

## СТРУКТУРА БАГАТОЗВ'ЯЗАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ “ДУГОВА СТАЛЕПЛАВИЛЬНА ПІЧ – ЕЛЕКТРОПОСТАЧАЛЬНА МЕРЕЖА”

О Лозинаський О. Ю., Паранчук Я. С., 2016

Запропоновано багаторівневу багатозв'язану структуру системи для адаптивного багатокритеріального оптимального керування режимами електротехнологічного комплексу “дугова сталеплавильна піч – електропостачальна мережа”.

*Ключові слова: електротехнологічний комплекс, дугова сталеплавильна піч, електропостачальна мережа, швидкодійний контур, оптимальне керування, штучна зовнішня характеристика.*

The paper proposes a multilevel multiconnected structure of the system for adaptive multicriterion optimal control of "arc steelmaking furnace – supply network" electro-technological complex modes

*Key words: electrotechnological complex, arc steelmaking furnace, supply network, high-speed circuit, optimal control, artificial external characteristic.*

### Постановка задачі

Наявні одноконтурні електромеханічні (електрогідравлічні) системи автоматичного керування (САК) електричним режимом (ЕР) дугових сталеплавильних печей (ДСП) в умовах дії різкозмінних динамічних несиметричних збурень у дуговому просторі печі допускають у процесі функціонування значну динамічну і статичну похибку регулювання режимних координат електросталеплавлення, що призводить до погіршення техніко-економічних показників і самих ДСП, і до виникнення негативних впливів на режими електропостачальної мережі. Зважаючи на це актуальною є задача розроблення рішень на комплексне підвищення показників електротехнологічної ефективності комплексу ДСП-ЕПМ.

### Аналіз останніх досліджень

Останні рішення з удосконалення наявних технічних засобів систем та алгоритмів керування режимами дугових сталеплавильних печей передбачали, переважно, підвищення швидкодії регулювання та динамічної точності (зниження дисперсії) координат електричного режиму електромеханічних (електрогідравлічних) систем регулювання довжин дуг (регуляторів потужності дуг) [1]. Сьогодні резерви електромеханічних регуляторів за низки механічних та технічних обмежень практично вичерпані і подальше поліпшення динаміки процесу регулювання координат електричного режиму та поліпшення показників електротехнологічної ефективності повинні спрямовуватися у напрямі розроблення принципово нових технічних рішень. Зокрема потрібно передбачати розроблення нових ефективних і водночас простих і надійних схемотехнічних та алгоритмічних рішень на основі використання силових напівпровідникових перетворювачів та мікропроцесорної техніки в системах живлення та керування режимами. Вони повинні спрямовуватися на підвищення динамічної та статичної точності регулювання режимних координат електросталеплавлення, на зниження рівня негативних взаємовпливів режимів дугової печі та мережі живлення, підвищення електричного ККД, зменшення питомих витрат електроенергії, збільшення продуктивності печі, на по-

довження терміну служби силового електрообладнання та підвищення якості електросталей. Такі рішення повинні розроблятися на основі комплексного системного підходу, що враховує режими та показники функціонування і дугової сталеплавильної печі, і електропостачальної мережі.

### Мета дослідження

Зважаючи на вказані особливості режимів електротехнологічного комплексу, неперервну дію випадкових динамічних збурень та структурну складність цього електротехнологічного комплексу як об'єкта керування, постає важлива науково-прикладна проблема розроблення ефективних структурних та системотехнічних рішень, що скеровані на реалізацію стратегії оперативної багатокритеріальної оптимізації режимів електротехнологічного комплексу “дугова сталеплавильна піч – електропостачальна мережа” (ДСП-ЕПМ) як складної багатозв'язаної САК.

### Виклад основного матеріалу

Для отримання високоефективного схемотехнічного та алгоритмічного забезпечення оптимізації режимів електросталеплавлення в умовах сучасних тенденцій підвищенням одиничної тонажності дугових сталеплавильних печей і питомої потужності пічних трансформаторів (ПТ) нами запропоновано розширити функціональні можливості САК режимами комплексу шляхом реалізації швидкодійного (плавного та дискретного) регулювання у широкому діапазоні координат та параметрів системи живлення дуг за відповідними законами і створити на цій основі високоефективну багатфункціональну багатоконтурну систему оптимального керування режимами електротехнологічного комплексу “дугова сталеплавильна піч – електропостачальна мережа” за поставленими критеріями чи комплексними функціоналами якості керування електросталеплавлення та показниками електропостачальної мережі.

