

ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА АСИМЕТРІЇ НАВАНТАЖЕННЯ ДВОКОНТУРНОЇ САР ЕЛЕКТРИЧНОГО РЕЖИМУ ДУГОВОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ

Паранчук Я.С.

Національний університет "Львівська політехніка"

Робота трифазних дугових сталеплавильних печей (ДСП) змінного струму характеризується динамічним, випадковим та несиметричним характером навантаження, що негативно впливає на роботу інших електроспоживачів які мають загальну точку під'єднання до мережі живлення. Зазначений негативний вплив полягає у виникненні коливань, відхилень і спотворень форми напруги в мережі, генеруванні в мережу вищих гармонік струму та призводить до несиметрії струмів фаз і напруг електромережі, значного споживання реактивної потужності тощо.

Серед вказаних параметрів якості електроенергії у точці під'єднання ДСП до мережі, діапазон зміни коефіцієнта асиметрії, що характеризує рівномірність фазних навантажень дугової печі, є найбільшим. Через різко змінюваний характер створюваного системою трифазних дуг навантаження фазні струми випадковим чином коливаються в межах від нуля (обрив дуг) до значення струму експлуатаційного короткого замикання $I = I_{кз} = k_{кз} I_n$, причому коефіцієнт кратності $k_{кз}$ струму короткого замикання залежить від типу електропечі, схеми та параметрів її системи живлення і знаходиться в межах $k_{кз} = 1.8 \dots 3.6$. Найінтенсивніший різкоперемінний характер навантаження має місце на початку плавки – в період основного розплавлення шихти, а частота коливань струмів у цей період складає від долей до 20...25 Гц. Найчастіше виникають однофазні, рідше – двофазні кидки струмів, у тому числі і експлуатаційних коротких замикань. У процесі плавки мають місце нерегулярні коливання з частотами 0.1...0.2 Гц та близькі до регулярних, з частотами 3...15 Гц. Нерегулярні коливання мають велику амплітуду 120...150% номінального струму електроічного агрегату. Їх причиною є, в основному, збурення у дугових проміжках печі: різкі рухи шихти, електродів, зміна умов горіння дуг тощо. Регулярні коливання є наслідком пружних коливань електродів і

електродотримачів, коливань, що виникають у результаті функціонування системи регулювання положення електродів, періодичної зміни провідності стовпа дуги у додатний та від'ємний півперіоди тощо. Вони мають значно меншу амплітуду – до 50% номінального струму електропічної установки.

Зазначені причини, у тому числі і несиметричні значення міжфазних взаємних індуктивностей елементів короткої мережі, які викликають нерегулярні та регулярні коливання фазних струмів, призводять до виникнення асиметрії, коливань і відхилень напруг у точці під'єднання печі до мережі. Виникнення несиметричних режимів (наявність так званої “дикої” та “мертвої” фази) негативно впливає як на роботу самої дугової сталеплавильної печі (нерівномірний нагрів металу по периметру печі, нерівномірне зношування футеровки печі тощо), так і на роботу інших споживачів із спільною точкою під'єднання, зокрема електричного освітлення, асинхронних та синхронних електроприводів, тиристорних перетворювачів та ін.

Тому проблема зменшення коефіцієнта асиметрії фазних навантажень ДСП є важливою і вимагає негайного вирішення. Одним із можливих шляхів нормалізації цього показника режимів навантаження ДСП є використання коректуючих пристроїв, дія яких за принципом роботи скерована на ліквідацію наслідків негативного впливу зазначеного характеру навантаження на показники якості електроенергії на шині під'єднання печі [1]. Безумовно зазначений підхід є доцільним для практичного використання, так як дає змогу понизити значення коефіцієнта асиметрії. Але, на наш погляд, ефективнішим є розроблення і практичне використання нових технічних та алгоритмічних рішень, направлених на зменшення рівня асиметрії режимів у самому технологічному об'єкті, тобто у джерелі їх виникнення, а не спрямування зусиль на подолання чи компенсацію негативних результатів їхньої дії.

Для реалізації зазначеного підходу оптимізації режимів ДСП за критерієм мінімуму коефіцієнта асиметрії струмів фаз в умовах неперервної випадкової зміни фазних навантажень у [2] запропоновано структуру багатоконтурної системи керування режимами дугової печі.

