

УДК 621.316.933

В.І.Гудим, докт.техн.наук (Львівський держ. ун-т «Безпеки життєдіяльності»), **А.Я.Постолук** (ПВНДКТІ «Укрзахіденергопроект»), **Б.М.Юрків** (Львівський держ. ун-т «Безпеки життєдіяльності»)

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У ШЕСТИЕЛЕКТРОДНІЙ ДУГОВІЙ ЕЛЕКТРОПЕЧІ ІМПУЛЬСНОГО СТРУМУ

Для електропостачання шестиелектродної дугової сталеплавильної печі імпульсного струму сформовано математичну модель в контурних координатах, яка дозволяє здійснювати моделювання стаціонарних і перехідних процесів, та з її допомогою досліджено деякі енергетичні характеристики в симетричних режимах роботи ДСП.

Для электроснабжения шестиелектродной дуговой сталеплавильной печи импульсного тока сформировано математическую модель в контурных координатах, которая позволяет осуществлять моделирование стационарных и переходных процессов, и с ее помощью исследовано некоторые энергетические характеристики в симметричных режимах работы ДСП.

Актуальність проблеми та аналіз останніх публікацій. Останнім часом у світі широкого розповсюдження отримали потужні дугові сталеплавильні печі (ДСП) змінного та постійного струму. Ці печі виготовляють провідні західні, російські та українські виробники.

Суттєвою перевагою ДСП, наприклад, під час виробництва сталі, є можливість отримувати сплави заданих параметрів з дешевої шихти. Разом із тим ДСП мають і недоліки [1], а саме: високий рівень угару шихти, легуючих елементів та графітових електродів, високі рівні шуму та негативного впливу на паралельно працюючі електроспоживачі, локальний перегрів розплаву.

У багатьох закордонних розробках вдосконалення ДСП проводиться шляхом поєднання дугового нагріву з нагрівом джерелами тепла від згоряння газу, розчиненого в металі вуглецю та самого металу. Поєднують різні види нагріву шихти з метою економії електроенергії, графітових електропроводів та скорочення часу розплаву шихти. Результатом реалізації цієї концепції є вимушена відмова від усіх технологічних процесів, які раніше проводилися в ДСП з перенесенням їх в установку піч-ковш. Оскільки технологічні процеси плавлення металу в таких печах залежать не від дугового нагріву, а від екзотермічних реакцій, в результаті яких надходить основне тепло для плавлення металу, такі печі вже важко назвати дуговими, а шляхи їхнього вдосконалення – вдосконаленням дугових сталеплавильних печей.

Очевидним напрямком реконструкції ДСП є переведення їх на живлення постійним або імпульсним струмом, що дозволить забезпечити: працездатність печі на довгих дугах, ефективне керування технологічним процесом шляхом контролю параметрів дуги, стійкість горіння дуги, а відповідно й стабільну видачу потужності та менший вплив на систему живлення з погляду коливань і провалів напруги, експлуатаційних кидків струму та особливо несиметрії напруги і струму.

Попри переваги суттєвим недоліком ДСП постійного струму є складність процесів розриву дуг постійного струму, що призводить до виникнення значних перенапруг, які часто є руйнівними для електрообладнання, тому всі комутації здійснюються вимикачами на стороні вищої напруги пічного трансформатора, що суттєво скорочує ресурс вимикачів.

Відомі системи електропостачання ДСП постійного струму [3,6,7] передбачають встановлення одного електроду, внаслідок чого час розтоплення металу помітно зростає, причому за цей час мають місце значні втрати тепла на нагрівання бокових стінок. Другим їхнім недоліком є те, що процес нагрівання відбувається у середині ванни печі безпосередньо під електродом і є суттєво нерівномірним. Ця проблема частково була вирішена [6,7] шляхом встановлення додаткового подового електроду, що забезпечує одночасне перемішування металу в печі, але його наявність значно ускладнює конструкцію печі.

