

УДК 621.365.2

Паранчук Я.С.

ДУ “Львівська політехніка”, кафедра ЕАП

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ СТРУМІВ ДУГ ДУГОВОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ

© Паранчук Я.С., 2000

Розглядається структура та математична модель швидкодіючого контуру регулювання струмів дуг дугової сталеплавильної печі. Наведена концепція побудови цифрової моделі і результати комп'ютерного моделювання електричних режимів.

Дугові сталеплавильні печі (ДСП) є одним з найпотужніших трифазних споживачів електроенергії. Їх одинична встановлена потужність залежно від ємності печі знаходиться в межах від 1 до 160 МВА і має тенденцію до зростання. Режими навантаження ДСП мають несиметричний, різко перемінний і випадковий характер. Основним збурювальним фактором є неперервні випадкові флуктуації параметрів дугового проміжку: довжини дуги, температури, градієнта напруги на стовпі дуги, значення анод-катодного спаду напруги тощо. Статистичні характеристики процесів зміни цих параметрів неперервно змінюються упродовж плавки. У той же час існуючі системи регулювання (електромеханічні чи електротідравливні) режимів дугових електропечей за причини невисокої швидкодії в умовах дії зазначених збурень допускають під час роботи значний рівень дисперсії координати електричного режиму і, як наслідок, значні відхилення фактичних режимів роботи ДСП від заданих раціональних. Тому експлуатація ДСП з такими системами автоматичного регулювання (САР) електричного режиму негативно впливає як на показники якості електроенергії мережі живлення, так і на техніко-економічні показники функціонування самих ДСП і не відповідає сучасним вимогам енергозбереження.

Одним із напрямів підвищення енергетичної ефективності експлуатації ДСП, на наш погляд, є створення і впровадження високоефективних систем живлення і регулювання електричного режиму. Для цього в [1] запропоновано структуру двоконтурної системи регулювання електричного режиму, у якій окрім традиційного електромеханічного використано принципово новий за структурою і керуючим впливом швидкодіючий контур регулювання струмів дуг. Цей контур регулювання функціонує на базі розробленого магніто-тиристорного перетворювача напруги (МТПН), у якому гармонійно поєднані високий коефіцієнт підсилення за потужністю з малою інерційністю (стала часу $T_{\text{МТПН}}$ становить 0,005 с) і високими техніко-економічними показниками.

Регулювальним впливом цього контуру служать прирости еквівалентного індуктивного опору дроселя МТПН, які формуються у функції відхилення поточного середньо-випрямленого струму дуги від заданого. Будь-яке збурення приводить в дію обидва контури регулювання. На першому етапі практично миттєво вступає в дію електричний контур, як

такий, що не має зони нечутливості і більш швидкодіючий та працює в напрямі відновлення значення струму дуги у кожній фазі до рівня заданого. На другому етапі відбувається відновлення довжини дуги до рівня заданого електромеханічним контуром, яке відбувається при значеннях струмів дуг, близьких до заданих.

Дослідження процесів в електричному контурі на етапі його проектування при дії реальних випадкових збурень найдоцільніше проводити за допомогою математичного і цифрового моделювання. За умови створення адекватної трифазної математичної і цифрової моделей на рівні миттєвих значень представляється можливість шляхом комп'ютерного симулювання виконання математичних експериментів з дослідження електромагнітних процесів як на рівні миттєвих, так і усереднених (діючих) значень у робочих і аварійних режимах, показників динаміки і статички при дії як детермінованих, так і стаціонарних випадкових збурень та формулювання на підставі отриманих результатів дослідження обґрунтованих висновків про ефективність використання в структурі САР електричного режиму ДСП швидкодіючого електричного контуру регулювання струмів дуг.

Функціональна блок-схема моделі системи живлення та швидкодіючого контуру регулювання струмів дуг дугової сталеплавильної печі [2] показана на рис.1. Систему живлення становлять такі елементи: мережа живлення МЖ; магнітно-тиристорний перетворювач напруги МТПН; струмообмежуючий дросель Др, силовий пічний трансформатор ПТ і коротка мережа (частина силового кола від виводів вторинних обмоток пічного трансформатора – до кінців електродів) разом з дуговим простором печі Км+Д. Швидкодіючий контур регулювання струмів дуг у кожній фазі складається з давача поточного усередненого (діючого чи середньовипрямленого) струму дуги ДС, задавача струму ЗС дуги, регулятора струму РС дуги, нелінійного функціонального перетворювача НФП, вихідний сигнал якого $U_{кв}$ є сигналом керування системи імпульсно-фазового керування відповідної фази МТПН. Формування трьох некорельованих випадкових процесів $f_{Ia}(t)$, $f_{Ib}(t)$, $f_{Ic}(t)$, що адекватні за статистичними характеристиками до реальних процесів флуктуацій довжин дуг виконується генератором випадкових збурень ГВЗ.

