УДК 621.365.7.03.14

І.Труфанов, В.Метєльський, В.Бондаренко, Ю.Крисан
Запорізький національний технічний університет

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В ЕЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНІЙ ГАЛУЗІ

Методологічно обгрунтуваний науковий напрямкок розв'язування задач зберігання енергії при плавленні металу в дугових печах. Розглядається методика розробки алгоритмів прямого керування на базі промислових контролерів і мікрокомп'ютерів. Алгоритми будуються на основі інтегрального критерію енергозбереження. Виконано аналіз власних і синтез керуючих рухів системи енергозбереження. Знайдено алгоритм, що визначає співвідношення перевірки оптимальності алгоритму за енергозбереженням й умовам його фізичної реалізації.

The methodological substantiation of a scientific direction of the decision of problems of the savings of energy is made at fusion of metal in arc furnaces. The technique of development of algorithms of a direct control is considered on the basis of industrial control-lers and microcomputers. The analysis own and synthesis of managing movements of system savings of energy is carried out. The algorithm of a parity of check of an optimality of algo-rithm savings of energy to conditions of its physical realization is received.

Розвиток електротехнологічного потенціалу світового металургійного, і особливо електрометалургійного, комплексу як найбільш ресурсо- і наукомісткої галузі промислово розвитих країн, характеризується процесами інтернаціоналізації в галузі розробок нових технологій і систем енерго- і електроустаткування. Цей напрямок розвитку металургії чорних і важких кольорових металів був остаточно сформульований на Другій конференції "Світова чорна металургія" (21–22 березня 1996г), проведеній газетою Financial Times і фірмою CRU International. Сьогодні провідні фірми (Clesim, MAN GHH, Gallatin Steel, Nucor, Coppel Steel, Hylsa, VOEST-Alpine Industrieanlagenbau, Fuchs Sys-temtechniks, NKK, SAM Montereau, ARBED Schiflange, Co-Steel Sheernes, Zhangjiangang Sheen Feith Steel, DDS, Ferriere Nord, BBC-Brusa і ін.) будують заводи будь-якого типу в будь-якій точці земної кулі з будь-якою метою. Трудозатрати не мають особливого значення при визначенні місця розташування заводу. Фінансові інститути мають всесвітнє значення і розпорядження GATT сприяють розширенню у світовому масштабі будівництва міні-заводів. Фірма UBS Securities, Japan інтенсивно перебудовує заводи з повним металургійним циклом, а фірма Klockner & Co AG координує дії більш ніж 2200 фірм з розподілу сталевої продукції в Європі.

При ціні металобрухту \$140/т фірма Usinor Sacilor домоглася зниження витрат на 1,7% тільки за рахунок енергозбереження, а фірма Fos (5 заводів) має витрати виробництва менші, ніж у найкращих міні-заводів США. Фірми Demag і Preussag Stahl AG скоротили імпорт сталі майже втричі завдяки структурній перебудові, економії капіталу і реалізації енергоощадних технологій. Серед світових експортерів високоякісної сталі виділяється завод

