

слід обчислювати, виходячи з кількості замкнених витків, місця їхнього розташування та геометричних розмірів обвиток [7]. За допомогою схем симетричних послідовностей можна одержати вирази для обчислення струму у гілці, що утворила замикання, а також оцінити вплив схеми з'єднання обвиток і виконання агрегату на його значення.

1. Засыпкин А.С. Релейная защита трансформаторов. – М., 1989. 2. Букович Н.В. Розрахунок струмів короткого замикання електроенергетичних систем / За ред. Г.І. Денисенка. 1988. 3. Чечушков Г.А., Гаген А.Ф. Витковые замыкания в трансформаторах и их схемы замещения // Автоматизация энергосистем и энергоустановок пром. предпр. – Челябинск, 1974. – № 141. – С. 36–42. 4. Урманов Р.Н., Павлов И.Ф. Особенности последовательной работы трансформаторов и расчет режимов // Электричество. – 1961. – № 11. – С. 29–35. 5. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы. – М., 1970. 6. Гончарук А. И. Расчет и конструирование трансформаторов. – М., 1990. 7. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивности: Справ. книга. – Л., 1986.

УДК 621.365.2

О.Ю. Лозинський, Я.С. Паранчук, А.О. Лозинський
Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра ЕАП

ОПТИМІЗАЦІЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ВЗАЄМОЗАЛЕЖНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

© Лозинський О.Ю., Паранчук Я.С., Лозинський А.О., 2001

Пропонується структура системи оптимального керування електричним режимом дугової сталеплавильної печі (ДСП) за критерієм мінімуму дисперсії струмів дуг, що враховує взаємні впливи між фазами печі. Описано метод синтезу системи керування, в основу якого покладено генетичний алгоритм. Наведено результати математичного моделювання електричних режимів ДСП для традиційної і запропонованої систем керування.

The structure of a system of optimal control of an electrical condition of arc steel melting furnace (ASMF) behind the criterion of a minimum of the arcs currents variance, that take into account the cross effect between phases, is proposed. The method of synthesis of a control system, in which basis lays the application of genetic algorithm, is described. The simulation results of an electrical regimes of arc steel melting furnace with traditional and proposed control systems are given.

Для взаємозалежних електромеханічних систем здебільшого виникають труднощі при формуванні вектора керування, який би враховував всю складність зв'язків між координатами системи і тому під час синтезу систем керування такі взаємні впливи як правило не враховуються, тобто система з багатьма входами і виходами розглядається як декілька систем з окремими входом і виходом. Внаслідок такого підходу істотно знижується якість керування, через формування помилкових керуючих впливів, що спровоковані взаємовпливом координат стану системи.

Типовими представниками взаємозв'язаних систем з неконвенційними навантаженнями є системи живлення та регулювання режимів дуг дугових сталеплавильних печей. Так, керуючий сигнал для регулятора режиму дугової сталеплавильної печі (ДСП) традиційно формується за середньовипрямленими значеннями напруги і струму фази. Сформований сигнал керування задає необхідну зміну положення електрода, що своєю чергою спричинює зміну миттєвих значень згаданих напруг і струмів. Ще одним фактором, який зумовлює зміну миттєвих значень напруги і струму дуги є дія збурень. Беручи до уваги той факт, що ми маємо справу з трифазним електричним колом зі значними нелінійностями і випадковим характером зміни параметрів системи, на існуючих одновимірних детермінованих моделях, неможливо визначити приріст струму в одній з фаз, зумовлений збурюючим чи керуючим впливом, перерозподілиться по інших фазах. У такому випадку стає проблематичною задача формування функціоналу якості системи в традиційному, зокрема з погляду аналітичного конструювання регуляторів, вигляді і на основі цього функціоналу синтез параметрів регулятора з врахуванням взаємних впливів. Електромеханічна система керування режимом ДСП, яка побудована за принципом неврахування взаємозв'язків між координатами окремих фаз показана на рис. 1, де сигналом що формує переміщення електрода в i -й фазі є розузгодження, яке визначається напругою та струмом дуги цієї фази

$$u_{\text{розузг}} = k_i \cdot I - k_u \cdot U.$$

У такій системі збурення в одній з фаз спричинить появу сигналу на переміщення електродів в інших фазах (формування помилкових керуючих впливів, що спровоковані взаємовпливом координат стану системи). Отже, порушується електричний режим плавки за рахунок непотрібних реакцій системи регулювання саме у тих фазах, де немає збурень.