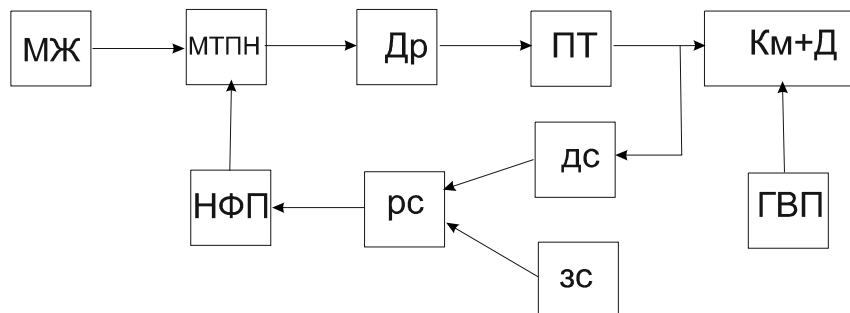


Рис.1. Функціональна блок-схема системи живлення та регулювання струмів дуг ДСП.

Повна математична модель САР електричного режиму ДСП складалася за блочним принципом і формувалася у відповідності з основним положенням теорії моделювання електромашинно-вентильних систем [3]. Математичні моделі окремих елементів системи розробляли з урахуванням вимог цієї теорії, методологічним базисом якої служить метод вузлових потенціалів [4]. Модель системи при такому підході подається замкнутою системою диференціальних рівнянь, яку утворюють рівняння, що описують структурні елементи, та рівняння для визначення потенціалів вузлів системи. Кожен структурний елемент системи живлення дугової електропечі розглядається як багатополосник, який описується

відповідними зовнішніми і внутрішніми векторними рівняннями. Математичні моделі структурних елементів, що становлять систему живлення ДСП, а це моделі мережі живлення, струмообмежуючого реактора, пічного трансформатора, короткої мережі і дуг приводилися до такого вузлового векторного рівняння

$$p\vec{i}_E + \vec{G}_E \cdot \vec{\varphi}_E + \vec{C}_E = 0, \quad (1)$$

де $\vec{i}_E = (i_1, i_2, \dots, i_n, -i_1, -i_2, \dots, -i_n)_t$, $\vec{\varphi}_E = (\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_n)_t$ – вектори струмів і потенціалів зовнішніх вузлів структурного елемента;

$$\vec{G}_E = \begin{bmatrix} \tilde{L}_E^{-1} & -\tilde{L}_E^{-1} \\ -\tilde{L}_E^{-1} & \tilde{L}_E^{-1} \end{bmatrix}, \quad \vec{C}_E = \begin{bmatrix} \tilde{L}_E^{-1} \\ -\tilde{L}_E^{-1} \end{bmatrix} \times \vec{E}$$

– матриця розмірності $(n \times n)$ і вектор розмірності n коефіцієнтів вузлових рівнянь, що визначаються індуктивностями, активними опорами і струмами ($n = 6$ для МЖ, Др, КМ+Д, і $n = 12$ для ПТ);

$$\tilde{L}_E = \begin{bmatrix} L_{0101} & L_{0102} & \cdots & L_{010n} \\ L_{0201} & L_{0202} & \cdots & L_{020n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{0n01} & L_{0n02} & \cdots & L_{0n0n} \end{bmatrix}, \quad \vec{E}_E = \begin{bmatrix} r_1 \cdot i_1 \\ r_2 \cdot i_2 \\ \vdots \\ r_n \cdot i_n \end{bmatrix}$$

– матриця власних і взаємних індуктивностей структурного елемента та вектор спадів напруг на активних опорах відповідно.