В основу реалізації зазначеного підходу покладено концепцію пріоритетного придушення координатних та параметричних збурень у джерелі їх виникнення. Розроблену за такого підходу багатоконтурну структуру координатно-параметричної системи керування режимами комплексу ДСП-ЕПМ показано на рис. 1.

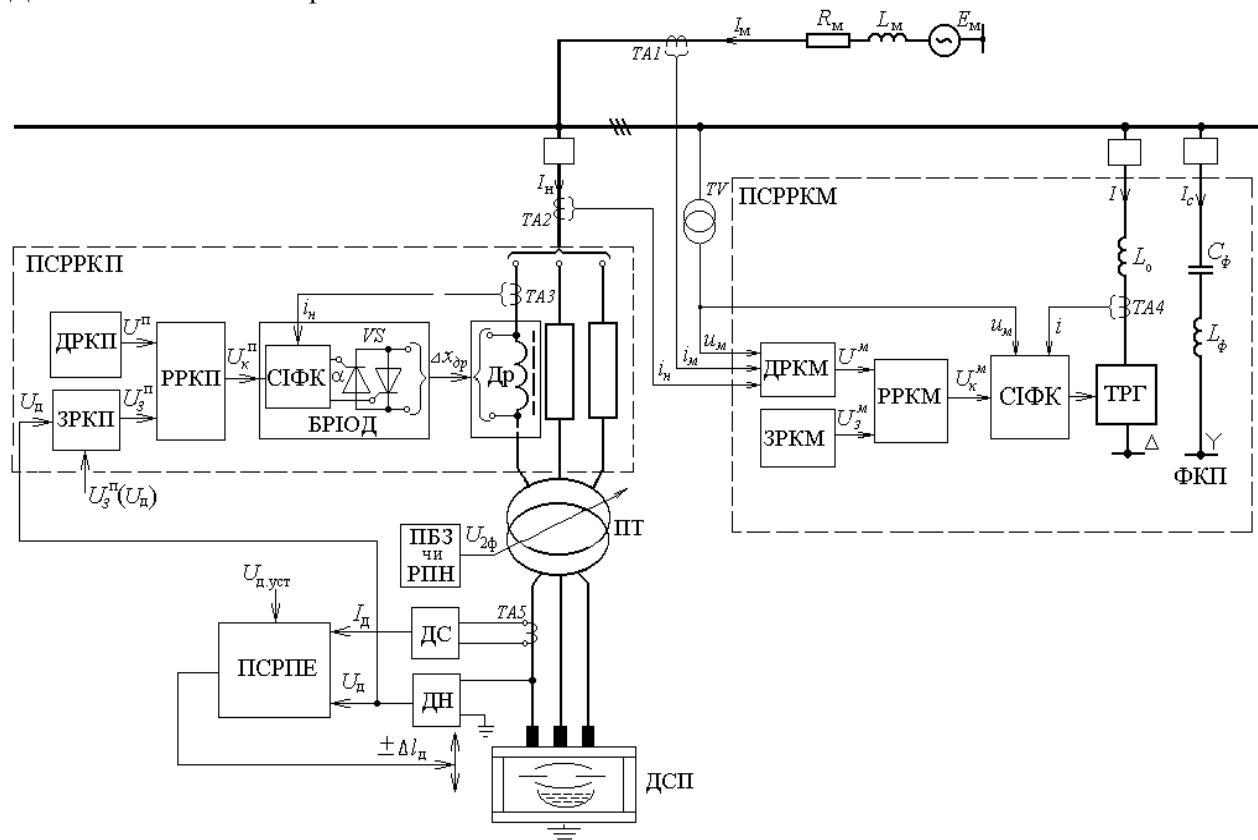


Рис. 1. Функціональна блок-схема багатоконтурної САК для багатокритеріальної оптимізації режимів електротехнологічного комплексу ДСП-ЕПМ