Постановка задачі. З метою часткового усунення недоліків ДСП постійного струму нами запропоновано схему багатоелектродної печі імпульсного струму, в якій розрив струму дуги можливий шляхом підняття електродів. Це дозволяє значно скоротити кількість циклів вимикань пічного агрегату під навантаженням, за рахунок чого суттєво зменшується кратність перенапруг між контактами вимикачів і, відповідно, підвищується їхній ресурс. На рис. 1 показано запропоновану систему електропостачання [5].

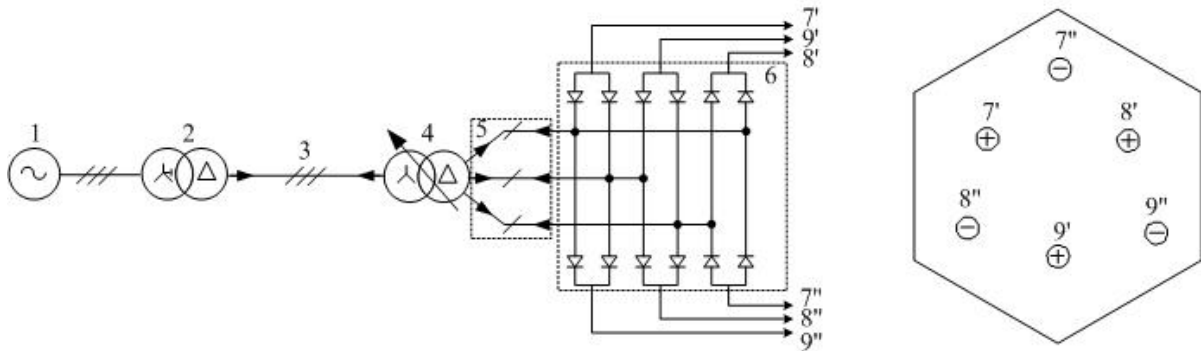


Рис. 1

Схема складається з трифазного джерела живлення – 1, системного трансформатора на 220 кВ з встановленою потужністю 125 МВА – 2, лінії електропередачі – 3, по якій здійснюється передача електроенергії від джерела до споживача, яким є трифазний пічний трансформатор напругою 35 кВ та встановленою потужністю 12,5 МВА – 4, який по лініях 5 живить однофазні мостові некеровані випрямлячі 6, до виводів яких під'єднано групу катодних (7', 8', 9') та анодних (7'', 8'', 9'') електродів, розташованих над поверхнею шихти.

Для забезпечення простоти виконання та експлуатації піч пропонуємо виконати шестикутної форми (рис. 1). Для захисту футеровки печі від перегріву пропонується електроди катодної групи (7', 8', 9'), температура яких на 25–30 % вища за температуру електродів анодної групи (7'', 8'', 9''), розташувати ближче до середини ванни печі, як це показано на рис. 1. Така схема ДСП, завдяки наявності шести рівномірно розподілених над площиною ванни печі електродів, дозволяє вирішити проблему локального перегріву розплаву, що дозволить рівномірно розігріти шихту і суттєво скоротити час розплаву металу. Крім того, запропонована шестиелектродна схема печі у порівнянні з одноелектродними печами [3,6,7] дозволяє зменшити густину струму в електродах і тим самим зменшити їхні розміри та масу, що дозволить суттєво спростити конструкцію електродних тримачів та полегшити умови роботи приводів електродів.

Задача полягає у тому, що для запропонованої вперше шестиелектродної печі імпульсного струму необхідно дослідити періодичні процеси та на їхній основі отримати енергетичні характеристики, що дозволить оцінити її вплив на систему електропостачання в симетричних режимах у сенсі якості електричної енергії (генерування вищих гармонік).

Враховуючи те, що схема системи електропостачання досліджується вперше, то отримання деяких енергетичних характеристик дослідження проведемо шляхом математичного моделювання.