Особливістю застосування цієї структури для мінімізації асиметрії є реалізація у процесі її роботи відповідної штучної зовнішньої характеристики (ШЗХ) ДСП, залежність якої синтезується з умови оптимізації режимів печі за цим критерієм. Для цього розроблено варіант двоконтурної структури системи швидкодійного регулювання струмів дуг, оптимізованої за критерієм мінімуму коефіцієнта асиметрії, яка подана на рис.1, а також алгоритм її функціонування та методику синтезу необхідної для цього ШЗХ.

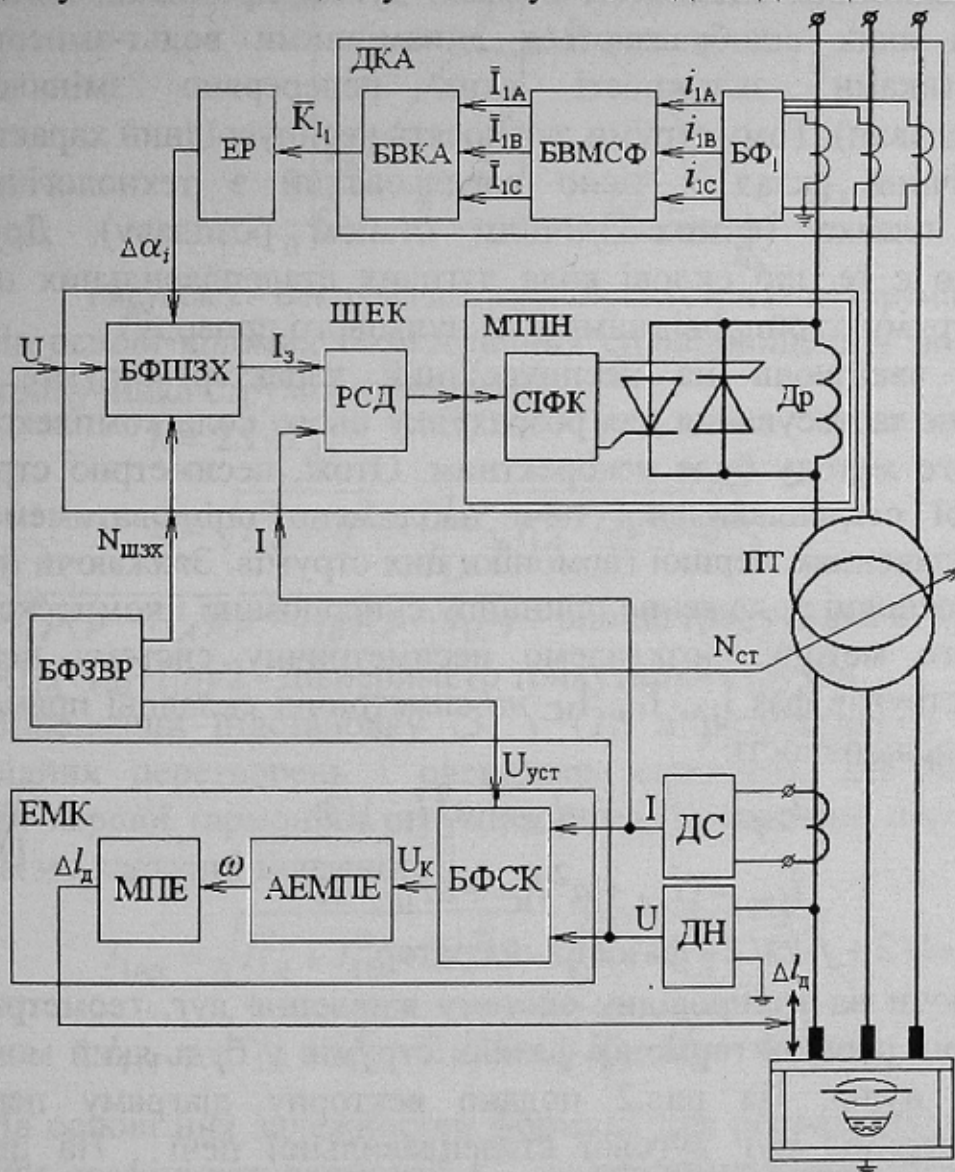


Рисунок 1 - Функціональна блок-схема двоконтурної САК EP ДСП

Для функціонування цієї системи необхідна оперативна інформація про поточне значення коефіцієнта асиметрії, зміни якого з причини випадкового характеру коливань струму в електропечі теж

властивий випадковий характер. Тому для оцінки коефіцієнта асиметрії фазних навантажень ДСП (струмів дуг) необхідно розробити методику із залученням стохастичних методів.