Для регулювання режимів електротехнологічного комплексу (ЕТК) у запропонованій структурі крім традиційної електромеханічної (електрогідравлічної) підсистеми регулювання положення електродів ПСРПЕ, включено швидкодійну електричну підсистему регулювання певної режимної координати печі ПСРРКП: струму дуги  $I_o$ , потужності дуги  $P_o$ , реактивної потужності печі  $Q$  тощо, яку становлять давач режимної координати печі ДРКП, задавач режимної координати печі ЗРКП та регулятор режимної координати печі (РРКП) відповідної режимної координати печі і блок регулювання індуктивного опору БРІОД дроселя Др. Дросель Др включений у коло первинної обмотки пічного трансформатора ПТ.

Підсистема регулювання режимної координати мережі (напруги, реактивної потужності, коефіцієнта потужності навантаження) ПСРРКМ реалізована у запропонованій на рис. 1 структурі на основі статичного регульованого джерела реактивної потужності, яке становлять фільтро-компенсуючий пристрій ФКП, шунтовий реактор  $L_o$ , струм якого регулюється тиристорно-реакторною групою ТРГ. Систему керування цього контуру становлять давач режимної координати мережі ДРКМ, задавач ЗРКМ та регулятор РРКМ режимної координати мережі  $Y^m$ . Керування тиристорно-реакторною групою виконується у функції вихідного сигналу керування  $U_k^m$  РРКМ, а синхронізація імпульсів керування тиристорно-реакторних груп (ТРГ) у різних режимах реалізується за фазою струму  $i$  шунтового реактора (ШР) чи напруги  $u_m$  мережі.

Традиційна у системах регулювання потужності дуг ДСП підсистема регулювання положення електродів ПСРПЕ функціонує за принципом координатно-керуваних об'єктів. Напруга дуги  $u_o(t)$  регулюється опосередковано переміщенням електродів. Процеси зміни напруг дуг  $u_{o_j}(t)$  ( $j=A,B,C$ ) визначаються пофазними керуючими впливами  $\Delta I_{o_j}(t)$  – приростами довжин дуг, що формуються за певним законом на виході цієї підсистеми у функції поточних усереднених значень напруг  $U_o(t)$  та струмів  $I_o(t)$  дуг, що надходять з виходів давача напруги ДН та струму ДС дуги відповідно.

Швидкодійна електрична підсистема регулювання режимної координати печі ПСРРКП (рис. 1) функціонує за принципом відхилення вибраної режимної координати ДСП, а її керуючим впливом слугують плавні пофазні зміни поздовжнього параметра системи живлення печі – індуктивного опору  $\Delta x_{op_j}$  тиристорно-регульованого дроселя Др, що реалізується його шунтуванням на певній плавно регульованій частині півперіоду напруги мережі біполярними тиристорними ключами  $VS_j$  блока регулювання індуктивного опору дроселя БРІОД. Інтервал шунтування на півперіоді напруги визначається кутом  $\alpha$  керування тиристорів  $VS$ , що формується на виході системи імпульсно-фазового керування СІФК у функції сигналу керування  $U_k^n$  (тут  $n$  нижче верхній індекс “п” вказує на регулювання відповідної режимної координати печі, на відміну від “m” (нижче), що вказує на регульовану координату електромережі).

Основною метою реалізації такого параметричного впливу є оперативне формування бажаної штучної зовнішньої характеристики (ШЗХ) печі  $I_o(U_o)$  і відповідних їй штучних електричних та робочих характеристик ДСП. Регулювання вибраної режимної координати печі виконується або шляхом її стабілізації на заданому рівні, або її регулюванням за законом, що впливає з бажаних залежностей робочих та електричних характеристик печі, які необхідно сформувані на певному діапазоні зміни напруг на дугах. Для реалізації цього у задавачі режимної координати печі ЗРКП оперативно у функції поточного значення напруги дуги  $U_o$  за відповідною функціональною залежністю обчислюється сигнал завдання  $U_s^n = U_s^n(U_o)$  режимної координати печі. Висока швидкодія ПСРРКП та використання пропорційно-інтегральної структури регулятора режимної координати печі дають змогу в квазістатичному режимі відслідковувати поточне задане значення регульованої режимної координати печі  $Y^n(t) \equiv U_s^n(t)$  на відповідних ділянках зміни напруги на стовпі дуги і реалізувати, отже, необхідні закони їх керування за дії випадкових координатних та параметричних збурень у процесі електросталеплавлення.

