

описує статистически детермінованою моделлю. Реалізована модель примієна для автоматизованого управління широким класом періодических і полунепреривних (в смислі марковеских) процесов пускa, останова і перехоа с одного режима плавлення на другої при зменненні шихти і технології плавки чистих, особо чистих і прецизійних сталей і сплавов.

УДК 631. 365

**В.Г. Турковський, Ю.М. Жовнір**

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра електропостачання промислових підприємств, міст та сільського господарства

## **АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У ДУГОВІЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНІЙ ПЕЧІ З УСТАНОВКОЮ СТАБІЛІЗАЦІЇ РЕЖИМУ**

© Турковський В.Г., Жовнір Ю.М., 2004

**Наведено рівняння для дослідження періодических процесів у нелінійній схемі установки стабілізації режиму дугової сталеплавильної печі, отримані аналітичним методом.**

**Equation for research periodic proceses in nonlinear shems the arc-furnace steel-melting of installation stabilization of mode presenting the analitical metod to get.**

**Постановка проблеми.** Робота дугових сталеплавильних печей змінного струму (ДСП) за традиційної системи електропостачання спричиняє появу коливань струмів фаз, наслідком яких є зменшення корисної потужності, що вводиться в піч, збільшення втрат електроенергії в елементах електропостачальної системи (ЕПС), а також тривалості плавки й відповідно теплових втрат. Коливання струмів печі також обумовлюють появу коливань напруги мережі, які можуть перевищувати допустимі рівні й, у свою чергу, негативно впливати на ефективність паралельно працюючих електроприймачів [1].

Одним з перспективних напрямків до комплексного вирішення проблем енергоощадності та електромагнітної сумісності електропостачання ДСП є застосування установки стабілізації режиму (УСР) на базі індуктивно-емісного перетворювача джерела напруги в джерело струму, яка вмикається між джерелом живлення й власне пічною електроустановкою [2, 3].

**Аналіз останніх досліджень.** Наявність в ЕПС печі УСР, за певних умов (зокрема після увімкнення на неробочий хід), може спричинити появу ферорезонансних явищ на гармоніках основної частоти джерела живлення, ультрагармоніках та субгармоніках, що обумовлено нелінійністю характеристик трансформатора і дроселя. Як показав огляд літературних джерел, узагальнені дослідження таких явищ в ЕПС дугової сталеплавильної печі з УСР проведені недостатньо.

**Задачі досліджень.** Дослідження періодичного режиму неробочого ходу УСР на базі узагальнених методів аналізу нелінійних кіл.

**Виклад основного матеріалу.** Аналіз електромагнітних процесів ЕПС ДСП з УСР в режимі неробочого ходу можна здійснити, вивчаючи одну фазу електропічного контуру [1], заступна схема якого показана на рис. 1.

На рис. 1 показано індуктивність  $L$  стабілізуючого реактора та ємність  $C$  конденсаторної батареї установки стабілізації струму;  $e_L$ ,  $e_C$  – електрорушійні сили, що діють відповідно в контурі зі стабілізуючим реактором та конденсаторною батареєю;  $R_L$ ,  $R_C$  – резистанси стабілізуючого реактора та конденсаторної батареї; індуктивність розсіяння  $L_T$  та резистанс  $R_T$  первинної обмотки пічного трансформатора і вітка намагнічення з вебер-амперною характеристикою (рис. 2).