Математична модель магнітно-тиристорного претворювача напруги подається таким зовнішнім векторним рівнянням та внутрішнім рівнянням стану тиристорів:

$$\begin{aligned} p\vec{i}_\Pi + \vec{G}_\Pi \cdot \vec{\varphi}_\Pi + \vec{C}_\Pi + A \cdot p\vec{i}_T &= 0; \\ A^T \cdot \vec{\varphi}_\Pi - \vec{u}_T &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

де A^T – матриця вигляду $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$; \vec{u}_T , \vec{i}_T – вектори напруг і струмів тиристорів.

Математична модель системи автоматичного керування контуру регулювання струмів дуг при використанні пропорційно-інтегрального регулятора струму дуги для однієї з фаз подається такими рівняннями:

$$\begin{aligned} pI_\Delta &= (K_{\Delta c} \cdot I'_\Delta - I_\Delta) / T_{\Delta c}; \\ pU_{\kappa ci} &= (I_\Delta - I_{\Delta z}) / T_{pc}; \\ U_{\kappa c} &= (I_\Delta - I_{\Delta z}) \cdot K_{pc} + U_{\kappa ci}; \\ U'_{\kappa c} &= \begin{cases} f(U_{\kappa c}), & \text{для } U_{\kappa c} < 0; \\ 0, & \text{для } 0 < U_{\kappa c} < 10; \\ 10, & \text{для } U_{\kappa c} > 10, \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

де I_Δ – поточне середньовипрямлене значення струму дуги; $K_{\Delta c}$, $T_{\Delta c}$ – коефіцієнт передачі і стала часу давача струму; $U_{\kappa ci}$ – інтегральна складова регулятора струму дуги; I_Δ – поточне усереднене значення струму дуги; $I_{\Delta z}$ – сигнал завдання струму дуги; K_{pc} , T_{pc} – коефіцієнт

передачі і стала інтегрування регулятора струму; $f(U_{KC})$ – функціональна залежність, що відтворюється нелінійним функціональним НФП.

Функціональна залежність НФП $f(U_{KC})$ розраховується з умови отримання сталого статичного коефіцієнта передачі МТПН на всьому діапазоні зміни напруги U_{KC} , яка розраховується на основі експериментально отриманої залежності $I_D = \psi(U'_{KC})$.

Формування в моделі процесів випадкових збурень за довжиною дуги виконується генератором випадкових збурень ГВЗ. Зазначені процеси збурень $f_i(t)$ формуються на основі апріорної інформації про нормовані автокореляційні функції, отриманих внаслідок опрацювання реальних процесів збурень у різних технологічних періодах типових плавок. За цією інформацією для кожного досліджуваного періоду плавки за допомогою генератора випадкових чисел і синтезованих цифрових фільтрів формуються тривимірні масиви. Елементи утворених таким способом масивів подають квантовані за часом еквівалентні з інтервалом дискретності $\Delta t = 0.1$ еквівалентні спостереження $f(n \cdot \Delta t)$ ($n = 0, 1, 2, \dots, N$) процесів збурень за довжиною дуги у кожній з фаз упродовж періоду стаціонарності T , тривалість якого для різних печей і періодів плавки коливається в межах 1–4 хв. Для реалізації в цифровій моделі плавної зміни поточних значень збурень $f(t)$, тобто отримання значення збурень $f(t)$ в моменти часу $n \cdot \Delta t < t < (n+1) \cdot \Delta t$, використано ковзаючу інтерполяцію дискретизованого за часом процесу збурень $f(n \cdot \Delta t)$, поліномом Ньютона третього порядку

$$\begin{aligned}
 f(t) = & f((n-1)\Delta t) + \frac{f(n \cdot \Delta t) - f((n-1) \cdot \Delta t)}{\Delta t} \cdot (t - (n-1) \cdot \Delta t) + \\
 & + \frac{f((n+1) \cdot \Delta t) - 2 \cdot f(n \cdot \Delta t) + f((n-1) \cdot \Delta t)}{2! \cdot \Delta t^2} \cdot [(t - (n-1) \cdot \Delta t) \cdot (t - n \cdot \Delta t)] + \\
 & + \frac{f((n+2) \cdot \Delta t) - 3 \cdot f((n+1) \cdot \Delta t) + 3 \cdot f(n \cdot \Delta t) - f((n-1) \cdot \Delta t)}{3! \cdot \Delta t^3} \cdot \\
 & \cdot [(t - (n-1) \cdot \Delta t)(t - n \cdot \Delta t)(t - (n+1) \cdot \Delta t)],
 \end{aligned} \quad (4)$$

де $f(j \cdot \Delta t)$ – значення збурень у моменти часу $j \cdot \Delta t$ ($j = n-1, n, n+1, n+2$).