Частковим випадком з множини можливих законів регулювання режимних координат печі є їх стабілізація на заданому рівні. У такому разі реалізованим процесом є  $Y^n(t) \equiv U_3^n(t) = const$  і відпадає необхідність у використанні зворотного зв'язку за напругою дуги у підсистемі регулювання режимної координати печі.

На верхньому рівні такої структури функціонує керуюча підсистема (координатор), основною задачею якої є синтез загальносистемного вектора керування – потоку задаючих (координуючих, корегуючих) сигналів для локальних підсистем, вихідні сигнали яких безпосередньо впливають на зміну відповідних режимних координат процесу електросталеплавлення [2].

Координатні  $\Delta I_{\partial}$  та параметричні  $\Delta x_{op}$  керуючі впливи взаємозв'язані і вимагають узгодження мети керування з врахуванням реальних фізичних обмежень на значення координат та параметрів системи. Електромеханічній ПСРПЕ властива низька швидкодія та наявність зони нечутливості за сигналом керування, а електрична ПСРРКП має щонайменше на порядок вищу швидкодію і функціонує без зони нечутливості, проте поступається ПСРПЕ за діапазоном регулювання потужності дуг. У такій взаємозв'язаній через об'єкт (силове електричне коло печі та електромережі) та систему керування структурі координатні та параметричні збурення одночасно приводять в дію кожну з наведених вище підсистем. У процесі відпрацювання координатною ПСРПЕ збурення за довжиною (напругою) дуги, швидкодійна ПСРРКП в квазістатичному режимі реалізує бажані процеси зміни вибраної режимної координати печі.

Така ієрархічна багатоконтурна структура САК режимами комплексу ДСП-ЕПМ належить до класу складних багатовимірних багатозв'язаних динамічних систем. Тому актуальним для неї є розроблення загальної методики структурної та параметричної оптимізації режимів електротехнологічного комплексу за критеріями якості чи узагальненими функціоналами, що диктуються оперативними зовнішніми умовами та вимогами до процесу функціонування ДСП та ЕПМ. Основними причинами, що утруднюють пряме використання відомих методів розв'язання задач оптимізації є висока розмірність та наявність тісних перехресних взаємозв'язків (взаємовпливів) і між окремими фазними каналами регулювання певної підсистеми, і між фазними каналами різнойменних підсистем.

На рис. 2 показано функціональну блок-схему запропонованої багатоконтурної взаємозв'язаної структури системи керування для реалізації багатокритеріальної оптимізації режимів комплексу ДСП-ЕПМ, а на рис. 3 – її структурну схему для регулювання режимних координат електросталеплавлення у фазі А [3]. На цих рисунках показано функціональні взаємозв'язки між її окремими підсистемами – електричною швидкодійною ПСРРКП, електромеханічною ПСРПЕ і об'єктом керування ОК у фазі А (рис. 3), а також функціональні взаємовпливи між задаючими сигналами  $U_{2ф}$ ,  $U_{дуст}$ ,  $U_3^n(U_{\partial})$ ,  $U_3^m$ , координатними збурюючими впливами за довжиною дуги  $f_{l_{\partial A}}$ ,  $f_{l_{\partial B}}$ ,  $f_{l_{\partial C}}$ , параметричними збуреннями  $f_{n_A}$ ,  $f_{n_B}$ ,  $f_{n_C}$  та основними вихідними (первинними) регульованими режимними координатами:  $U_{\partial A}$ ,  $U_{\partial B}$ ,  $U_{\partial C}$ ,  $I_{\partial A}$ ,  $I_{\partial B}$ ,  $I_{\partial C}$  – напругами та струмами дуг, процеси зміни яких визначально впливають на інтегральні значення показників функціонування ЕТК ДСП-ЕПМ і які є аргументами часткових критеріїв оптимальності  $Q_1, Q_2, \dots, Q_s$  (рис. 3).