При створенні такої методики необхідно врахувати дві особливості силового кола дугової сталеплавильної печі (кола живлення трифазної системи дуг). По-перше, всім елементам силового кола печі властива та чи інша ступінь нелінійності (найсуттєвішим нелінійним елементом є фазні дугові проміжки, нелінійні властивості яких відображаються динамічними вольт-амперними характеристиками, залежності яких неперервно змінюються упродовж плавки). Тому струми дуг носять несинусоїдний характер, а їх гармонічний склад є тісно корельований з технологічними періодами плавки (фізико-хімічним станом розплаву). Другою особливістю є те, що силові кола дугових сталеплавильних печей змінного струму є трипровідними (без нульового проводу).

Тому, зважаючи на несинусоїдний характер струмів фаз, безпосереднє застосування для розрахунку цього кола комплексного символічного методу буде некоректним. Отож, несиметрію струмів фаз дугової сталеплавильної печі наближено оцінюватимемо за поточним значенням першої гармоніки цих струмів. Зважаючи на це, а також на основні положення принципу суперпозиції і комплексного символічного методу, розкладемо несиметричну систему першої гармоніки струмів фаз I_{1A} , I_{1B} , I_{1C} на симетричні складові прямої та зворотної послідовності:

$$\dot{I}_{1np} = (\dot{I}_{1A} + a\dot{I}_{1B} + a^2\dot{I}_{1C})/3; \quad (1)$$

$$\dot{I}_{1зв} = (\dot{I}_{1A} + a^2\dot{I}_{1C} + a\dot{I}_{1B})/3;$$

де $a=e^{j120} = -1/2 + j\sqrt{3}/2$ – фазовий оператор.

Зважаючи на трипровідну систему живлення дуг, геометрична сума векторів перших гармонік фазних струмів у будь-який момент часу рівна нулю. На рис.2 подано векторну діаграму першої гармоніки струмів дуг дугової сталеплавильної печі. На цьому рисунку вектор струму \dot{I}_{1A} першої гармоніки фази А направлений вздовж дійсної осі; h – висота трикутника струмів; x – проекція струму

\dot{I}_{1B} на вектор струму \dot{I}_{1A} . З урахуванням цих позначень можемо записати наступні співвідношення:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{1A} &= I_{1A}; \\ \dot{I}_{1B} &= -x - jh; \\ \dot{I}_{1C} &= -(I_{1A} - x) + jh. \end{aligned} \quad (2)$$

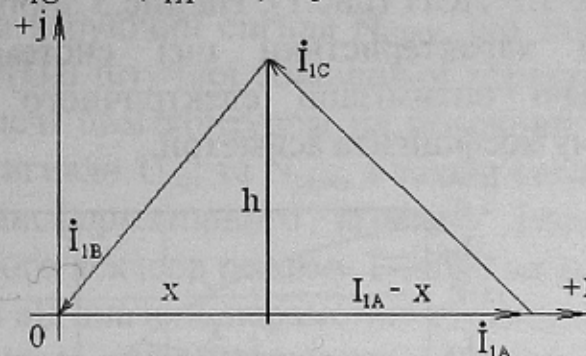


Рисунок 2 - Векторна діаграма першої гармоніки струмів дуг

На основі відомих геометричних співвідношень з поданого на рис.2 трикутника струмів отримуємо:

$$\begin{aligned} h &= 2S / I_A; \\ x &= \sqrt{I_{1B}^2 - h^2} = \frac{1}{I_{1A}} \sqrt{I_{1A}^2 \cdot I_{1B}^2 - 4S^2}, \end{aligned} \quad (3)$$

де $S = \sqrt{p(p - I_{1A})(p - I_{1B})(p - I_{1C})}$ - площа трикутника струмів;

$p = (I_{1A} + I_{1B} + I_{1C}) / 2$ - півпериметр трикутника струмів.