Цифрова модель системи живлення та регулювання струмів дуг сформована за функціональною схемою, зображеною на рис.1, і реалізована у середовищі програмування FORTRAN-77. Програмний комплекс для дослідження електромагнітних процесів ДСП на рівні миттєвих значень створений за модульним принципом і дає змогу легко змінювати структуру досліджуваної системи за допомогою включення, виключення чи заміни структурних елементів, змінювати їх параметри, схеми з'єднань, отримувати результати розрахунків у вигляді миттєвих чи усереднених значень тощо. Модель системи формується з моделей її окремих елементів-багатополосників, з'єднаних за допомогою матриць інцидентів відповідно до конфігурації електричного кола досліджуваної структури системи живлення і регулювання ДСП. Такий підхід побудови цифрової моделі досліджуваної системи передбачає створення для кожного її структурного елемента окремої власної математичної моделі, як математичного опису електротехнічного об'єкта, до якого прикладені зовнішні вимушуючі сили, а математична модель всієї системи є лише набором у довільній послідовності моделей її структурних елементів. У цифровій моделі кожний структурний елемент подається трьома модулями: модулем підготовки вхідної інформації, модулем обчислення параметрів і коефіцієнтів вузлових зовнішніх рівнянь та модулем розрахунку потенціалів зовнішніх вузлів і вектора інтегрування.

На кожному кроці інтегрування алгоритм розв'язування задачі Коші передбачає виконання таких дій:

- розраховуються коефіцієнти вузлових векторних рівнянь структурних елементів системи;
- розв'язуються логічні рівняння, що описують стан тиристорів МТПН;
- формується система рівняння, яка описує роботу всієї системи;
- розв'язується отримана система рівнянь відносно вектора $\overline{\varphi}_c$ потенціалів вузлів системи і векторів \overline{u}_T , \overline{i}_T ;
- визначаються вектори потенціалів зовнішніх вузлів структурних елементів;
- формується вектор похідних кожного структурного елемента і всієї системи;
- за допомогою числового інтегрування диференціальних рівнянь обчислюється вектор інтегральних змінних всієї системи;
- записуються отримані поточні значення досліджуваних координат системи в файл даних.

Після закінчення циклічного обчислювального процесу виконується опрацювання записаних в файлах даних результатів (спектральний аналіз, обчислення статичних характеристик тощо) і видача її у вигляді, зручному для користування.

Параметри математичної моделі системи регулювання струмів дуг розраховували стосовно електропечі типу ДСП-6. Дослідження процесів зміни струмів дуг для різних технологічних періодів плавки у цій печі проводили для розімкненого і замкненого контуру регулювання струмів дуг. Математичні експерименти під час дослідження цих структур проводилися при дії як детермінованих збурень, що дають змогу змодельовати процеси в силовому колі при раптових експлуатаційних коротких замиканнях, обривах дуг, запалюваннях дуг, так і при дії стаціонарних випадкових збурень, адекватних за статистичними характеристиками реальним процесам збурень у досліджуваних технологічних періодах плавки. З метою проведення коректного порівняльного аналізу показників якості регулювання струмів дуг, математичні експерименти для вказаних вище досліджуваних структур проводилися за однакових детермінованих і випадкових збурень.

Результати моделювання електричного режиму при відпрацюванні обриву дуги у фазі В швидкодіючим контуром регулювання струму дуги показано на рис.2. На цьому рисунку показана зміна поточного значення довжини дуги $l_d(t)$ (а) усередненої за період потужності дуг $P_d(t)$ (б) і миттєвих значень напруги $u_d(t)$ (в) і струму $i_d(t)$ (г) дуги кожної фази печі. Аналіз міни струмів дуг у цьому режимі, а також процесів $i_d(t)$, отриманих при дії інших одиничних збурень, зокрема і таких, що призводять до одно-, дво- чи трифазних коротких замикань показує, що максимальні значення струмів дуг при використанні швидкодіючого контуру зменшуються залежно від моменту його виникнення в 1,1–1,2 раза, а час регулювання струму не перевищує 0.02–0.03 с. При відключеному швидкодіючому контурі час регулювання визначається часом відновлення довжини дуги до заданого рівня механічним переміщенням електрода. Для порівняння час відпрацювання однофазного короткого замикання залежно від типу встановленої на печі системи переміщення електродів і періоду плаки знаходиться в межах 1.0–1.7 с.