Оцінка ефективності функціонування такої системи залежно від поставлених вимог отримується за значенням відповідного показника якості: продуктивності печі, дисперсії режимних координат, коефіцієнта корисної дії тощо, що подаються відповідною цільовою функцією (частковим критерієм якості)  $Q_i(U_{\partial A}, U_{\partial B}, U_{\partial C}, I_{\partial A}, I_{\partial B}, I_{\partial C})$  чи за сукупністю певних критеріїв якості керування, які функціонально ув'язуються залежністю комплексного (узагальненого) функціоналу мети керування  $\Phi(\vec{Q})$ . В останньому випадку розв'язується і реалізується багатокритеріальна оптимізаційна задача керування.

Передавальні функції за довжиною дуги, струмом дуги та параметричними збуреннями на рис. 3 показані як  $W_l(p)$ ,  $W_x(p)$ ,  $W_n(p)$  відповідно. На рис. 3 швидкодійну електричну ПСРРКП становлять: нелінійний функціональний перетворювач, що відтворює залежність  $U_3^n(U_{\partial})$ , передавальна функція прямого каналу  $W_{xA}(p)$  і каналу зворотного зв'язку  $W_{33A}(p)$  за регульованою

режимною координатою (на схемі рис. 3 – це струм дуги). Електромеханічна ПСРПЕ на цьому рисунку подана еквівалентною передавальною функцією  $W_{l_{\partial A}}(p)$ . Об'єкт керування ОК – силове електричне коло та дуговий простір печі, подається градієнтом напруги на стовпі дуги  $\beta$ , залежністю природної зовнішньої характеристики печі  $I_{\partial}(U_{\partial})$  та суматором, що реалізує залежність:  $l_{\partial A} = l_{\partial_{3A}} + f_{l_{\partial A}} - \Delta l_{\partial_{pA}}$ , де  $l_{\partial A}$  – поточне та  $l_{\partial_{3A}}$  – задане значення довжини дуги,  $\Delta l_{\partial_{pA}}$  – прирости довжини дуги, що зумовлені роботою ПСРПЕ та  $f_{l_{\partial A}}$  – збурення за довжиною дуги для фазного каналу регулювання А координатної підсистеми регулювання положення електродів (ПСРПЕ).

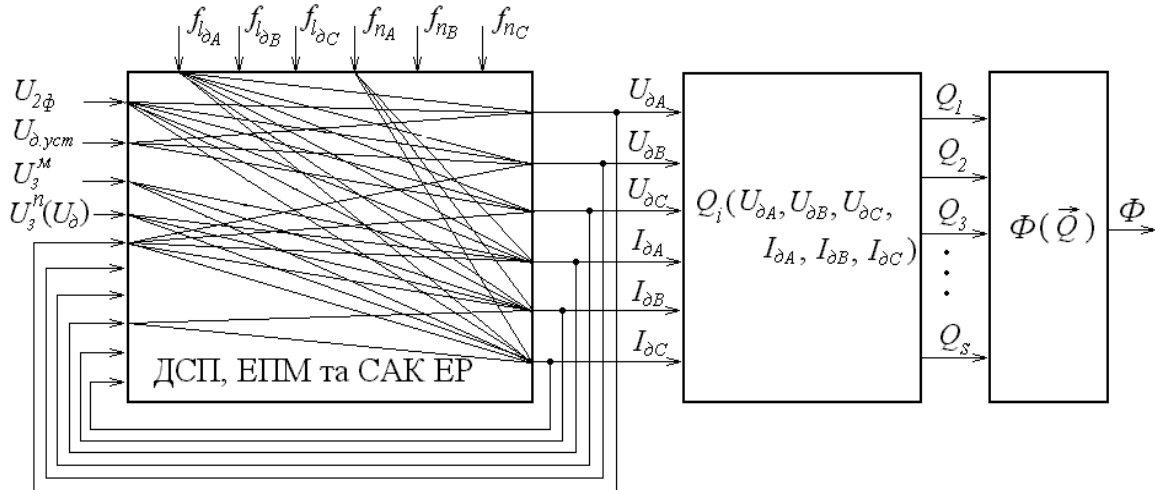


Рис. 2. Функціональна блок-схема взаємозв'язаної системи багатокритеріальної оптимізації режимів електротехнологічного комплексу ДСП-ЕІМ