Визначальним і новим елементом математичної моделі є дуги постійного струму, які впливають на перебіг електромагнітних процесів у системі електропостачання, що безперечно відрізняється від дуги змінного струму. Оскільки метою досліджень є вплив дугової печі на електромагнітні процеси в системі живлення (якість енергії) та умови стабільності горіння дуг в печі, то в даному випадку особливу увагу зосереджено на моделюванні динамічної вольтамперної характеристики такої дуги. На підставі багаточисельних експериментів та порівнянь з існуючими характеристиками за своєю суттю найбільш адекватною є характеристика дуги, що описується рівнянням

$$u(i) = 2U_m \sqrt{\left(\frac{i}{I_z} + \frac{I_z}{i}\right)} + K_d U_m \arctg\left(\frac{i}{I_z}\right), \quad (1)$$

де: U_m – максимальна напруга дуги; i – миттєве значення струму дуги; I_z – струм запалювання дуги; K_d – коефіцієнт, який залежить від енергетичних характеристик дуги.

Продиференціювавши вираз (1) за струмом дуги, отримаємо вираз динамічного опору дуги у вигляді

$$r(i) = \frac{du(i)}{di} = \frac{U_m I_z}{I_z^2 + i^2} \left(2 \frac{I_z^2 - i^2}{I_z^2 + i^2} + K_d \right).$$

Враховуючи те, що миттєве значення струму є функцією часу, напруга дуги та динамічний опір дуги також є залежними від часу.

Математичну модель трансформатора сформовано у фазних координатах без приведення до однієї ступені напруги з використанням поділу магнітного потоку на основний та потік розсіювання [4]. Використовується кусково-лінійна апроксимація характеристик намагнічування трансформатора.

Вентильні елементи моделюються їх вольтамперними характеристиками з використанням кусково-лінійної апроксимації у вигляді двох лінійних ділянок, які спряжені в точці початку координат.

Для формування математичної моделі електромагнітних кіл використано метод контурних координат (контурних струмів і контурних магнітних потоків) [4].

$$\Gamma \times \begin{vmatrix} R & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} \times \Gamma_t \times \begin{vmatrix} \vec{i}_K \\ \vec{\psi}_K \end{vmatrix} + \Gamma \times \begin{vmatrix} M & K_{1,2} \\ K_{2,1} & -R_M \end{vmatrix} \times \Gamma_t \times \begin{vmatrix} \frac{d\vec{i}_K}{dt} \\ \frac{d\vec{\psi}_K}{dt} \end{vmatrix} = \Gamma \times \begin{vmatrix} \vec{u} \\ 0 \end{vmatrix},$$

де $K_{1,2}$, $K_{2,1}$ – матриця коефіцієнтів трансформації трансформаторів; Γ , Γ_t – пряма і транспонована матриці контурних з'єднань електричних і магнітних кіл схеми; M – матриця власних і взаємних індуктивностей електричних кіл схеми; R – діагональна матриця резистансів лінійних та нелінійних електричних кіл схеми; \vec{i}_K , $\vec{\psi}_K$ – вектор контурних струмів схеми і контурних поточкозчеплень трансформаторів; \vec{u} – вектор напруги віток схеми; R_M – діагональна матриця питомих (віднесених до квадрату витків первинної обмотки трансформатора) динамічних магнітних опорів магнітних кіл схеми.

З врахуванням запропонованої моделі дуги загальна математична модель з використанням неявного методу формул диференціювання назад (ФДН) [2] запишеться у вигляді:

$$\Gamma \times \begin{vmatrix} Z_{11,k+1}^{(l)} & Z_{12,k+1}^{(l)} \\ Z_{21,k+1}^{(l)} & Z_{22,k+1}^{(l)} \end{vmatrix} \times \Gamma_t \times \begin{vmatrix} \Delta \vec{i}_{K,k+1}^{(l)} \\ \Delta \vec{\psi}_{K,k+1}^{(l)} \end{vmatrix} = \Gamma \times \begin{vmatrix} Z_{11,k+1}^{(l)} & Z_{12,k+1}^{(l)} \\ Z_{21,k+1}^{(l)} & Z_{22,k+1}^{(l)} \end{vmatrix} \times \Gamma_t \times \begin{vmatrix} \vec{i}_{K,k+1}^{(l)} \\ \vec{\psi}_{K,k+1}^{(l)} \end{vmatrix} +$$