Дніпроспецсталь (єдине в Україні підприємство з випуску жароміцних і прецизійних сплавів, що не іржавіють, підшипникових, інструментальних, легованих конструкційних сталей). Рівень технології заводу (електрошлакове і вакуумно-дугове переплавлення, аргоннокисневе рафінування, вакуумування, процеси порошкової металургії тощо) підтверджується сертифікатами Товариства технічного нагляду TUV, Det Norske Veritas, European market research center, Регістра Ллойда. Споживчі властивості більш ніж 300 марок сталей Дніпроспецсталі відповідають стандартам DIN, AISI, ASTM, ISO 9002 та іншим. У цих умовах гостро постає питання реалізації енергоощадних технологій при реконструкції електрометалургійних потужностей на основі засобів силової електроніки (СЕ). Розвиток СЕ неможливий без відповідного розвитку матеріальної бази (силових напівпровідникових приладів, мікроелектроніки, оптоволоконної і лазерної техніки, силових і мікроелектронних конденсаторів тощо). Міжгалузевою науково - технічною програмою "Розвиток основної елементної бази силової електроніки в Україні як способу енерго- і ресурсозбереження, підвищення технічного рівня продукції машинобудування", затвердженою Мінмашинпромом і Мінпромполітики України в 1996р, передбачені розробка й освоєння вітчизняної елементної бази в обсязі \$40 млн, що дасть змогу виготовити й установити не менш ніж 5 млн кВт потужності СЕ. Одноразові капітальні вкладення в енергоощадну СЕ \$(500–700) млн забезпечать щорічне вивільнення від \$1,3 до 1,9 млрд, які можуть бути спрямовані на реконструкцію і відновлення потужностей, що генерують. Такий обсяг капвкладень (\$40 млн) у підготовку виробництва в Україні дозволить знизити імпорт на \$200–250 млн і створити додатково десятки тисяч робочих місць наукоміскої технології. Виробництво зазначених 5 млн. кВт пристроїв енергозберігаючої СЕ (при співвідношенні рівнів витрат \$1000–1500 на введення 1кВт потужностей, що генерують, і \$100–150 на введення 1кВт пристроїв СЕ) цілком забезпечується наявними в Україні виробничими потужностями ВАТ НДІ силової електроніки «Перетворювач», ВАТ «Завод Перетворювач», ВАТ «Електроапаратный завод м. Запоріжжя», ВАТ НПО ХЕМЗ м. Харків та інші. Вирішення цієї проблеми СЕ дасть змогу перевести дугові сталеплавильні печі з змінного струму на постійний, що забезпечить пряму економію електроенергії на 10–15%, підвищення продуктивності на 10–12%, витрату графітових електродів (при ціні \$(2,2–4,5) /кг) у 2,75–3,2 раза, зниження обсягів викидів пилу і газів у 7–8 разів, значне поліпшення екологічних умов.

Найважливішим етапом поширення енергозбереження в електрометалургії є розробка алгоритмів прямого керування на базі промислових контролерів і мікрокомп'ютерів. Алгоритми будуються на основі інтегрального критерію енергоощадження. За вхідний вектор приймається вектор потоків енергії $\vec{Q}_{эt}^{(r)} = \left\{Q_{1t}^{(r)}, Q_{2t}^{(r)}, \ldots, Q_{mt}^{(r)}\right\}$, а за вихідний – вектор енерготехнологічної ефективності $\vec{q}_{эt}^{(r)} = \left\{q_{э1t}^{(r)}, q_{э2t}, \ldots, q_{эmt}\right\}$. Відповідно вектори для дискретного і безперервного часу $\vec{Q}_э = \sum_{t=0}^{\theta} R\left\{\vec{Q}_{t-\tau}, \tau\right\}$, $\bar{Q}_э = \int_0^{\theta} R(Q_{t-\tau}, \tau)d\tau$, $q_{эt} = \sum_{t=0}^{\theta} P\left\{q_{t-\tau}, \tau\right\}$, $q_{эt} = \int_0^{\theta} P(q_{t-\tau}, \tau)d\tau$. Рівняння руху системи для дискретного $\Delta\bar{Q}_{эt} = \left[\frac{\partial R}{\partial \bar{Q}_t}\right]_{Q_t=\bar{Q}} \Delta\bar{Q}_t d\tau$, $\Delta Q_{эt} = \int_0^{\theta} \left[\frac{\partial R(\tau)}{\partial \bar{Q}_{t-\tau}}\right]_{Q_{t-\tau}=\bar{Q}} \Delta Q_{э(t-\tau)} d\tau$, величини $\left[\frac{\partial R}{\partial \bar{Q}_t}\right]_{Q_t=\bar{Q}}$,