Зрозуміло, що якість роботи системи в умовах збурень, які слідує з великою частотою, залежить від її швидкодії. Потреба у великій швидкодії системи регулювання режиму ДСП витікає з необхідності знизити витрати електроенергії і час плавки за рахунок оптимізації введення енергії в піч. Для того, щоб забезпечити високу швидкодію електромеханічного контуру регулювання, регулятор повинен мати мале запізнення і інерційність, а також великий коефіцієнт підсилення. Проте, ці класичні звичайні поняття, які використовують для характеристики динамічних систем, що знаходяться під дією детермінованих збурень, в умовах випадкових збурень втрачають зміст, через неадекватність реакції системи на кожне із збурень, що слідує з високою частотою. Тому в таких умовах може йти не про формування реакцій на окреме збурення, а про якусь інтегральну характеристику взаємодії керуючих впливів регулятора і збурень в об'єкті. Такою найкращою характеристикою, яка визначається кількістю і значенням відхилень від заданого режиму на якомусь інтервалі плавки, як зазначено в роботі [1], є дисперсія регульованої координати. Дисперсія такої режимної координати, як струм дуги значною мірою впливає на втрати в короткій мережі, а це, в свою чергою, призводить до впливу дисперсії на техніко-

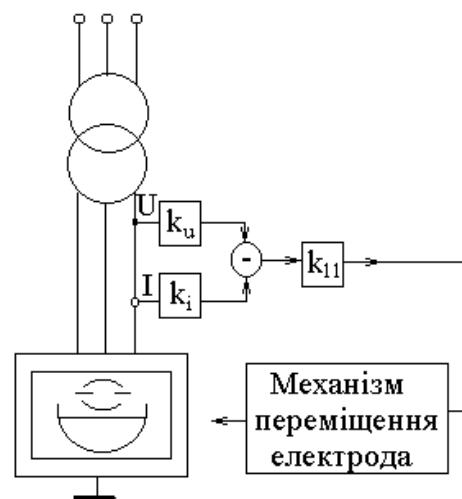


Рис. 1. Традиційна система керування електричним режимом ДСП (для однієї фази)

економічні показники роботи ДСП, такі як питомі витрати електроенергії, продуктивність печі, а також загальний – собівартість однієї тонни сталі. Враховуючи наведене, оптимізація системи автоматичного регулювання електричного режиму ДСП повинна проводитися з орієнтацією на цю інтегральну характеристику регулювання координат. Тому критерієм якості такої системи керування повинен бути інтегральний квадратичний функціонал вигляду

$$Q = \int_0^T \sum_{i=1}^3 \lambda_i (I_{дi} - I_{дiзад})^2 dt \rightarrow \min, \quad (1)$$

де λ_i – коефіцієнти ваги відхилень даної фази; $I_{дiзад}$ – задане значення струму дуги.

Числове значення такого функціоналу можна ідентифікувати дисперсією тривимірного вектора випадкових відхилень струмів дуг, що визначається як

$$D = \det(R), \quad \text{де } R = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{pmatrix} - \text{кореляційна матриця струмів фаз.}$$