Виконавши підстановку (3) у (2), а результату в (1) після відповідних перетворень і очевидних спрощень для обчислення модулів першої гармоніки струмів прямої і зворотної послідовності отримаємо наступні залежності:

$$\begin{aligned} I_{1np} &= \sqrt{I_{1A}^2 + I_{1B}^2 + 2\sqrt{3}S - \sqrt{I_{1A}^2 \cdot I_{1B}^2 - 4S^2}}; \\ I_{1зв} &= \sqrt{I_{1A}^2 + I_{1B}^2 - 2\sqrt{3}S - \sqrt{I_{1A}^2 \cdot I_{1B}^2 - 4S^2}}. \end{aligned} \quad (4)$$

На основі цих залежностей формула для розрахунку поточного значення коефіцієнта асиметрії K_{I_1} за першими гармоніками фазних струмів (струмів дуг) дугової сталеплавильної печі набуде такого вигляду:

$$K_{I_1} = \frac{I_{136}}{I_{1np}} = \sqrt{\frac{I_{1A}^2 + I_{1B}^2 - 2\sqrt{3}S - \sqrt{I_{1A}^2 \cdot I_{1B}^2 - 4S^2}}{I_{1A}^2 + I_{1B}^2 + 2\sqrt{3}S - \sqrt{I_{1A}^2 \cdot I_{1B}^2 - 4S^2}}}. \quad (5)$$

Отримана залежність (5) покладена в основу функціонування давача коефіцієнта асиметрії ДКА, що використовується у структурі двоконтурної САР ЕР ДСП (рис.1). На рис.3 зображено природну та штучні зовнішні характеристики цієї системи адаптовані до вирішення задачі оптимізації електричного режиму ДСП за критерієм мінімуму коефіцієнта асиметрії.

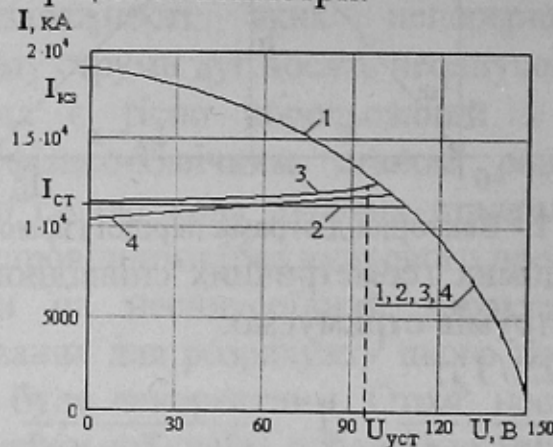


Рисунок 3 - Природна 1 та штучні 2,3,4 штучні зовнішні характеристики дугової сталеплавильної печі ДСП-6

Розроблена структура САР ЕР ДСП (рис.1) складається з двох контурів регулювання: електромеханічного контуру ЕМК переміщення електродів, керуючим впливом якого є прирости довжини дуги Δl_d та швидкодійного електричного контуру ШЕК регулювання струмів дуг, вихідним впливом якого є прирости індуктивного опору дроселя D_r . Електромеханічний контур у кожній фазі регулювання складають давач струму ДС та напруги ДН дуги, блок формування сигналу керування БФСК, автоматизований електропривод механізму переміщення електроду АЕМПЕ та механізм переміщення електроду МПЕ (U_k – сигнал керування АЕМПЕ; ω – кутова швидкість приводного двигуна). Цей контур функціонує за диференціальним законом керування з вхідним сигналом струму I і напруги U дуги, а задаючим сигналом є уставка контуру за напругою дуги $U_{уст}$.