$\left[\dfrac{\partial R}{\partial \bar{Q}_{t-\tau}}\right]_{Q_{t-\tau}=Q}$ – якобіани, елементи яких мають значення, що відповідають стану рівноваги, звідки маємо таке матричне рівняння руху системи елементів енергетичного тракту такого виду:

$$\begin{bmatrix} 0 & \Delta Q_2^{(1)}, t+\theta & \ldots & \Delta Q_N^{(1)}, t+\theta \\ \Delta Q_1^{(2)}, t+\theta & 0 & \ldots & \Delta Q_N^{(2)}, t+\theta \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ \Delta Q_1^{(N)}, t+\theta & \Delta Q_2^{(N)}, t+\theta & \ldots & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \dfrac{\partial R_{21}}{\partial Q_t^{(2)}} \Delta Q_t^{(2)} & \ldots & \dfrac{\partial R_{N1}}{\partial Q_t^{(N)}} \Delta Q_t^{(N)} \\ \dfrac{\partial R_{12}}{\partial Q_t^{(1)}} \Delta Q_t^{(1)} & 0 & \ldots & \dfrac{\partial R_{N2}}{\partial Q_t^{(N)}} \Delta Q_t^{(N)} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ \dfrac{\partial R_{1N}}{\partial Q_t^{(1)}} \Delta Q_t^{(1)} & \dfrac{\partial R_{2N}}{\partial Q_t^{(2)}} \Delta Q_t^{(2)} & \ldots & 0 \end{bmatrix}, \text{ де}$$

$\Delta Q_{ti}^{(N)}$ – оператор Лапласа, $\left[\dfrac{\partial R_{iN}}{\partial Q_{ti}^{(i)}}\right]$ – оператор Гамільтона. Для одержання умов стійкості руху системи варто досліджувати це векторно-матричне інтегрально-диференціальне рівняння, де замість $\Delta\bar{Q}_t$ слід прийняти $[\bar{K}]\lambda^{t}$ при розв'язанні характеристичного рівняння тобто $[\bar{K}]\lambda^{t+\theta}\left[\dfrac{\partial R}{\partial Q_t}\right]_{Q_t=\bar{Q}}$ $[\bar{K}]\lambda^{t}$. ($[\bar{K}]$ – матричний вектор власних чисел матриці руху системи).

Для ненульового вектора $\bar{K}$ повинна виконуватися умова $\left|\left[\dfrac{\partial R}{\partial Q_t}\right]_{Q_t=\bar{Q}} \lambda^{-\theta} - I\right| = 0$ (I–одинична матриця). Аналогічно $[\bar{K}]\lambda^{t} = \sum\limits_{t=0}^{\theta}\left[\dfrac{\partial R(\tau)}{\partial Q_{t-\tau}}\right]_{Q_{t-\tau}=\bar{Q}} [\bar{K}]\lambda^{t+\theta}$, звідки характеристичне рівняння $\left|\int\limits_0^{\theta}\left[\dfrac{\partial R(\tau)}{\partial Q_{t-\tau}}\right]_{Q_{t-\tau}=\bar{Q}} \lambda^{-\tau}d\tau - I\right| = 0$, звідки вектори $\Delta\bar{Q}_t$ й ΔQ_{t+1} інтерпретуються як квазідіагональні множенням обох частин характеристичного рівняння на транспоновану матрицю власних рухів, тобто будемо мати: $[\Delta Q_{t+1}]^T \Delta Q_{t+1} = \left\{\left[\dfrac{\partial R}{\partial Q_t}\right]_{Q_t=\bar{Q}} \Delta Q_t\right\}^T \left[\dfrac{\partial R}{\partial Q_t}\right]_{Q_t=\bar{Q}} \Delta Q_t$ або це рівняння подається у вигляді $[\Delta Q_{t+1}]^T \Delta Q_{t+1} = [\Delta Q_t]^T \left[\dfrac{\partial R}{\partial Q_t}\right]^T \left[\dfrac{\partial R}{\partial Q_t}\right]_{Q_t=\bar{Q}} [\bar{K}]\lambda^{2t}$, або вважаючи, що $\Delta\bar{Q}_t = [\bar{K}]\lambda^{t}$, одержуємо $[\bar{K}]^T [\bar{K}]\lambda^{2(t+1)} = [\bar{K}]^T \Delta\Gamma(Q, t)[K]\lambda^{2t}$ ($\Delta\Gamma(Q, t) = \left[\dfrac{\partial R}{\partial Q_t}\right]^T \left[\dfrac{\partial R}{\partial Q_t}\right]_{Q_t=\bar{Q}}$ – оператор Гаусса у вигляді симетричної матриці). Стійкість руху системи визначається коренями матриці характеристичного рівняння ($\Delta\Gamma(Q, t)$-I=0. Вплив, що компенсує, у вигляді альтернативних джерел енергії (порошкового вугілля й інше) буде визначатися розв'язанням транспонованого матричного рівняння