$$+ h^{-1} \times \Gamma \times \begin{vmatrix} M_{k+1}^{(l)} & K_{12} \\ K_{21} & -K_{M,k+1}^{(l)} \end{vmatrix} \times \Gamma_t \times \begin{vmatrix} \sum_{s=1}^p a_s \vec{i}_{K,k+1-s}^{(l)} \\ \sum_{s=1}^p a_s \vec{\psi}_{K,k+1-s}^{(l)} \end{vmatrix} + \Gamma \times \begin{vmatrix} \vec{u}_{p,k+1}^{(l)} - a_o^{-1} \sum_{s=1}^p a_s \vec{u}_{C,k+1-s}^{(l)} - \vec{e}_{k+1}^{(l)} \\ 0 \end{vmatrix},$$

$$\begin{vmatrix} \vec{i}_{K,k+1}^{(l+1)} \\ \vec{\psi}_{K,k+1}^{(l+1)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \vec{i}_{K,k+1}^{(l)} \\ \vec{\psi}_{K,k+1}^{(l)} \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} \Delta \vec{i}_{K,k+1}^{(l)} \\ \Delta \vec{\psi}_{K,k+1}^{(l)} \end{vmatrix}$$

де $Z_{11,k+1}^{(l)} = r_{k+1}^{(l)} + a_o h^{-1} M_{k+1}^{(l)} + a_o^{-1} h (C_{k+1}^{(l)})^{-1}$; $Z_{12,k+1}^{(l)} = a_o h^{-1} K_{12}$; $Z_{21,k+1}^{(l)} = a_o h^{-1} K_{21}$;

$Z_{22,k+1}^{(l)} = -a_o h^{-1} K_{M,k+1}^{(l)}$ – елементи матриці Якобі на l -тій ітерації $(k+1)$ -го кроку інтегрування; a_o , a_s – коефіцієнти апроксимуючого поліному методу ФДН; h – крок чисельного інтегрування;

$r_{k+1}^{(l)} = R_{k+1}^{(l)} + \frac{\partial \vec{u}_{p,k+1}^{(l)}}{\partial \vec{i}_{k+1}^{(l)}}$ – матриця резистансів лінійних та нелінійних елементів схеми на l -тій ітерації

$(k+1)$ -го кроку інтегрування; $C_{k+1}^{(l)}$, $r_{k+1}^{(l)}$ – матриця ємностей та лінійних резистансів електричних кіл

на l -тій ітерації $(k+1)$ -го кроку інтегрування; p – порядок методу; $\vec{e}_{k+1}^{(l)}$ – вектор електрорушійних сил

віток схеми на l -тій ітерації $(k+1)$ -го кроку інтегрування; $\vec{u}_{C,k+1-s}^{(l)}$, $\vec{\psi}_{K,k+1-s}^{(l)}$ – вектори напруг ємностей

та поточкозчеплень на l -тій ітерації $(k+1-s)$ -му кроці інтегрування; $\vec{u}_{p,k+1}^{(l)}$ – вектор напруг резистивних

нелінійних елементів схеми (віток дуг ДСП) на l -тій ітерації $(k+1)$ -го кроку інтегрування; $\vec{i}_{K,k+1}^{(l+1)}$,

$\vec{i}_{K,\kappa+1}^{(l+1)}$, $\vec{\psi}_{K,\kappa+1}^{(l)}$, $\vec{\psi}_{K,\kappa+1}^{(l+1)}$ – вектори контурних струмів схеми і контурних поточкозчеплень трансформаторів на l -й та $(l+1)$ -й ітерації $(\kappa+1)$ -го кроку інтегрування; $\Delta\vec{i}_{K,\kappa+1}^{(l)}$, $\Delta\vec{\psi}_{K,\kappa+1}^{(l)}$ – вектори приростів контурних струмів схеми і контурних поточкозчеплень трансформаторів на l -й ітерації $(\kappa+1)$ -го кроку інтегрування; $M_{\kappa+1}^{(l)}$ – матриця власних і взаємних індуктивностей електричних кіл схеми на l -й ітерації $(\kappa+1)$ -го кроку інтегрування.

