ТДТН-63000/150/35/6; $I_{HH} = 3182A$ (5511А – линейный ток). На стороне НН цехового трансформатора установлена БСК 4.5 $MB \cdot A_P$ на $U_H = 35$кВ. короткая сеть: КВС-2100$\times$4 ветки в фазе; L=11.3м.

Выводы. Рассмотренный объект (дуговой электротехнический комплекс) как объект с экстремальными характеристиками (процессов преобразования энергопотоков в теплоту плавления «садки») состояния равновесия для особых управлений являются простыми группами такие объекты не обладают бифуркационными свойствами, т.е. топология оптимальных траекторий при эксплуатационных вариациях параметров не меняются. При определении оптимальных управлений для объектов с экстремальными характеристиками представляется возможность построения траектории для заданных граничных условий без проведения исследования УОП процессов. Анализ с общих позиций (с использованием УОП) показывает, что управление с особыми участками аналогично управлению с дополнительными ограничениями на координаты. В данном случае управление сводится к выводу координат на ограничения и движение по этим ограничениям (или их пересечению). Управления, соответствующие движению по ограничениям, вычисляются из УОП, если их вычисление представляется затруднительным из физических соображений.

Литература.

1. Соколовская Г.А., Сигарева Т.С. Ресурсосбережение на предприятиях.-М.:Экономика, 19910.-156с.
2. Энергосбережение в Украине: оборудование, материалы, услуги. Справочник / Научн. ред. О.И. Гололобав. – Киев: Международный центр энергоэффективных технологий, 2000.-251 с.
3. Дануис Я.Б., Жилов Г.М. Емкостная компенсация реактивных нагрузок мощных токоприемников промышленных предприятий. Л.: Энергия, 1980.-176с.
4. Справочник по теории автоматического управления / А.Г. Александров, В.М. Артемьев, В.Н. Афанасьев и др.; Под ред. А.А. Красовского.- М.: Наука, 1987.-712 с.