$$\left[\Delta Q_t\right]^T\left[\Delta Q_t\right] = \left\{\sum_{\tau=0}^{\theta}\left[\frac{\partial R(\tau)}{\partial Q_{t-\tau}}\right]_{Q_{t-\tau}=\hat{Q}}\Delta Q_{t-\tau}\right\}^T\left\{\sum_{\tau=0}^{\theta}\left[\frac{\partial R(\tau)}{\partial Q_{t-\tau}}\right]_{Q_{t-\tau}=\hat{Q}}\Delta Q_{t-\tau}\right\} = \sum_{\tau=0}^{\theta}\left[\Delta Q_{t-\tau}\right]^T\left[\frac{\partial R(\tau)}{\partial Q_{t-\tau}}\right]^T_{Q_{t-\tau}=\hat{Q}}$$

$\sum_{\tau=0}^{\theta}\left[\frac{\partial R(\tau)}{\partial Q_{t-\tau}}\right]_{Q_{t-\tau}=\hat{Q}}\Delta Q_{t-\tau}$ або прийнявши $\Delta\vec{Q}_t = \left[\vec{K}\right]\lambda^t$, одержимо $\left[\vec{K}\right]^T\left[\vec{K}\right]\lambda^{2t} = \left[\vec{K}\right]^T$

$\sum_{\tau=0}^{\theta}\lambda^{t-\tau}\left[\frac{\partial R(\tau)}{\partial Q_{t-\tau}}\right]_{Q_{t-\tau}=\hat{Q}}\sum_{\tau=0}^{\theta}\left[\frac{\partial R(\tau)}{\partial Q_{t-\tau}}\right]_{Q_{t-\tau}=\hat{Q}}\left[\vec{K}\right]\lambda^{t-\tau}$. Цьому рівнянню буде відповідати рівняння власних рухів системи вигляду: $\left|\left\{\sum_{\tau=0}^{\theta}\lambda^{-\tau}\left[\frac{\partial R(\tau)}{\partial Q_{t-\tau}}\right]^T\sum_{\tau=0}^{\theta}\left[\frac{\partial R(\tau)}{\partial Q_{t-\tau}}\right]\lambda^{-\tau}\right\}^T_{Q_{t-\tau}=\hat{Q}} - I\right| = 0$. Знаки коренів цього рівняння, як і раніше, будуть визначатися властивостями $\left\{\sum_{\tau=0}^{\theta}\left[\frac{\partial R(\tau)}{\partial Q_{t-\tau}}\right]^T\sum_{\tau=0}^{\theta}\left[\frac{\partial R(\tau)}{\partial Q_{t-\tau}}\right]_{Q_{t-\tau}=\hat{Q}} - I\right\}$; $\left\{\int_0^{\theta}\left[\frac{\partial R(\tau)}{\partial Q_{t-\tau}}\right]^T d\tau\int_0^{\theta}\left[\frac{\partial R(\tau)}{\partial Q_{t-\tau}}\right]_{Q_{t-\tau}} d\tau - I\right\}$. Регулююче керування $\Delta Q_{t+\theta} = \left[\frac{\partial R}{\partial Q_t}\right]_{Q_t=\hat{Q}_z}\Delta Q_t$, $\Delta Q_t = \sum_{\tau=0}^{\theta}\left[\frac{\partial R(\tau)}{\partial Q_{t-\tau}}\right]_{Q_{t-\tau}=\hat{Q}_{z-\tau}}\Delta Q_{t-\tau}$, $\Delta Q_t = \int_0^{\theta}\left[\frac{\partial R(\tau)}{\partial Q_{t-\tau}}\right]_{Q_{t-\tau}=\hat{Q}_{z-\tau}}\Delta Q_{t-\tau}d\tau$. Зазначені рівняння повинні мати властивості ергодичності, для чого повинен бути негативним характер матриці $\left[\frac{\partial R(\tau)}{\partial Q_t}\right]^T\left[\frac{\partial R(\tau)}{\partial Q_t}\right]_{Q_t=\hat{Q}_z}$-I; $\sum_{\tau=0}^{\theta}\left[\frac{\partial R(\tau)}{\partial Q_{t-\tau}}\right]^T$