Струми, поточкозчеплення та напруги на конденсаторах віток після їхнього уточнення на $(l+1)$ -й ітерації визначаємо із співвідношень:

$$\begin{bmatrix} \vec{i}_{\kappa+1}^{(l+1)} \\ \vec{\psi}_{\kappa+1}^{(l+1)} \end{bmatrix} = \Gamma_t \times \begin{bmatrix} \vec{i}_{K,\kappa+1}^{(l+1)} \\ \vec{\psi}_{K,\kappa+1}^{(l+1)} \end{bmatrix}, \quad \vec{u}_{C,\kappa+1}^{(l+1)} = a_o^{-1} \cdot (C_{\kappa+1}^{(l)})^{-1} \cdot h \cdot \vec{i}_{C,\kappa+1}^{(l+1)} - a_o^{-1} \sum_{s=1}^p a_s \vec{u}_{C,\kappa+1-s}^{(l)},$$

де $\vec{i}_{C,\kappa+1}^{(l+1)}$ – вектори струмів віток з конденсаторами на $(l+1)$ -й ітерації $(\kappa+1)$ -го кроку інтегрування.

На основі наведеної математичної моделі сформовано автоматизовану цифрову модель аналізу електромагнітних процесів у миттєвих координатах з використанням програмного середовища Delphi. Розроблена цифрова модель на основі вхідної інформації (таблиці з'єднань графа схеми, пасивних параметрів віток схеми, характеристик джерел живлення і таблиці взаємоіндуктивних зв'язків між вітками) шляхом виконання математичних операцій над матрицями формує в автоматичному циклі систему алгебро-диференціальних рівнянь.

Розв'язання задачі. На даному етапі з метою отримання деяких показників електромагнітної сумісності та якості електроенергії обмежимося дослідженням симетричних режимів, що дозволить спочатку отримати наближені енергетичні характеристики як електричних дуг печі, так і системи електропостачання для конкретних параметрів обладнання (пічного трансформатора, короткої мережі, обладнання системи електропостачання і т.п.). В реальних умовах симетрія не є характерною для таких печей, однак із теоретичних міркувань дана інформація є актуальною, оскільки на її основі можна здійснити оцінку технічних параметрів основного електрообладнання системи електропостачання печі (кабелів, повітряних ліній, електротехнічного обладнання).

На рис. 2 показано осцилограми напруги та струму електродів катодної та анодної груп для однієї з фаз, при цьому емісійні ефекти електродів та розтоплюваного металу до уваги не бралися, що, безперечно, вносить певну похибку в остаточні результати.

Як видно з рис. 2, струм через електроди є імпульсним, що дозволяє забезпечити безпечно відключення печі (розрив дуги) за час спадної характеристики та безструмової паузи – 3,3 мс шляхом підняття електродів. Час горіння дуги дорівнює 16,7 мс, що складає 83,55 % періоду промислової частоти. Напруга на електродах (рис. 2) має менші пульсації порівняно зі струмом, що забезпечує стійке горіння дуги.