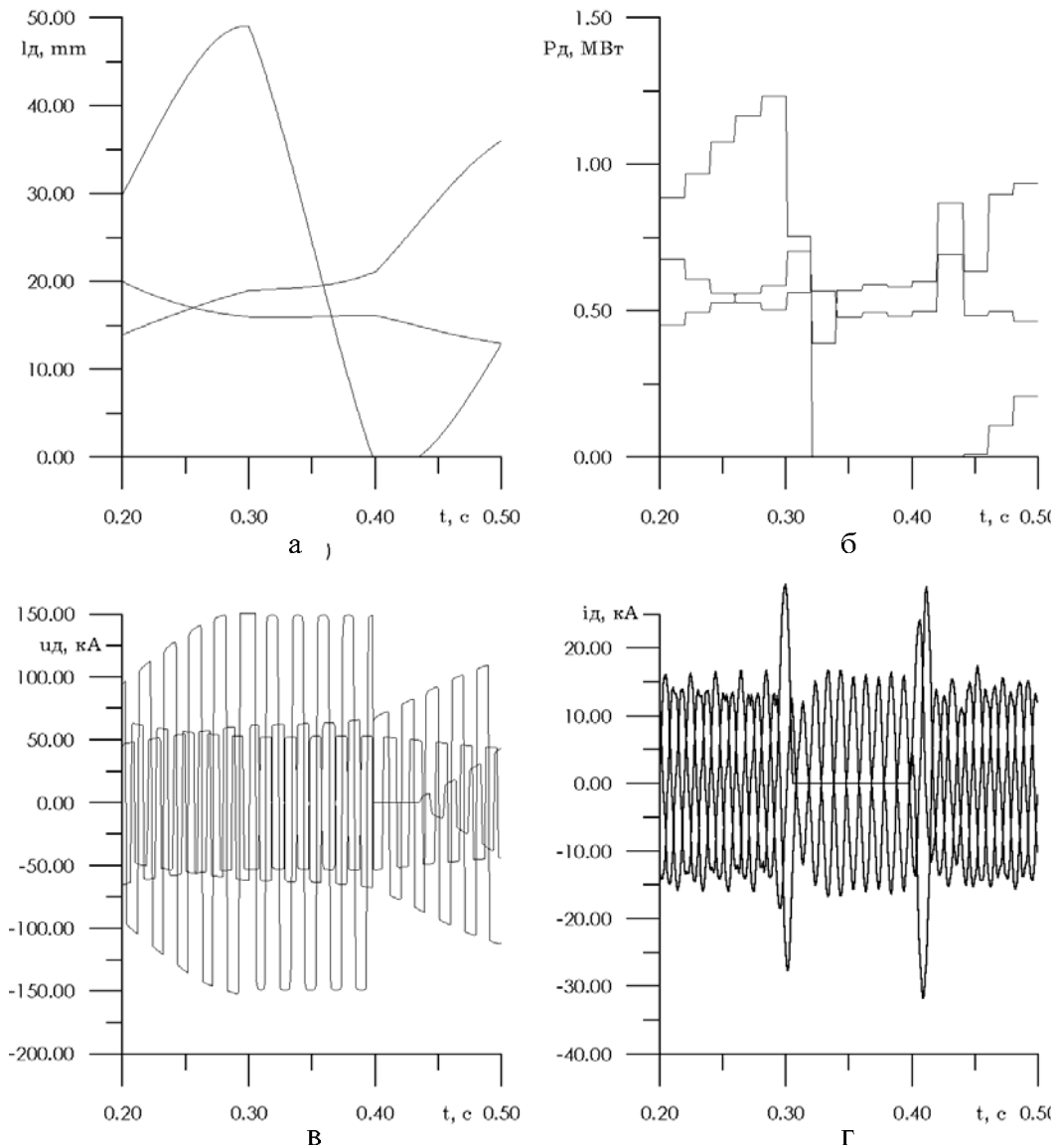


Рис.2. Результати моделювання електричного режиму.