$\sum_{\tau=0}^{\theta}\left[\frac{\partial R(\tau)}{\partial Q_{t-\tau}}\right]_{Q_{t-\tau}=\hat{Q}_{z-\tau}} - I$; $\int_0^{\theta}\left[\frac{\partial R(\tau)}{\partial Q_{t-\tau}}\right]^T d\tau\int_0^{\theta}\left[\frac{\partial R(\tau)}{\partial Q_{t-\tau}}\right]_{Q_{t-\tau}=\hat{Q}_{z-\tau}} d\tau$ - I. Якщо виконуються ці умови, то маємо ергодичний процес, що розвивається, и ex definitione $\Delta\hat{Q}_t$ (чи $\Delta\hat{q}_{эt}$) які будуть визначати межі ергодичності і для "великих" збурювань будемо мати: $\Delta Q_{t+\theta} = \left[\frac{\partial R}{\partial Q_t}\right]_{Q_t=\hat{Q}_z}\Delta Q_t + \Phi(\Delta Q_t)$; $\Delta Q_t = \sum_{\tau=0}^{\theta}\left[\frac{\partial R(\tau)}{\partial Q_{t-\tau}}\right]_{Q_{t-\tau}=\hat{Q}_{z-\tau}}\Delta Q_{t-\tau} + \sum_{\tau=0}^{\theta}\Phi(\Delta Q_{t-\tau})$;

$\Delta Q_t = \int_0^{\theta}\left[\frac{\partial R(\tau)}{\partial Q_t}\right]_{Q_t=\hat{Q}_{z-\tau}}\Delta Q_{t-\tau}d\tau + \int_0^{\theta}\Phi(\Delta Q_{t-\tau})d\tau$. Тут $\Phi(\Delta Q_t) = \frac{1}{2}\left[\frac{\partial^2 R}{\partial Q_t^2}\right]_{Q_t=\hat{Q}}(\Delta Q_t)^2$ чи

$$\Delta Q_t)=\frac{1}{2}\sum_{\tau=0}^{\theta}\left[\frac{\partial^2 R(\tau)}{\partial Q^2_{t-\tau}}\right]_{Q_{t-\tau}=\bar{Q}_{t-\tau}}(\Delta Q_{t-\tau})^2;\ \Phi(\Delta Q_t)=\frac{1}{2}\int_0^{\theta}\left[\frac{\partial^2 R(\tau)}{\partial Q^2_{t-\tau}}\right]_{Q_{t-\tau}=\bar{Q}_{t-\tau}}(\Delta Q_{t-\tau})^2 d\tau$$, тобто