Швидкодійний електричний контур, який призначений для адаптивного, у залежності від вимог та умов функціонування дугової печі,

формування оптимальної ШЗХ складають магнітно-тиристорний перетворювач напруги (МТПН) ($V1, V2$ – силові тиристори, СІФК – система імпульсно-фазового керування), регулятор струму дуги РСД та блок формування штучної зовнішньої характеристики БФШЗХ. Вхідним формуючим сигналом цього контуру є напруга дуги U , у функції якої в БФШЗХ обчислюється сигнал завдання $I_3=f(U)$ регулятора струму дуги та керуючий сигнал $N_{ШЗХ}$, що задає тип (функціональну залежність $f(U)$) штучної зовнішньої характеристики (рис.3), що реалізується в печі цим контуром на поточний інтервал плавки. Зазначені керуючі сигнали $U_{уст}$ та $N_{ШЗХ}$, а також сигнал керування $N_{ст}$ електропічного трансформаторного агрегату генерується блоком формування задаючого вектора режиму БФЗВР на поточний інтервал плавки в залежності від значень параметрів стохастичних характеристик збурень, марки сталі, типу шихти, стану футеровки, вимог до техніко-економічних показників функціонування дугової печі, мережі живлення тощо.

Давач коефіцієнта асиметрії складають блок фільтрів БФ₁ першої гармоніки струмів, які з первинних давачів фазних струмів виділяють сигнали їх перших гармонік i_{1A}, i_{1B}, i_{1C} ; блок виділення модулів струмів фаз БВМСФ, який формує на своїх виходах усереднені на відтинках стаціонарності модулі струмів дуг фаз I_{1A}, I_{1B}, I_{1C} та блок визначення коефіцієнта асиметрії БВКА, у якому реалізується обчислення коефіцієнта асиметрії K_{I_1} фазних навантажень згідно отриманого виразу (5).

Екстремальний регулятор ЕР у функції значень K_{I_1} формує на своєму виході сигнал $\Delta\alpha_i$, що є коректуючим сигналом БФШЗХ і призначений для невеликої зміни (девіації) штучної зовнішньої характеристики печі відносно номінальної $f(U)$, що встановлюється БФЗВР. Зазначена корекція ШЗХ виконується так, щоб для вибраних значень задаючих впливів $U_{уст}$, $N_{ШЗХ}$ та $N_{ст}$ і чинних стохастичних параметрів збурень в печі підтримувався електричний режим з екстремальним (мінімальним) значення коефіцієнта асиметрії K_{I_1} . Так, наприклад, при використанні лінійної ШЗХ $I_3=f(U)=a \cdot U+b$ (рис.3, пряма 3 чи 4) коректуючий сигнал $\Delta\alpha_i$ призводить зміни одного з коефіцієнтів залежності $f(U)$. Процес функціонування екстремального регулятора ЕР

організовується за будь-яким з відомих алгоритмів (наприклад з пошуком за чутливістю, тобто за знаком приросту функції якості [3]). Циклічність його повторень визначається інтервалом стаціонарності процесу зміни коефіцієнта асиметрії $K_{I_1}(t)$ і для різних печей і періодів плавки складає 1...3хв. На кожному інтервалі стаціонарності виконується порівняння значення коефіцієнта асиметрії K_{I_1} на попередньому і поточному інтервалі. За знаком їх різниці виконується зміна (збільшення чи зменшення) на одну дискрету сигналу $\Delta\alpha_i$.

Дослідження ефективності функціонування запропонованої двоконтурної САР ЕР ДСП, оптимізованої за критерієм мінімуму коефіцієнта асиметрії, виконано на цифровій моделі цієї системи для параметрів електропечі ДСП-6, складеної у миттєвих координатах. Дослідження виконувалися для різних значень задаючих впливів $U_{уст}$, $N_{шзх}$ та $N_{ст}$ і значень стохастичних параметрів стаціонарних випадкових збурень, що діють у дугових проміжках печі. Отримані результати показали, що найменші значення (глобальний мінімум) K_{I_1} можна отримати при використанні ШЗХ типу 3 чи 4 і характеристики 2 (лише для малих значень напруги уставки $U_{уст}$).

Оцінка ефективності функціонування запропонованої структури САР ЕР ДСП виконувалася за значеннями стохастичних параметрів процесу $K_{I_1}(t)$, зокрема його математичного сподівання \bar{K}_{I_1} і дисперсії $D_{K_{I_1}}$, та дисперсії струмів дуг D_I , отримуваних при роботі запропонованої системи (рис.1) та одноконтурної системи, що традиційно використовується на дугових печах змінного струму, а також чутливості цих стохастичних параметрів до девіації ШЗХ (зміни одного коефіцієнта, що наближує чинну на технологічному періоді ШЗХ $I=f(U)$).