На рис.3 зображені отримані на цифровій моделі процеси зміни діючих значень струмів дуг $I_d(t)$ при виключеному (в) і включеному (г) швидкодіючому контурі при дії випадкових збурень $f(t)$ (а) і відповідних їм змінах діючих значень напруг на дугах $U_d(t)$ б). Характер збурень $f(t)$ за довжиною дуги у цьому математичному експерименті відповідає початку періоду розплавлення шихти. Дисперсія струмів дуг у кожній фазі становить $D_{IA}=28.78 \text{ кА}^2$; $D_{IB}=22.65 \text{ кА}^2$; $D_{IC}=9.2 \text{ кА}^2$ – при виключеному (рис.3, в) і $D_{IA}=2.46 \text{ кА}^2$; $D_{IB}=1.99 \text{ кА}^2$; $D_{IC}=1.34 \text{ кА}^2$ – при використанні (рис.3, г) швидкодіючого контуру регулювання струмів дуг дугової електропечі ДСП-6.

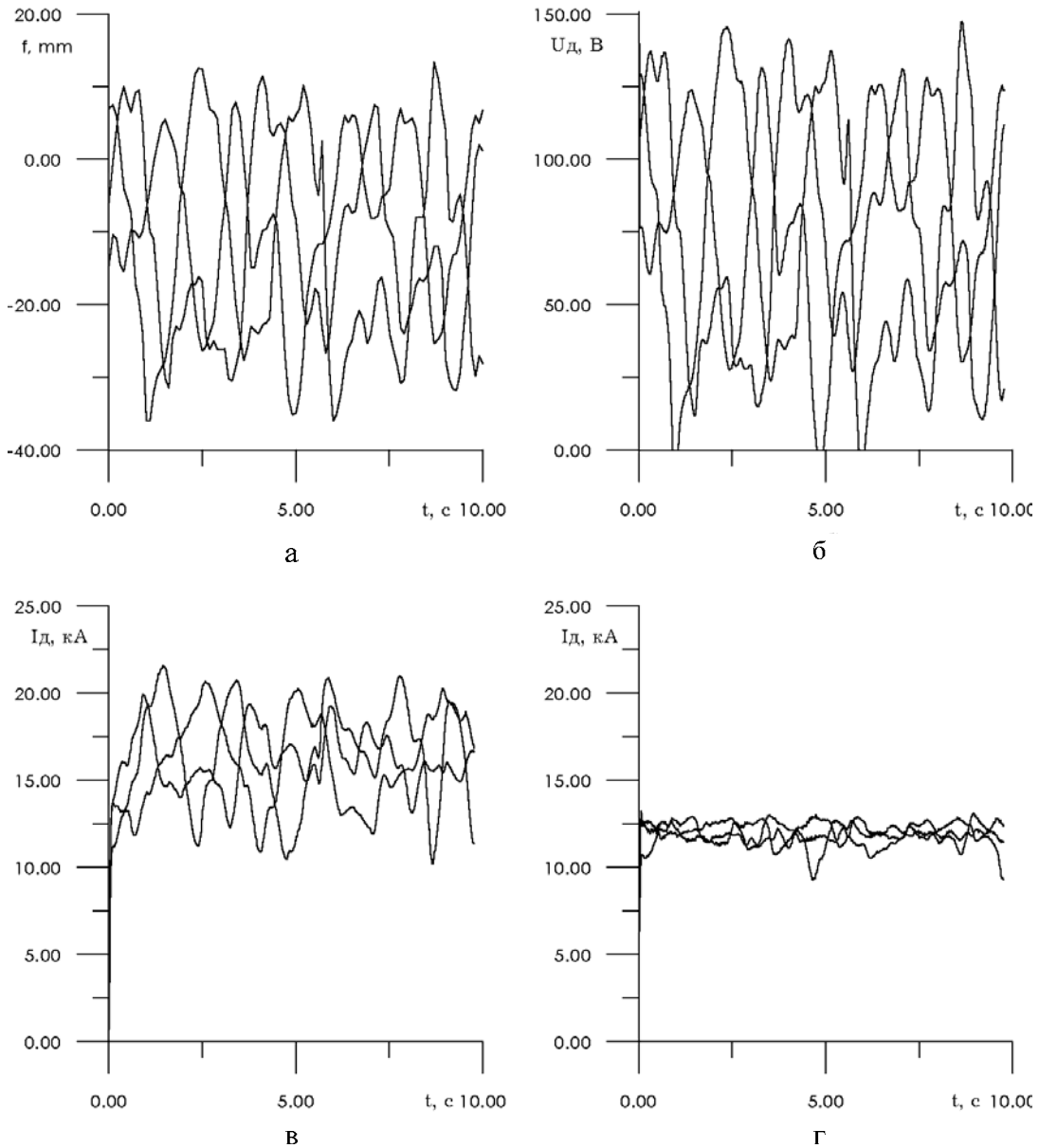


Рис.3. Процеси зміни діючих значень струмів дуг.

Аналіз результатів комп'ютерного симулювання показав, що використання швидкодіючого контуру регулювання струмів дуг ДСП призводить до покращання якості регулювання електричного режиму, зокрема таких показників як час регулювання, значення перерегулювань і дисперсії струму дуги. Внаслідок цього покращуються значення інших техніко-економічних показників роботи дугової сталеплавильної печі і зменшується негативний вплив її роботи на стабільність напруги електромережі, від якої вона живиться.

1. А. с. 1042211 СССР, МКИ H05B 7/148. Регулятор мощности многофазной электропечи / Б.Д.Денис, О.Ю.Лозинский, Я.С.Паранчук // Открытия. Изобрет. 1983. № 34. 2. Паранчук Я.С. , Лозинский А.О. Математична модель системи трифазних дуг дугової сталеплавильної печі // Проблемы автоматизированного электропривода // Теория и

практика: Вісн. ХПІ. Спец. вип. Харків. 1998. С.189–200. 3. Плахтына Е.Г. Математическое моделирование электромашино-вентильных систем. Львів, 1986. 4. Плахтына Е.Г. Применение метода узловых потенциалов для расчёта переходных процессов в электрических цепях // Теоретическая электротехника. 1978. Вып.24. С.44–46.

УДК 621.311.001.57

Перхач В., Горячко В.