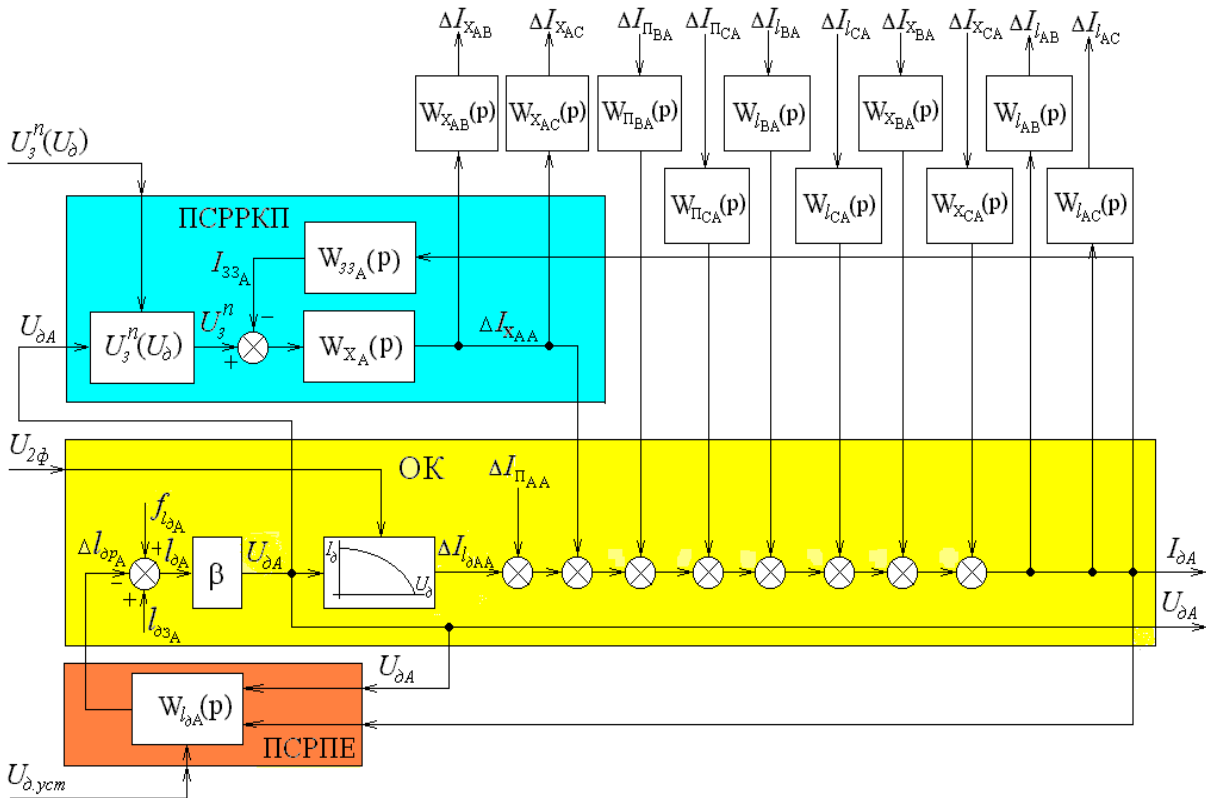


Рис. 3. Структурна блок-схема багатоконтурної багатозв'язаної системи керування режимами дугової сталеплавильної печі для фази А