На рис.4 подано отримані на цифровій моделі розробленої САР ЕР печі ДСП-6 процеси зміни напруг $U_A(t)$, $U_B(t)$, $U_C(t)$, струмів $I_A(t)$, $I_B(t)$, $I_C(t)$, потужностей $P_A(t)$, $P_B(t)$, $P_C(t)$ дуг та відповідного їм процесу зміни коефіцієнта асиметрії $K_{I_1}(t)$ для $U_{уст} = 95$ В; $N_{ст} = 1$ ($U_{2ф} = 1,075U_{2фн}$) і штучної зовнішньої характеристики типу 3 ($N_{шзх} = 3$), а на рис.5 - такі ж процеси, але отримані при симулюванні режиму традиційної одноконтурної САР ЕР ДСП для $U_{уст} = 114$ В; $N_{ст} = 1$

($U_{2\phi} = U_{2\phi n}$) при такому ж, які в попередньому експерименті процесі збурень (значення уставки ЕМК за напругою $U_{уст}$ та напруги $U_{2\phi}$ вторинної обмотки пічного трансформатора вибиралися такими, щоб отримували середні значення потужності дуг у проведених математичних експериментах досліджуваних структур були рівні. Результати статистичного опрацювання наведених на рис.4 і рис.5 процесів зведено у табл.1.

Таблиця 1 Таблиця показників функціонування досліджуваної структур

Показник функціонування	\bar{U}, B	D_u, B^2	\bar{I}, A	D_I, kA^2	D_{UM}, B^2	\bar{K}_{I_1}
Структура САР						
Двоконтурна	95,09	505,3	13,15	0,253	59,3	0,0298
Одноконтурна	114,12	487,1	11,69	7,72	181,5	0,1186