функції $\Phi(\Delta Q_t)$ чи $\Phi(\Delta Q_{t-\tau})$ для часових функцій розподілу і перетворення енергетичних потоків у технологічну теплоту плавлення металу буде другим членом розкладання Тейлора й у такому разі може бути представлений через варіації стохастично взаємонезалежних величин енергетичних потоків теплоенергетичного потоку: $M(\Delta Q_i)=\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial Q_i}{\partial q_i}\right)_o M(\Delta Q_i)$ і $\sigma^2(\Delta Q)=\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial Q_i}{\partial q_i}\right)_o \sigma^2(\Delta q_{эi})$ (M, σ^2 – математичне чекання і дис-персія). Частинна похідна $\frac{\partial Q_i}{\partial q_i}$ на підставі інваріантності форми повного диференціала першого порядку $\frac{\partial Q_i}{\partial q_i}=\frac{\partial Q_i}{\partial q_1}\frac{\partial q_1}{\partial Q_i}+\ldots+\frac{\partial Q_i}{\partial q_j}\frac{\partial q_j}{\partial Q_i}+\ldots+\frac{\partial Q_i}{\partial q_m}\frac{\partial q_m}{\partial Q_i}$, від виразу математичного чекання

$$M(\Delta Q_i)\text{і}\,\sigma^2(q_i):M(\Delta Q_i)=\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial Q_i}{\partial q_1}\frac{\partial q_1}{\partial Q_n}+\ldots+\frac{\partial Q_i}{\partial q_m}\frac{\partial q_m}{\partial Q_n}\right)M(\Delta q_i)=\sum_{j=1}^{m}\left[\frac{\partial Q_n}{\partial q_j}\sum_{i=1}^{n}\frac{\partial q_j}{\partial Q_n}M(\Delta q_i)\right];$$

$$\sigma^2(Q_n)=\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial Q_n}{\partial q_j}\right)^2\left[\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial q_j}{\partial Q_i}\right)^2\sigma^2(\Delta q_i)+2\sum_{i<\ell}^{\ell}\left(\frac{\partial q_j}{\partial Q_i}\frac{\partial q_j}{\partial Q_\ell}\right)r_{i\ell}\sigma(\Delta q_i)\sigma(\Delta q_\ell)\right]+$$

$$+2\sum_{j<k}^{k}\left\{\left(\frac{\partial Q_n}{\partial q_j}\frac{\partial Q_j}{\partial q_k}\right)\left[\left(\frac{\partial q_j}{\partial Q_i}\frac{\partial q_k}{\partial Q_i}\right)\sigma^2(\Delta q_i)+\sum_{i<\ell}^{\ell}\left(\frac{\partial q_j}{\partial Q_i}\frac{\partial q_k}{\partial Q_\ell}+\frac{\partial q_k}{\partial Q_i}\frac{\partial q_j}{\partial Q_\ell}\right)r_{i\ell}\sigma(\Delta Q_i)\sigma(\Delta Q_\ell)\right]\right\}$$

(r_{ij}, $r_{i\ell}$ – коефіцієнти кореляції).

Аналіз власних і синтез керуючих рухів системи енергозбереження забезпечує задані дисперсійні параметри системи: $\sigma^2(\Delta Q_i)=$

$$=\sum_{j=1}^{m}\left(\frac{\partial Q_n}{\partial q_j}\right)^2\left[\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial q_j}{\partial Q_i}\right)^2\sigma^2(\Delta Q_i)\right]+2\sum_{i=1}^{n}\sum_{j<k}^{j}\left(\frac{\partial Q_n}{\partial q_j}\frac{\partial Q_n}{\partial q_k}\right)\left(\frac{\partial q_j}{\partial Q_i}\frac{\partial q_k}{\partial Q_i}\right).\quad \sigma^2(\Delta Q_i)+$$