ДУ “Львівська політехніка”, кафедра ТЗЕ

МАТЕМАТИЧНА ТА ЦИФРОВА МОДЕЛЬ СИНХРОННОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВІ ЄДИНОГО МАГНЕТНОГО ПОТОКУ

© Перхач В., Горячко В., 2000

Розроблено квазіеталонну математичну та цифрову модель синхронного турбогенератора без розділення магнетного потоку на основний та розсіяння з пришивдшенням усталення режимів.

Для дослідження електромагнетних перехідних процесів й усталених режимів у миттєвих координатах електропересильні надвисокої напруги нами розроблено квазіеталонні моделі (КЕМ) її структурних елементів. Модель синхронного турбогенератора (СТГ) як і моделі електромагнетних апаратів формуємо на підставі єдиного магнетного потоку без його розділення на основний та розсіювання [1].

Для цього весь простір СТГ розбиваємо на елементарні об’єми. Поле у них з певним наближенням можна вважати однорідним і тому ці об’єми подаємо зосередженими диференційними магнетними опорами. Так магнетну систему СТГ апроксимуємо планарним магнетним колом із припущенням плоскопаралельності магнетного поля машини (рис.1). Очевидно, рівень адекватності моделі визначається шириною кроку дискретизації, яка тут змінюється, залежно від геометрії магнетного кола.

Ампер-веберні характеристики цих опорів визначаємо за їх геометричними розмірами й основною кривою намагнетчування матеріялу магнетопровода (рис.2).

Якщо до елементарного об’єму входять ділянки з різними магнетними характеристиками (наприклад, зубцево-гарова зона статора та ротора), то усереднені ампер-веберні характеристики $F(\Phi)$ таких об’ємів визначаємо еквівалентуванням певним способом злучених елементів (рис.3).

Поле розсіяння в чолових частинах машини еквівалентуємо навоєм індуктивності, увімкненим послідовно з обвитками машини. Параметри цього навою залежать від конструкції та розмірів СТГ і визначаються за довідниками з проектування електричних машин [2]. Для обвиток статора цю індуктивність визначаємо як

$$L = 0.0013(w/10)^2 I_n / U_n / 3D_1 / p^2 k_{об}^2 \cdot 10^{-4}, \quad (1)$$