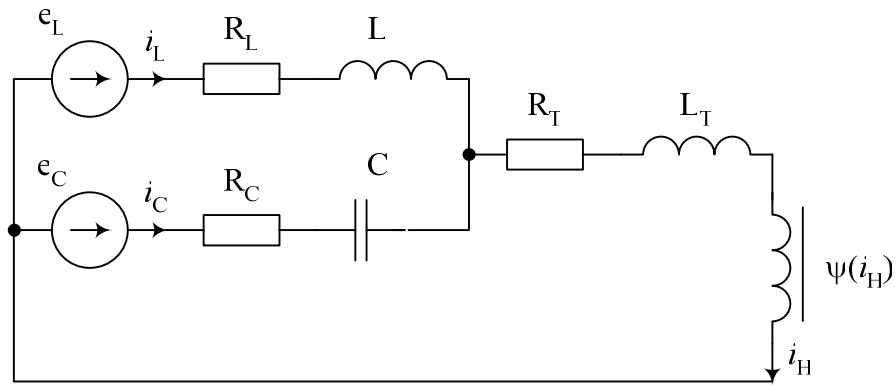


Рис. 1. Заступна схема ДСП з установкою стабілізації режиму

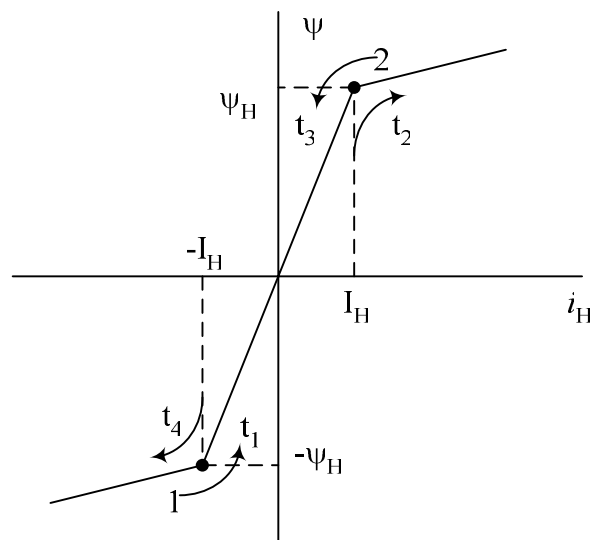


Рис. 2. Апроксимація вебер-амперної характеристики вітки намагнічення трансформатора

Матрично-векторне рівняння, що описує електромагнітні процеси у наведеній вище схемі, матиме вигляд

$$\tilde{A} \frac{d\tilde{y}}{dt} + B\tilde{y} = \tilde{f}(t), \quad (1)$$

де

$$\tilde{A} = \begin{vmatrix} -(L_T + L\mu(in)) & 0 & 0 \\ 0 & -L & 0 \\ 0 & 0 & C \end{vmatrix}; \quad \tilde{B} = \begin{vmatrix} (R_C - R_T) & -R_C & -1 \\ -R_C & (R_C - R_L) & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{vmatrix}$$

$$\tilde{y} = (i_H, i_L, u_C)_t; \quad \tilde{f}(t) = (-e_C; e_C - e_L; 0)_t;$$

$L_\mu(i_H)$  – диференціальна індуктивність трансформатора.

За кусково-лінійної апроксимації вебер-амперної характеристики вітки намагнічення (рис. 2) трансформатора для розв'язання системи (1) можна використати метод спряження інтервалів [4]. Згідно з цим методом, задаючись типом періодичного режиму, систему рівнянь (1) можна замінити  $n$ -векторними лінійними диференціальними рівняннями зі сталими коефіцієнтами. Число  $n$  відповідає

кількості переходів робочої точки на вебер-амперній характеристиці за період  $T$  процесу через точки зламу характеристики (на частоті джерела живлення  $n = 4$ ) (рис. 3).

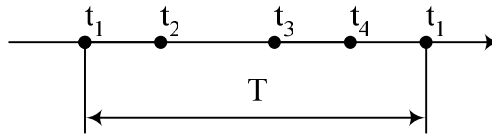


Рис. 3. Послідовність переходів робочої точки вебер-амперної характеристики через злами

Відповідно до цього перейдемо від системи (1) до системи лінеаризованих диференціальних рівнянь

$$\begin{cases} \check{A}_2 \frac{d\check{y}_{41}}{dt} + \check{B}\check{y}_{41} = \check{f}(t); & t_4 < t < t_1 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \check{A}_1 \frac{d\check{y}_{12}}{dt} + \check{B}\check{y}_{12} = \check{f}(t); & t_1 < t < t_2 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \check{A}_2 \frac{d\check{y}_{23}}{dt} + \check{B}\check{y}_{23} = \check{f}(t); & t_2 < t < t_3 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \check{A}_1 \frac{d\check{y}_{34}}{dt} + \check{B}\check{y}_{34} = \check{f}(t); & t_3 < t < t_4 \end{cases} \quad (5)$$

де  $\check{A}_1, \check{A}_2, \check{B}$  – матриця коефіцієнтів диференціальних рівнянь;

$$\check{A}_1 = \begin{vmatrix} -(L_T + a_1) & 0 & 0 \\ 0 & -L & 0 \\ 0 & 0 & C \end{vmatrix}; \quad \check{A}_2 = \begin{vmatrix} -(L_T + a_2) & 0 & 0 \\ 0 & -L & 0 \\ 0 & 0 & C \end{vmatrix}$$

$a_1, a_2$  – відповідно індуктивність трансформатора на робочій частині вебер-амперної характеристики та в зоні насичення;  $\check{y}_{41}, \check{y}_{12}, \check{y}_{23}, \check{y}_{34}$  – вектори невідомих координат режиму на відповідних часових інтервалах періоду  $T$ .