У роботі [2] вперше розроблено засади формування керуючого впливу для електромеханічної системи переміщення електродів з врахуванням ситуації в інших фазах. Запропонований метод базується на представленні моделі ДСП у вигляді сукупності трьох однофазних моделей, кожна з яких містить одну фазу кола живлення ДСП і електромеханічний контур регулювання. Вихідними координати створеної моделі є середньовипрямлені струми дуг

$$\begin{aligned} (I_{дA} - \bar{I}_{дA}) &= (I_A - \bar{I}_A) + \alpha_1 \cdot (I_{дВ} - \bar{I}_{дВ}) + \beta_1 \cdot (I_{дC} - \bar{I}_{дC}); \\ (I_{дВ} - \bar{I}_{дВ}) &= (I_B - \bar{I}_B) + \alpha_2 \cdot (I_{дA} - \bar{I}_{дA}) + \beta_2 \cdot (I_{дC} - \bar{I}_{дC}); \\ (I_{дC} - \bar{I}_{дC}) &= (I_C - \bar{I}_C) + \alpha_3 \cdot (I_{дA} - \bar{I}_{дA}) + \beta_3 \cdot (I_{дВ} - \bar{I}_{дВ}), \end{aligned} \quad (2)$$

де $\bar{I}_{дA}$, $\bar{I}_{дВ}$, $\bar{I}_{дC}$ – математичні сподівання середньовипрямлених значень струмів дуг фаз ДСП; \bar{I}_A , \bar{I}_B , \bar{I}_C – математичні сподівання середньовипрямлених струмів фаз моделі, тобто струмів фаз при розімкненій нульовій точці; α_1 , α_2 , α_3 , β_1 , β_2 , β_3 – коефіцієнти зв'язку між приростами струмів окремих фаз. Коефіцієнти зв'язку між цими струмами визначають на основі ймовірнісного аналізу та кореляційних взаємозв'язків процесів у пiчному просторі ДСП [3].

Як показано у роботах [4, 5] реалізація запропонованого підходу дає змогу коригувати керуючі сигнали регуляторів електричного режиму за струмом, внаслідок чого досягається автономність електричного режиму за фазами ДСП, що, в свою чергу, значно підвищує продуктивність електродугової печі.

Але знайдені коефіцієнти передачі за струмами дуг є функціями ймовірнісних характеристик процесів, які постійні тільки в інтервалах стаціонарності, що тривають до 2 хв, тому виникає необхідність їх корекції під час плавки. А це вимагає деякого часу для визначення необхідних ймовірнісних характеристик і упродовж цього часу порушується адекватність системи керування до реальних процесів в ДСП.

Враховуючи наведене, необхідним, на нашу думку, є створення систем керування, які давали би змогу, з урахуванням специфіки процесів у ДСП, формувати сигнал керування, як сигнал інтегрального відхилення координат режиму, що з'являються внаслідок дії

керуючого та збурюючого впливу відповідних фаз, тобто

$$\mathbf{u}_{\text{кер}} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{u}_{\text{розузг}}, \quad (3)$$

де $\mathbf{u}_{\text{кер}}$ – вектор керування; $\mathbf{u}_{\text{розузг}}$ – напруги розузгодження. Для формування керуючого впливу необхідно визначити також і коефіцієнти взаємозв'язку k_{ij} при $i \neq j$. Тоді система переміщення електродів ДСП набуде вигляду рис. 2, тобто система переміщення електродів і дугова піч розглядаються як тривимірний об'єкт, в якому сигнал, що керує переміщенням електрода в кожній фазі адитивно складається із сигналів розузгодження всіх трьох фаз взятих з якимись коефіцієнтами ваги

$$u_{\text{кер}i} = \gamma_1 \cdot u_{\text{р}i} + \gamma_2 \cdot u_{\text{р}j} + \gamma_3 \cdot u_{\text{р}k},$$

де $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ – коефіцієнти матриці (3).

Традиційно мінімізацію вибраного функціоналу якості (1), тобто знаходження необхідних коефіцієнтів, здійснюють за методом знаходження екстремумів функцій багатьох змінних. Як зазначено вище, задача формування аналітичної залежності вибраного критерію якості від коефіцієнтів системи керування є непростю і тому традиційні методи синтезу тут застосовувати неможливо.