$$2\sum_{i=\ell}^{\ell}\sum_{j<l}^{m}\left(\frac{\partial Q_n}{\partial q_j}\right)^2\left(\frac{\partial q_j}{\partial Q_i}\frac{\partial q_j}{\partial Q_\ell}\right)r_{i\ell}\sigma(\Delta Q_i)\sigma(\Delta Q_\ell)+2\sum_{i=\ell}^{\ell}\sum_{j\le k}^{k}\left(\frac{\partial Q_n}{\partial q_j}\frac{\partial Q_n}{\partial q_k}\right)\left(\frac{\partial q_j}{\partial Q_i}\frac{\partial q_k}{\partial Q_\ell}+\frac{\partial q_k}{\partial Q_i}\frac{\partial q_j}{\partial Q_\ell}\right)$$

$r_{i\ell}\sigma(\Delta Q_i)\sigma(\Delta Q_\ell)$.

Ця функція є функціональним рівнянням зв'язку між функціонально пов'язаними параметрами енергетичних потоків $\vec{Q}_t$ і енергетичної ефективності q_i (кВт год/т), звідки випливає гессіан системи, що визначає співвідношення перевірки оптимальності алгоритму за енергозбереженням й умовами його фізичної реалізації при $q^{(1)}_{эт}=\bar{q}^{(1)}_э$, $q^{(2)}_{эт}=\bar{q}^{(2)}_э$,

$$M_{q_э} = \begin{bmatrix} -1 & \frac{\partial R_{21}}{\partial Q_n^{(2)}} & \frac{\partial R_{31}}{\partial Q_n^{(3)}} & \frac{\partial R_{41}}{\partial Q_n^{(4)}} & \frac{\partial R_{51}}{\partial Q_n^{(5)}} & \frac{\partial R_{61}}{\partial Q_n^{(6)}} \\ \frac{\partial R_{12}}{\partial Q_n^{(1)}} & -1 & \frac{\partial R_{32}}{\partial Q_n^{(3)}} & \frac{\partial R_{42}}{\partial Q_n^{(4)}} & \frac{\partial R_{52}}{\partial Q_n^{(5)}} & \frac{\partial R_{62}}{\partial Q_n^{(6)}} \\ \frac{\partial R_{13}}{\partial Q_n^{(1)}} & \frac{\partial R_{23}}{\partial Q_n^{(2)}} & -1 & \frac{\partial R_{43}}{\partial Q_n^{(4)}} & \frac{\partial R_{53}}{\partial Q_n^{(5)}} & \frac{\partial R_{63}}{\partial Q_n^{(6)}} \\ \frac{\partial R_{14}}{\partial Q_n^{(1)}} & \frac{\partial R_{24}}{\partial Q_n^{(2)}} & \frac{\partial R_{34}}{\partial Q_n^{(3)}} & -1 & \frac{\partial R_{54}}{\partial Q_n^{(5)}} & \frac{\partial R_{64}}{\partial Q_n^{(6)}} \\ \frac{\partial R_{15}}{\partial Q_n^{(1)}} & \frac{\partial R_{25}}{\partial Q_n^{(2)}} & \frac{\partial R_{35}}{\partial Q_n^{(3)}} & \frac{\partial R_{45}}{\partial Q_n^{(4)}} & -1 & \frac{\partial R_{65}}{\partial Q_n^{(6)}} \\ \frac{\partial R_{16}}{\partial Q_n^{(1)}} & \frac{\partial R_{26}}{\partial Q_n^{(2)}} & \frac{\partial R_{36}}{\partial Q_n^{(3)}} & \frac{\partial R_{46}}{\partial Q_n^{(4)}} & \frac{\partial R_{56}}{\partial Q_n^{(5)}} & -1 \end{bmatrix} < 0$$

$q_{эt}^{(3)} = \hat{q}_э^{(3)}$, $q_{эt}^{(4)} = \hat{q}_э^{(4)}$, $q_{эt}^{(5)} = \hat{q}_э^{(5)}$, $q_{эt}^{(6)} = \hat{q}_э^{(6)}$; значення $\hat{q}_э$ – нормативні значення енергоспоживання, кВт год/т "придатного" (в еквіваленті електричної енергії).