Розв'язки системи рівнянь (2)–(5) матимуть вигляд

$$\check{y}_{41} = \check{y}'_{41} + I_{41} \exp(\check{\lambda}_1 t), \quad (6)$$

$$\check{y}_{12} = \check{y}'_{12} + I_{12} \exp(\check{\lambda}_2 t), \quad (7)$$

$$\check{y}_{23} = \check{y}'_{23} + I_{23} \exp(\check{\lambda}_3 t), \quad (8)$$

$$\check{y}_{34} = \check{y}'_{34} + I_{34} \exp(\check{\lambda}_4 t), \quad (9)$$

де  $\check{y}'_{41}, \check{y}'_{12}, \check{y}'_{23}, \check{y}'_{34}$  – вектори вимушених складових координат режиму, які можуть бути визначені відомими методами аналізу усталених режимів лінійних електричних кіл;  $I_{41}, I_{12}, I_{23}, I_{34}$  – квадратні матриці сталих інтегрування;  $\check{\lambda}_1, \check{\lambda}_2$  – вектори показників експонент, що визначаються з характеристичних рівнянь лінійних однорідних диференціальних рівнянь системи (2)–(5).

Як показав аналіз коренів характеристик рівнянь, визначених для параметрів електромагнітного контуру ДСП з УСР для печей малої, середньої та великої місткостей, серед трьох коренів – один дійсний від'ємний, а два – комплексно-спряжені.

У загальному випадку рівняння (6)–(9) містять 40 невідомих: 36 сталих інтегрування та 4 моменти часу ( $t_1, t_2, t_3, t_4$ ) переходу робочої точки через злами на вебер-амперній характеристиці.

Згідно з методом спряження інтервалів для визначення невідомих у рівняннях (6)–(9) необхідно скласти відповідну кількість рівнянь на підставі умов: комутації, періодичності функції та їх похідних, відомих значень координат режиму в точках зламу вебер-амперної характеристики.

З врахуванням умов комутації за поточкозчепленнями отримаємо

$$\bar{y}_{41}(t_{1-}) = \bar{y}_{12}^*(t_{1+}), \quad (10)$$

$$\bar{y}_{12}(t_{2-}) = \bar{y}_{23}^*(t_{2+}), \quad (11)$$

$$\bar{y}_{23}(t_{3-}) = \bar{y}_{34}^*(t_{3+}), \quad (12)$$

$$\bar{y}_{34}(t_{4-}) = \bar{y}_{41}^*(t_{4+}), \quad (13)$$

де

$$\bar{y}_{12}(t_{1+}) = \bar{k}_1 \bar{y}_{12}^*(t_{1+}), \quad (14)$$

$$\bar{y}_{23}(t_{2+}) = \bar{k}_2 \bar{y}_{23}^*(t_{2+}), \quad (15)$$

$$\bar{y}_{34}(t_{3+}) = \bar{k}_3 \bar{y}_{34}^*(t_{3+}), \quad (16)$$

$$\bar{y}_{41}(t_{4+}) = \bar{k}_4 \bar{y}_{41}^*(t_{4+}), \quad (17)$$

$\bar{k}_1, \bar{k}_2, \bar{k}_3, \bar{k}_4$  – відповідно матриці коефіцієнтів, які забезпечують врахування законів комутації.

На основі умови періодичності функцій координат режиму та їх похідних, отримаємо

$$\bar{y}_{41}(t_1) = \bar{y}_{41}(t_{1+2\pi}), \quad (18)$$

$$\bar{y}_{12}(t_2) = \bar{y}_{12}(t_{2+2\pi}), \quad (19)$$

$$\bar{y}_{23}(t_3) = \bar{y}_{23}(t_{3+2\pi}), \quad (20)$$

$$\bar{y}_{34}(t_4) = \bar{y}_{34}(t_{4+2\pi}), \quad (21)$$

$$\frac{d\bar{y}_{41}}{dt} \Big|_{t=t_1} = \frac{d\bar{y}_{41}}{dt} \Big|_{t=t_{1+2\pi}}, \quad (22)$$

$$\frac{d\bar{y}_{12}}{dt} \Big|_{t=t_2} = \frac{d\bar{y}_{12}}{dt} \Big|_{t=t_{2+2\pi}}, \quad (23)$$

$$\frac{d\bar{y}_{23}}{dt} \Big|_{t=t_3} = \frac{d\bar{y}_{23}}{dt} \Big|_{t=t_{3+2\pi}}, \quad (24)$$

$$\frac{d\bar{y}_{34}}{dt} \Big|_{t=t_4} = \frac{d\bar{y}_{34}}{dt} \Big|_{t=t_{4+2\pi}}. \quad (25)$$

На підставі відомих значень координат у точках зламів характеристики отримаємо рівняння

$$\bar{y}_{L1} = \bar{y}'_{H1} + I_1 \exp(\bar{\lambda}_1 t_1; \bar{\lambda}_2 t_2), \quad (26)$$

$$\bar{y}_{L2} = \bar{y}'_{H2} + I_2 \exp(\bar{\lambda}_1 t_3; \bar{\lambda}_2 t_4), \quad (27)$$