Для розв'язування сформульованої задачі доцільним є використання методу генетичного алгоритму [6]. Генетичний алгоритм є методом пошуку, що базується на механізмах природного добору, згідно з яким виживають і дають потомство організми, які мають найвищий ступінь пристосування. Генетичний алгоритм можна визначити як процедуру, що використовує випадковий вибір на попередньому етапі, спрямованому пошуку в закодованій області розв'язків. Від традиційних методів оптимізації цей метод відрізняють такі особливості:

- працює не безпосередньо з параметрами, а з їх представленням у вигляді коду;
- пошук починається і ведеться відразу для цілої області зміни параметрів;
- використовує функцію мети (заданий функціонал) для оцінки пристосованості "хромосоми" і не потребує знаходження похідних;
- застосовує ймовірнісні, а не детерміністичні підходи при проведенні операцій.

Шукані коефіцієнти системи керування необхідно представити у вигляді бінарних ланцюгів, використавши для їх кодування один з відомих алгоритмів.

Для знаходження коефіцієнтів матриці (3) скористаємося математичною моделлю [7], яка описує реакції такого складного об'єкта як ДСП на процеси збурень і керуючих впливів, що переводять режим печі в той чи інший стан. Сформувавши процес збурень, що відповідає тому чи іншому періодові плавки, за допомогою генетичного алгоритму знаходимо коефіцієнти системи керування, що мінімізують функцію мети. За перше наближення функції мети можна прийняти значення функціоналу якості, отримане для традиційної системи керування.

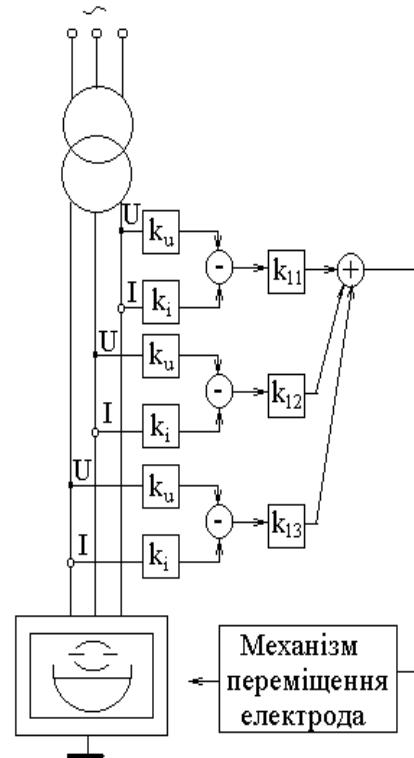


Рис. 2. Схема керування електричним режимом ДСП з врахуванням взаємних впливів фаз (для однієї фази)

Запропонований спосіб використано для визначення коефіцієнтів системи керування електричним режимом ДСП при дії збурень, показаних на рис. 3. Задані уставки струмів для кожної з фаз відповідно дорівнюють: $I_{A\text{зад}} = 43500\text{А}$, $I_{B\text{зад}} = 43000\text{А}$, $I_{C\text{зад}} = 41600\text{А}$.