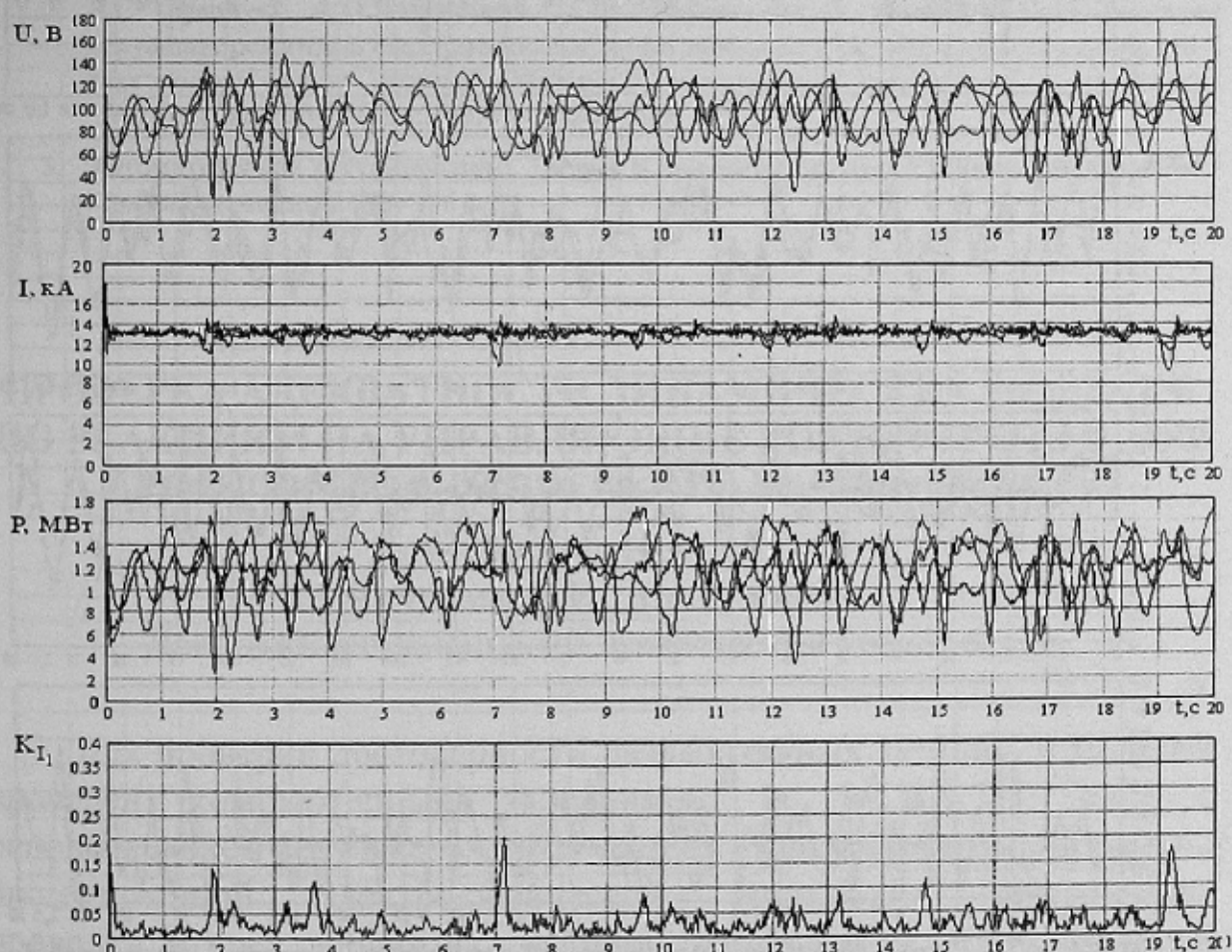


Рисунок 4 - Розраховані на моделі часові залежності напруг $U(t)$, струмів $I(t)$ та потужностей $P(t)$ дуг, а також коефіцієнта асиметрії $K_{I_1}(t)$ для запропонованої двоконтурної САР ЕР ДСП-6

Аналіз отриманих результатів показує, що для однакової середньої потужності дуг ($P=1.14$ МВт) в обох експериментах та використанні запропонованої двоконтурної САР ЕР ДСП-6 спостерігається зменшення математичного сподівання коефіцієнта асиметрії у 4...7 разів, його дисперсії D_{K_1} у 8...12 разів, а дисперсії струмів дуг D_I в середньому по фазах у 20...50 разів, тобто одночасно із симетруванням фазних навантажень відчутно поліпшується стабілізація струмів дуг. Крім цього майже у тричі зменшується дисперсія D_{UM} напруги мережі живлення при використанні запропонованої структури САР ЕР ДСП.