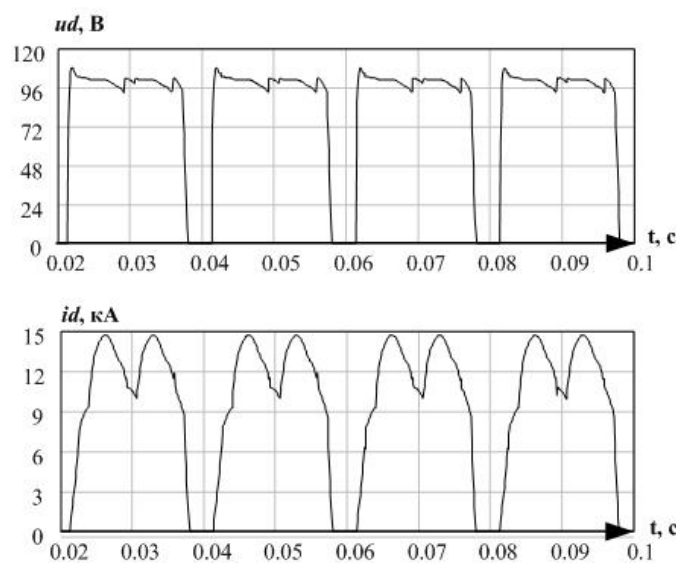


Рис. 2

З погляду ефективності запропонованої конструкції печі важливою є оцінка потужності, яку споживає кожна дуга, бо від неї суттєво залежить час розплаву шихти. З цієї метою виконано чисельні експерименти роботи ДСП в симетричному режимі з коефіцієнтом трансформації пічного трансформатора, що дорівнює 35.

Форма миттєвої активної потужності, що споживається дугами під електродами, повторює форму кривої струму (рис. 2). Середнє значення активної потужності, що споживається кожною дугою, дорівнює 936 кВт. Під кожним електродом мають місце короткочасні паузи миттєвих значень потужностей, які становлять 16–17 % від періоду промислової частоти, при цьому амплітуда миттєвої потужності досягає 1,5 МВт. За рахунок зсуву в часі потужностей кожної з дуг сумарна активна потужність ДСП має неперервний характер і ко-

ливається в межах від 4 до 7,5 МВт навколо середнього значення 5,616 МВт.

Наступною важливою задачею є виявлення складу та величини гармонік у струмах дуг, системі 35 кВ, обмотках трансформаторів та системі 220 кВ.

За умови повної симетрії в системі живлення та печі через глибоку нелінійність динамічних характеристик дуг форма струмів спотворюється, при цьому переважаючими є 5-та (5,37 %) та 7-ма (2,29 %) гармоніки відносно першої гармоніки. Такий гармонічний склад струмів є сталим для всіх ділянок електричної мережі.

На основі аналізу гармонійного складу одержано процентне відношення величини 5-ї та 7-ї гармонік до величини основної гармоніки (процентний склад) струму для різних ділянок електричної мережі (таблиця). У таблиці наведено величини переважаючих гармонік, однак крім цих гармонік присутні 3-тя, 9-та і 11-та гармоніки, коефіцієнт яких у сукупності не перевищує 1 %, тому їхній вплив на електричну мережу є незначним.

Назва ділянки електричної мережі	Величина гармонік струму, %	
	5-та	7-ма
Джерело живлення	5,37	2,29
Обмотки системного трансформатора	5,59	2,34
Лінія електропередачі 35 кВ	5,6	2,37
Обмотки пічного трансформатора	5,65	2,4
Лінія живлення випрямлячів	5,68	2,46

Як видно з таблиці, процентний склад 5-ї та 7-ї гармонік в струмах віток схеми зростає, по мірі наближення до пічного агрегата і його величина в струмах фаз лінії живлення випрямлячів сягає 5,68 % для 5-ї та 2,46 % для 7-ї гармоніки, що відповідно на 5,7 % та 7,4 % більше за їхній процентний склад у струмах фаз джерела живлення.

На рис. 3 показано залежності процентного складу струмів 5-ї та 7-ї гармонік від напруги дуги. Як видно з рисунка, величина амплітуди гармонік зростає майже параболічно із збільшенням напруги, а відповідно й із збільшенням довжини дуги. На відміну від 7-ї гармоніки, залежність 5-ї гармоніки від напруги дуги характеризується більшою крутизною, що призводить до зростання 5-ї гармоніки в живлячій мережі.