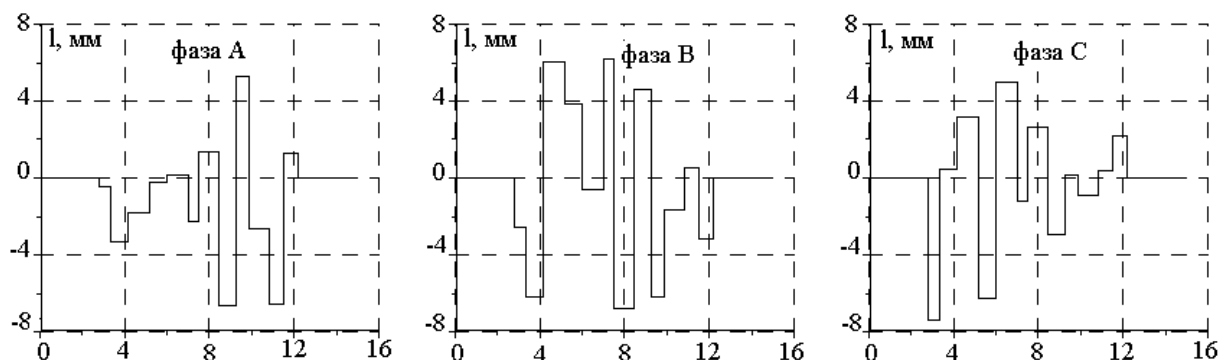


Рис. 3. Збурення, що діють на систему

Для кодування коефіцієнтів застосовано двійковий код. При синтезі коефіцієнтів системи керування прийнято такі допущення: $k_{11} = k_{22} = k_{33}$ – для забезпечення однакових умов при порівнянні з традиційною системою керування, $k_{21} = k_{12}$, $k_{31} = k_{13}$, $k_{32} = k_{23}$ – для зменшення кількості оптимізованих параметрів. Кожний коефіцієнт був представлений за допомогою 6 бітів. У результаті синтезу отримано:

$$\mathbf{u}_{\text{кер}} = \begin{bmatrix} 0.89062 & 0.57812 & 0.8750 \\ 0.57812 & 0.89062 & 0.85937 \\ 0.8750 & 0.85937 & 0.89062 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{u}_{\text{розузг}}$$

У режимах, близьких до усталеного, матриця коефіцієнтів приймається одиничною.

Результати моделювання при використанні традиційної та запропонованої систем керування показані на рис. 4.