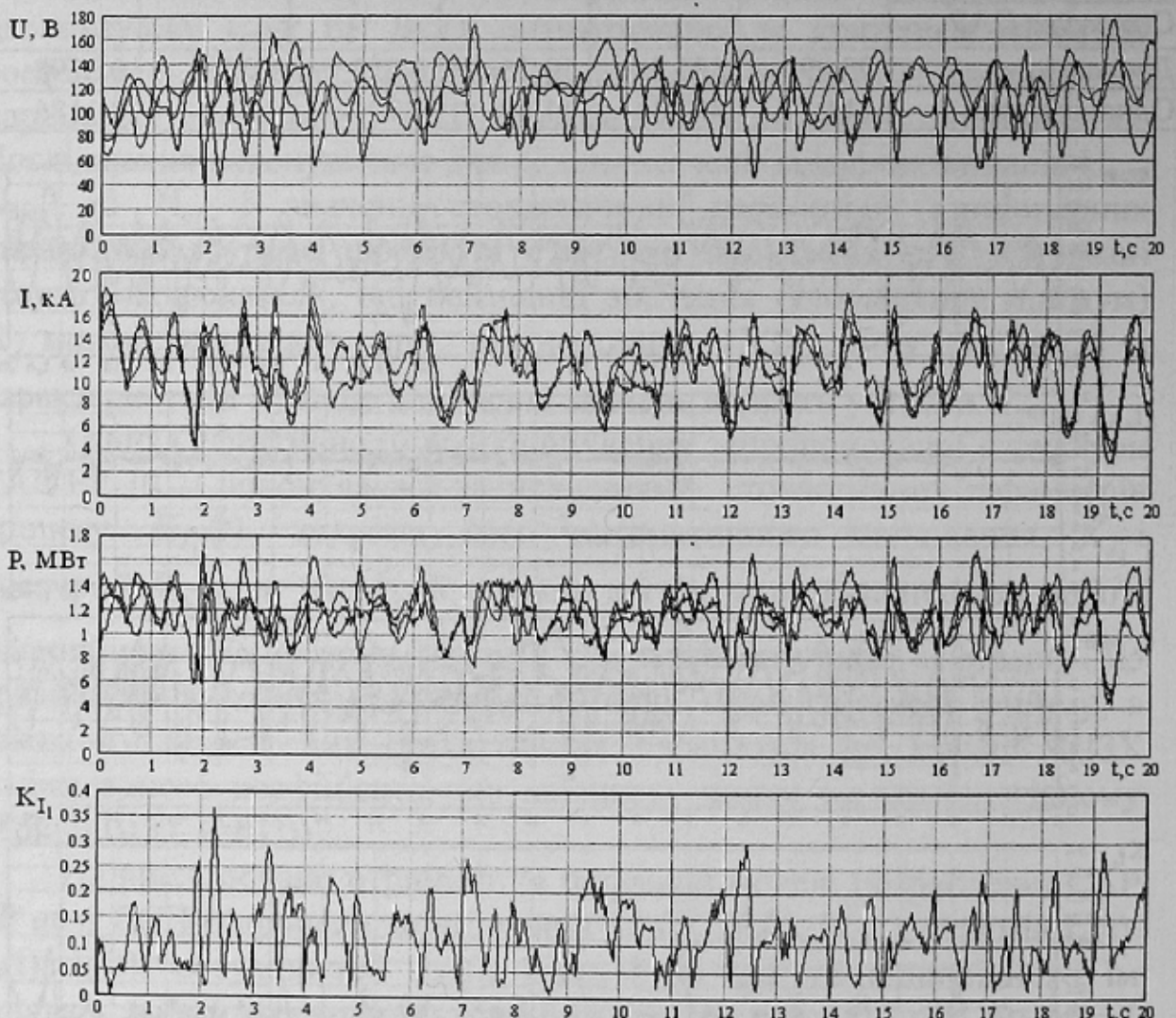


Рисунок 5 - Розраховані на моделі часові залежності напруг $U(t)$, струмів $I(t)$ та потужностей $P(t)$ дуг, а також коефіцієнта асиметрії $K_{I_1}(t)$ для традиційної одноконтурної САР ЕР ДСП-6

Виконані дослідження також підтвердили наявність екстремуму і достатню для функціонування САР ЕР чутливість за коефіцієнтом апроксимуючої залежності $I_3=f(U)$ штучної зовнішньої характеристики електропечі для відповідної її девіації. Таким чином, отримані результати підтверджують досягнення симетрування та стабілізації струмів фаз при використанні запропонованої двоконтурної САР ЕР ДСП, що позитивно впливає як на показники функціонування самої дугової сталеплавильної печі, так і на показники якості електроенергії мережі живлення у точці її під'єднання.

Список джерел

1. Шидловський А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества электроэнергии в электрических сетях. - Киев.: Наукова думка, 1985.-268 с.
2. Я.С.Паранчук, А.О.Лозинський, С.В.Щербовських Багатоконтурна система керування режимами електротехнологічного комплексу "дугова сталеплавильна піч – електропостачальна мережа". Матеріали міжнародної конференції з управління "Автоматика-2001", Одеса, 2001.- С.205-206.
3. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. Учебник для вузов. М.: Машиностроение, 1978. 736 с.

ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПО РЕАКЦИЯМ НА УПРАВЛЯЮЩИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ В АСУ ТП ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО РАСТВОРЕНИЯ

Киктев Н.А.,

Чичикало Н.И., д.т.н., доцент

Донецкий национальный технический университет

Для проверки достоверности разработанных методов и моделей проведен компьютерный эксперимент в АСУ ТП ЭХР с использованием результатов, полученных в реальном времени работы промышленной электрохимической установки. Эксперимент проведен в трех вариантах: методом наблюдений с последующей компьютерной обработкой информации; с использованием известных способов автоматизации [89], [109]; с использованием разработанных методов, моделей и алгоритмов.