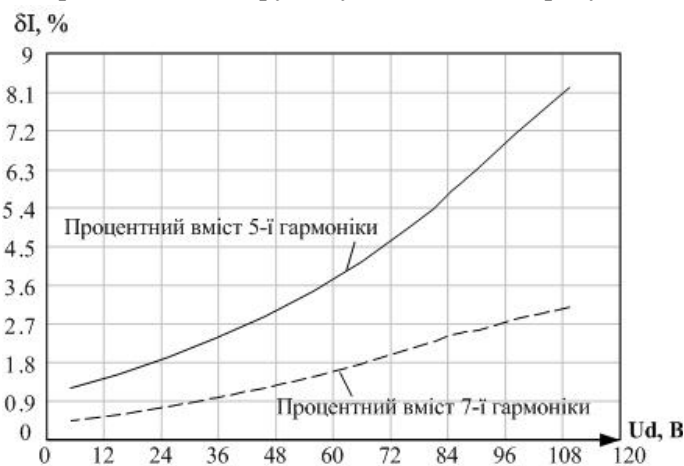


Рис. 3

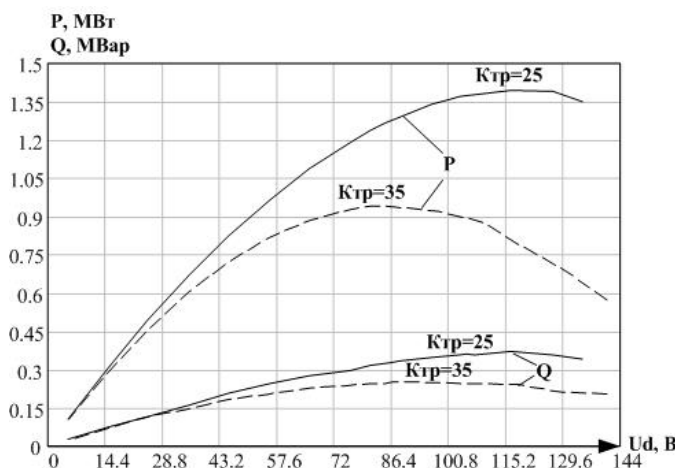


Рис. 4

Для отримання оцінки енергетичної ефективності ДСП на рис. 4 покажемо залежності величини активної та реактивної потужностей від середнього значення напруги дуги одного з електродів ДСП для різних положень анцапф РПН (різних коефіцієнтів трансформації $K_{тр}$) пічного трансформатора, отримані шляхом математичного моделювання. Як видно з рис. 4, зростання напруги дуги (збільшення довжини дуги шляхом підйому електродів над поверхнею шихти) призводить до зростання потужності, яка виділяється в ДСП. Однак характеристики потужності мають точки екстремуму, після досягнення яких ріст напруги дуги призводить до зменшення потужності. Саме ця максимальна потужність повинна братися до уваги під час вибору потужності джерела живлення ДСП, діаметра електродів, вибору параметрів системи електропостачання ДСП та компенсуючих пристроїв. Потужність, яка споживається запропонованою ДСП, досить легко регулювати за допомогою зміни положення РПН пічного трансформатора або шляхом зміни довжини дуги (рис. 4), що дозволяє

легко керувати електротермічними процесами всередині печі.

За даних параметрів системи електропостачання та навантаження печі коефіцієнт потужності становить 0,878, що вказує на необхідність компенсації реактивної потужності.

Для експлуатації ДСП імпульсного струму важливим параметром є тривалість безструмової паузи, яка, з одного боку, повинна бути достатньою для успішного розриву дуги в разі підняття електродів, а, з другого, – забезпечувати максимальну електричну потужність дуги під електродами печі. З цією метою доцільно побудувати залежності тривалості безструмової паузи в струмі дуги від сталої часу короткої мережі сталеплавильної печі (рис. 5) при сталій напрузі дуги для різних коефіцієнтів трансформації пічного трансформатора.