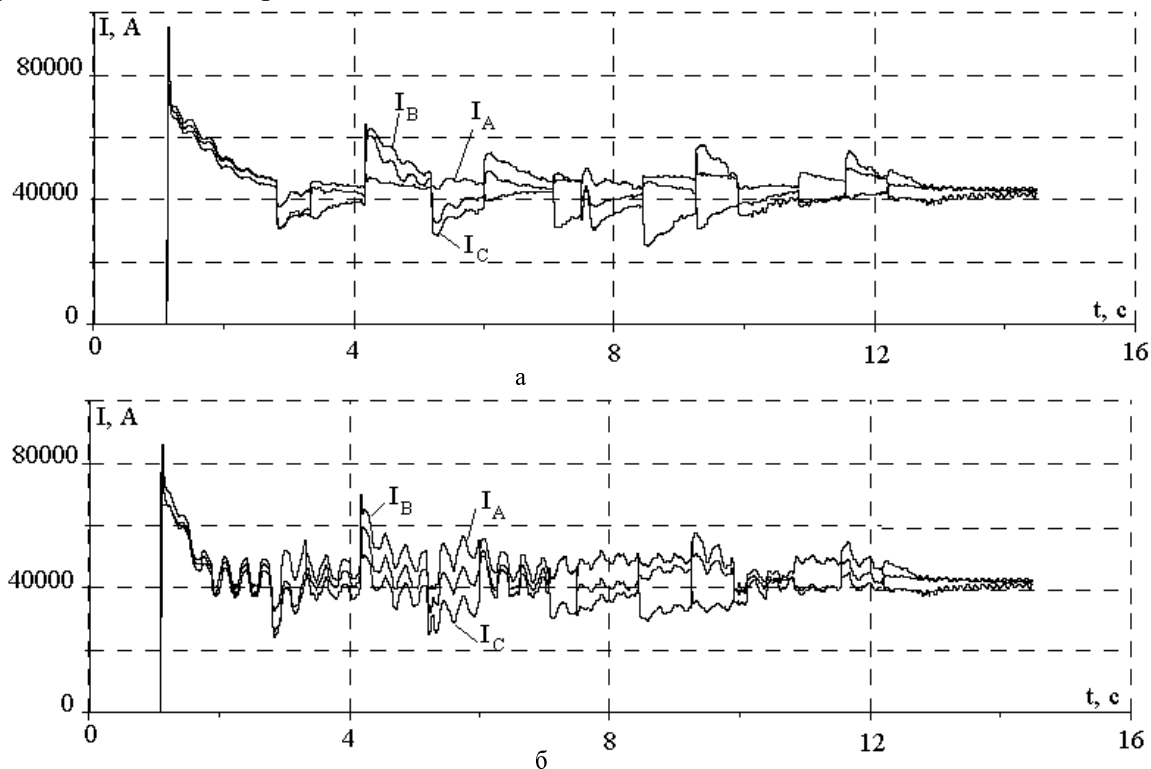


Рис. 4. Струми фаз ДСП при традиційній (а) та запропонованій системах керування (б)

На основі проведеного аналізу результатів роботи систем отримано, що запропонована система керування дає змогу зменшити значення функціоналу якості (1) на 15,37 % зокрема, в кожній з фаз на відповідно 3,39; 7,58; 4,4 %.

1. Лозинський О.Ю., Паранчук Я.С., Лозинський А.О. Регулювання дисперсії вихідної координати шляхом формування випадкового керуючого впливу // *Теорія та моделі пристроїв вимірювальної і перетворювальної техніки: Зб. наук. пр. – К., 1993. – С. 43–45.*
 2. Лозинський О.Ю., Маруцак Я.Ю. Ймовірнісна тривимірна модель системи регулювання електричного режиму дугово-сталеплавильної печі // *Вісн. Львів. політехн. ін-ту. – 1991. – № 253. – С. 69–72.*
 3. Лозинський О.Ю., Маруцак Я.Ю. Тривимірна стохастична модель системи регулювання електричного режиму дугової сталеплавильної печі // *Автоматизація виробничих процесів в машинобудуванні і приладобудуванні: Респ. міжвід. наук.-техн. зб. – Львів, 1993. – Вип. 31. – С. 7–11.*
 4. Пат. 6810 Україна. Пристрій для автоматичного регулювання електричного режиму трифазної дугової електропечі / О.Ю.Лозинський, Л.Д.Костинюк, Я.Ю.Маруцак і ін. – *Опубл. 1994, Бюл. № 8–1.*
 5. А. с. 1823158 СССР. Устройство для автоматического регулирования электрического режима трехфазной дуговой электропечи / О.Ю.Лозинский, Л.Д.Костинюк, Я.Ю.Маруцак и др. – *Опубл. 1993, Бюл. № 23.*
 6. David Goldberg. *Algorytmy genetyczne i ich zastosowania. – Warszawa, 1998. – 408 s.*
 7. Лозинський О., Маруцак Я., Лозинський А. Математична модель системи переміщення електродів дугової сталеплавильної печі з врахуванням кіл живлення дуг // *Технічна електродинаміка. Спец. вип. – К., 1998.*

УДК 621.313.33

М. Лябук, А. Маляр, В. Маляр, О. Шегедин

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра ТЗЕ

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В АСИНХРОННИХ ДВИГУНАХ ПІД ЧАС ЖИВЛЕННЯ ВІД ТРН

© Лябук М., Маляр А., Маляр В., Шегедин О., 2001

Розглянуто питання математичного моделювання перехідних і стаціонарних процесів в асинхронному двигуні під час живлення від ТРН на основі застосування сплайн-функцій. Стаціонарний процес отримується розв'язуванням двоточкової крайової задачі для диференціальних рівнянь, які його описують. Враховується насичення магнітопроводу та витіснення струму.

The issues of mathematical modelling of transient and steady-state processes in an asynchronous motor powered by a thyristor voltage regulator using spline functions have been considered. The steady process is obtained by solving the two-point boundary problem for differential equations describing the process. Thereat, the magnetic circuit saturation and current displacement are taken into account.

Напруга на затискачах обмотки статора асинхронного двигуна (АД), який живиться від тиристорного регулятора напруги (ТРН) несинусоїдна, а це впливає на електромагнітні процеси в двигуні, зокрема, на струми в контурах та електромагнітний момент. Для