На закінчення слід зазначити, що матриця $\left[M_{q_э}\right] = f(\bar{Q}_{эп})$ обчислена для таких функціональних залежностей потоків енергії в плавильному просторі дугової печі: $Q_{э1}$ – електричної енергії, $Q_{э2}$ – стінових ТКГ, $Q_{э3}$ – віконних ТКГ, $Q_{э4}$ – елементів розкислення, $Q_{э5}$ – елементів дегазації, дефосфорації, десульфурації, деазотизації й ін., $Q_{э6}$ – рафінування при обліку утилізації вторинного тепла, регульованого відсмоктування, керованого горіння електричної дуги, нагрівання шихти в каналі утилізації вторинного тепла й інше елементів технології плавлення металів вищого рівня. З гессіана $M_{q_э}$ маємо вираз для обчислення коренів λ_i з урахуванням того, що всі наддіагональні коефіцієнти мають множник λ^{-1}, тобто другий детермінант, що доповнює, має вигляд: $\begin{bmatrix} -1 & \frac{\partial R_{21}}{\partial Q_n^{(2)}}\lambda^{-1} \\ \frac{\partial R_{12}}{\partial Q_n^{(1)}}\lambda^{-1} & -1 \end{bmatrix} = 0$, або помноживши його на λ^2, будемо мати: $\begin{bmatrix} -\lambda & \frac{\partial R_{21}}{\partial Q_n^{(2)}} \\ \frac{\partial R_{12}}{\partial Q_n^{(1)}} & -\lambda \end{bmatrix} = 0$; для $Q_n^{(1)} = \hat{Q}_э^{(1)}$; $Q_n^{(2)} = \hat{Q}_э^{(2)}$, звідки маємо два корені такого вигляду $\lambda_1 = \sqrt{\frac{\partial R_{12}}{\partial Q_n^{(1)}}\frac{\partial R_{21}}{\partial Q_n^{(2)}}}$; $\lambda_2 = -\sqrt{\frac{\partial R_{12}}{\partial Q_n^{(1)}}\frac{\partial R_{21}}{\partial Q_n^{(2)}}}$ при [$Q_n^{(1)} = \hat{Q}_э^{(1)}$; $Q_n^{(2)} = \hat{Q}_э^{(2)}$]. Значення коренів λ_1, λ_2 визначають умови необхідності і достатності умови монотонної зміни відхилення від точки (моменту часу) прикладення збурювання $\left|\frac{\partial R_{12}}{\partial Q_n^{(1)}}\frac{\partial R_{21}}{\partial Q_n^{(2)}}\right| < 1$ ($Q_{эt}^{(1)} = \hat{Q}_{эt}^{(1)}$; $Q_{эt}^{(2)} = \hat{Q}_{эt}^{(2)}$), тобто повинен бути реалізованим принцип термодинаміки Ле Шательє. Розв'язання другого детермінанта, що доповнює, тобто умова Ле Шательє, може бути подана у такому вигляді $\left|\frac{\partial R_{21}}{\partial Q_n^{(2)}}\right| < \left(\left|\frac{\partial R_{12}}{\partial Q_n^{(1)}}\right|\right)^{-1}$ ($Q_{эt}^{(1)} = \hat{Q}_{эt}^{(1)}$, $Q_{эt}^{(2)} = \hat{Q}_{эt}^{(2)}$). Ця умова є визначальною для побудови системи регулювання координат енергозбереження у вигляді замкнутої системи з реалізацією компенсації флуктуацій за каналом негативного зворотного зв'язку.