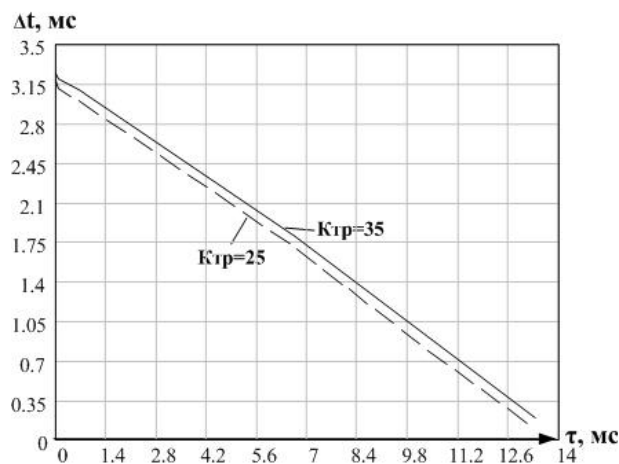


Рис. 5

Як видно з рис. 5, залежності мають лінійний характер. Тривалість безструмової паузи зменшується із збільшенням індуктивності короткої мережі, а отже й із збільшенням сталої часу. Під час збільшення коефіцієнта трансформації пічного трансформатора за незмінних параметрів короткої мережі тривалість безструмової паузи зростає.

Висновки. На основі аналізу результатів досліджень симетричних режимів роботи шести-електродної дугової елетропечі імпульсного струму можна зробити наступні висновки:

1. Тривалість безструмової паузи лінійно залежить від сталої часу, а отже й від індуктивності короткої мережі, причому збільшення сталої часу (збільшення індуктивності) короткої мережі призводить до зменшення тривалості безструмової паузи.

2. Середня величина активної потужності печі для прийнятих вихідних даних становить 5,616 МВт. Відносно неї мають місце викиди в межах $1,616 \div 1,884$ МВт.

3. Рівень 5-ї та 7-ї гармонік залежить від напруги дуги, причому із збільшенням напруги їхня величина зростає.

4. У зв'язку із імпульсним характером струму і напруги дуг крім активної потужності піч споживає і реактивну потужність, при цьому максимуми активної і реактивної потужностей печі співпадають, а коефіцієнт потужності печі зростає зі зростанням напруги дуги.

5. За допомогою зміни коефіцієнта трансформації пічного трансформатора можна задавати крутизну характеристик активної та реактивної потужностей дугової сталеплавильної печі.

1. *Малиновский В.С., Власова И.Б.* Универсальные дуговые печи постоянного тока нового поколения – высокоэффективное оборудование для литейно-металлургических производств // *Металл Экспо.* – 2005. – №6. – С. 12–15.

2. *Перхач В.С.* Математические задачи электроэнергетики. Изд. 3-е, перераб. и доп. – Львов: Выща шк. Изд-во при Львов. ун-те. 1989. – 464 с.

3. *Проскудин В.Н., Болоташивили А.А., Салон В.И., Пентегов И.В., Стешковский Е.П., Шейковский Д.А.* Источник питания постоянного тока плавильной печи на базе трех однофазных выпрямителей // *Техн. электродинамика.* – 2007. – № 6. – С. 39–43.

4. *Шидловський А.К., Перхач В.С., Скрипник О.І.* Енергетичні системи з електропередачами та вставками постійного струму. – К.: Наукова думка, 1992. – 288 с.

5. *Патент № 27758.* Система електропостачання дугової електропечі постійного струму / В.С.Гудим, Р.І.Стасьо, С.В.Кшижак.

6. *Патент РФ № 2104450.* Способ электроплавки и дуговая печь для его осуществления / В.С.Малиновский.

7. *Патент РФ №2048662.* Способ электроплавки и дуговая печь для его осуществления / В.С.Малиновский.

Надійшла 04.02.2010