Координати електричного режиму дугової печі – напруги та струми дуг  $U_{dj}, I_{dj}$  ( $j=A, B, C$ ), у будь-якій з фаз і між різними фазами є взаємозв'язані і характер цього взаємозв'язку підлягає законам балансу напруг та струмів у трифазному силовому електричному колі дугової печі. Крім зазначених вище взаємовпливів, які виникають природно завдяки реальним фізичним властивостям об'єкта керування (силове коло живлення трифазних дуг без нульового провідника), для формування бажаної ШЗХ печі в кожному фазному каналі САР вводиться функціональний зв'язок між напружовим виходом електромеханічної ПСРПЕ (напругою дуги  $U_d$ ) та задаючим входом швидкодійної ПСРРКП в однойменних фазних каналах регулювання. За наявності таких перехресних взаємозв'язків виникнення збурення за довжиною дуги в одній з фаз неминуче призводить до зміни струмів дуг у всіх фазах, а це, за чинного диференційного закону  $U_{роз} = a \mathcal{U}_d - b \mathcal{I}_d$  регулювання потужності дуг в електромеханічній ПСРПЕ, спричинює хибні переміщення електродів у двох інших фазах, де збурення за довжиною дуги не виникало, а також до неадекватного регулювання опору дроселя  $D_r$  у цих фазах. Подібно до цього, виникнення параметричного збурення – зміна активного  $\Delta r$  чи реактивного  $\Delta x$  опору короткої мережі, в одній з фаз системи живлення дуг призводить до регулювання (у відповідності до вибраної ШЗХ електропечі) опору дроселя  $D_r$  в усіх фазних каналах і до хибних переміщень електродів у фазних каналах ПСРПЕ під час автоматичного регулювання.

Характерною ознакою такої багатозв'язаної САР координат електричного режиму ДСП є те, що складові вектора задаючих впливів задаються сталими на певний часовий інтервал плавки і у допустимому просторі його зміни приймають ряд дискретних значень. У силу можливості фізичної реалізації ці задаючі впливи системи є дискретними сигналами керування і їх значення синтезуються апріорі чи оперативно по ходу плавки у функції інтегральних значень поточних координат та критерію (функціоналу) якості і реалізуються однаковими (симетричними) значеннями на відповідних задаючих входах фазних каналів регулювання на поточний інтервал стаціонарності для кожного технологічного періоду плавки, марки сталі, стану футерівки печі тощо.

Зауважимо, що найінтенсивніші взаємовпливи між і всередині зазначених підсистем спричинюються саме координатними збуреннями (70–80 % амплітуди поштовхів струмів дуг визначаються саме збуреннями за довжинами (напругами) дуг).

Така розроблена структура системи автоматичного керування режимами комплексу ДСП-ЕПМ згідно із запропонованою М. Д. Мезаровичем класифікацією систем взаємозв'язаного регулювання належить до  $V$ -канонічного представлення, оскільки вона має декілька задаючих входів та підпорядкованих контурів регулювання та характеризується впливами різних входів на різні виходи (впливами на регульовані режимні координати різних фаз: струми дуг  $I_d$ , активну  $P_d$  та реактивну  $Q$  потужності печі тощо) через об'єкт та систему керування.

## Висновки

Запропонована структура багатозв'язаної системи керування режимами електротехнологічного комплексу “дугова сталеплавильна піч – електропостачальна мережа” є узагальненою структурою, яка пов'язує всі взаємовпливи двох функціонально різних за структурою та швидкодією підсистем керування, для якої актуальною є задача оперативного аналізу та синтезу оптимальних режимів та відповідного до них вектора багатокритеріального адаптивного оптимального керування за поставленими критеріями чи функціоналами керування.

1. Лопухов Г. А. Состояние и тенденции развития электросталеплавильного производства (по материалам 33 Конференции ИСИ) // *Электрометаллургия*. – 2000. – № 7. – С. 35–37. 2. Лозинський О. Ю. Ієрархічна система багатокритеріального оптимального керування режимами дугових сталеплавильних печей з нечіткою адаптацією / О. Ю. Лозинський, Я. С. Паранчук // *Технічна електродинаміка*. – 2012. – № 3. – С. 103–104. 3. Lozynskyy O. Multicriterion Intelligent Control System and Optimal Stabilization of Arc Steel-Melting Furnace Electrical Regimes Coordinates // *Computational Problems of Electrical Engineering* / O. Lozynskyy, Y. Paranchuk, R. Paranchuk. – 2011. – Vol. 1, № 1. – P. 35–44.