де

$$\bar{y}_{L1} = \begin{vmatrix} -I_H \\ I_H \end{vmatrix}; \quad \bar{y}_{L2} = \begin{vmatrix} I_H \\ -I_H \end{vmatrix}; \quad \bar{y}_{H1} = \begin{vmatrix} i'_{H1} \\ i'_{H2} \end{vmatrix}; \quad \bar{y}_{H2} = \begin{vmatrix} i'_{H1} \\ i'_{H2} \end{vmatrix}$$

$$I_1 = \begin{vmatrix} I_{H11} I_{H12} I_{H13} \\ I_{H21} I_{H22} I_{H23} \end{vmatrix}; \quad I_2 = \begin{vmatrix} I_{H31} I_{H32} I_{H33} \\ I_{H41} I_{H42} I_{H43} \end{vmatrix}, \quad (28)$$

матриці сталих інтегрування струмів пічного трансформатора на відповідних часових інтервалах.

Отримано 40 рівнянь для визначення невідомих системи (2)–(5).

Система рівнянь (10)–(28) є трансцендентною відносно невідомих  $t_1, t_2, t_3, t_4$ . Для її розв'язання використаємо числові методи розв'язання систем нелінійних алгебричних рівнянь [5].

Задаючись нульовим наближенням вектора невідомих моментів часу  $\vec{t}^{(0)}$ , отримаємо на основі рівнянь (10)–(21), лінійне векторне рівняння

$$\vec{G}^{(0)} \vec{D}^{(0)} + \vec{K}^{(0)} = 0, \quad (29)$$

де  $\tilde{G}^{(0)}$  – матриця нульових наближень коефіцієнтів системи;  $\tilde{D}^{(0)}$  – вектор-стовпець нульових наближень невідомих сталих інтегрування;  $\tilde{K}^{(0)}$  – вектор-стовпець нульових наближень вільних членів.

Перше наближення вектора невідомих  $\tilde{t}$ :

$$\tilde{t}^{(1)} = \tilde{t}^{(0)} + \tilde{C}\tilde{F}(\tilde{t}^{(0)}) \quad (30)$$

де

$$\tilde{C} = -\left(\frac{d\tilde{f}(t)}{d\tilde{t}}\right)_{\tilde{t}^{(0)}}^{-1} = -(\tilde{W}(\tilde{t}^{(0)}))^{-1},$$

$\tilde{W}$  – матриця Якобі системи рівнянь (26)–(27);

$$\tilde{F}(t) = \begin{bmatrix} I_1 \exp(\lambda_1 \tilde{t}_1, \lambda_2 \tilde{t}_2) + \tilde{y}'_{H1} - \tilde{y}_{L1} \\ I_2 \exp(\lambda_1 \tilde{t}_3, \lambda_2 \tilde{t}_4) + \tilde{y}'_{H2} - \tilde{y}_{L2} \end{bmatrix}.$$

k-те наближення вектора-невідомих:

$$\begin{cases} \tilde{t}^{(k+1)} = \tilde{t}^{(k)} + \tilde{C}\tilde{F}(\tilde{t}^{(k)}) \\ \tilde{G}^{(k)}\tilde{D}^{(k)} + \tilde{K}^{(k)} = 0 \end{cases} \quad (31)$$

визначивши які, отримаємо розв'язок системи рівнянь (1).

Числові результати отримано з використанням прикладного програмного пакета Mathcad 2000.

**Висновки.** 1. Отримано аналітичним методом періодичний розв'язок системи нелінійних рівнянь третього порядку, що описує процеси у режимі неробочого ходу схеми УСР з ДСП.

Розроблено алгоритм визначення коефіцієнтів рівнянь розв'язку вказаної системи диференціальних рівнянь.

1. Влияние дуговых электродов на систему электроснабжения / Под ред. М.А. Смелянского, Р.В. Минеева. – М.: Энергия, 1975. – 246 с. 2. Волков И.В., Губаревич В.Н., Исаков В.Н., Кабан В.П. Принципы построения и оптимизации схем индуктивно-ёмкостных преобразователей. – К.: Наук. думка, 1981. – 176 с. 3. Турковский В.Г., Жовнир Ю.М. Обоснование эффективности применения установки стабилизации режима в системе электроснабжения дуговых сталеплавильных печей переменного тока // Промышленная энергетика. – 2001. – № 5. – С. 11–18. 4. Лисицкая И.Н., Синицкий Л.А., Шумков Ю.М. Анализ электрических цепей с магнитными и полупроводниковыми элементами. – К.: Наукова думка, 1969. – 356 с. 5. Математичні задачі електроенергетики / В.С. Перхач. – 3-е вид., перероб. та доп. – Львів: Вища школа. Вид-во при Львів. ун-ті, 1989. – 464 с.