

## АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В НЕЛІНІЙНО-ПАРАМЕТРИЧНОМУ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОМУ КОЛІ ПРИ ДІЇ НЕСИНУСОЇДНОЇ ВХІДНОЇ НАПРУГИ

*В статті запропоновано нелінійно-параметричну математичну модель кола з електролізером осадження металів з урахуванням індуктивності кола, катодних та анодних процесів, а також зміни у часі активного опору електроліту. На основі чисельного розв'язку системи рівнянь електромагнітного стану кола отримано часові залежності прикатодного спаду напруги та середнього значення струму осадження металу в електролізері нікелювання при живленні кола від джерела трипульсової випрямленої несинусоїдної напруги.*

*В статье предложена нелинейно-параметрическая модель цепи с электролизером осаждения металлов учитывающая индуктивность цепи, катодные и анодные процессы, а также изменение во времени активного сопротивления электролита. На основе численного решения системы уравнений электромагнитного состояния цепи получены временные зависимости прикатодного падения напряжения и среднего значения тока осаждения металла в электролизере никелирования при питании цепи от источника трехпульсовой выпрямленной несинусоидальной напряжения.*

Розробка і впровадження різноманітних імпульсних джерел живлення електротехнічних комплексів електроосадження металів створює широкі можливості вибору того чи іншого режиму роботи таких джерел, котрі різняться між собою формою та значеннями вхідного струму або напруги. Вибір зазначеного режиму виконують на основі технологічних вимог до властивостей осаджуваного покриття, а також виходячи з необхідної швидкості осадження. Тобто постає задача прогнозування вказаних вище показників. Як правило, її розв'язують шляхом математичного моделювання, складаючи електричну схему заміщення електролізера та відповідні рівняння електромагнітного стану кола. Розробку сучасних моделей електролізерів осадження металів було започатковано в роботі [1] й продовжено в роботах [2] – [4] та ряді інших.

Зазначені моделі представляють собою нелінійні кола, котрі містять не менш двох реактивних елементів, причому усім без виключення моделям притаманний той недолік, що вони не враховують зміну у часі активного опору електроліту а отже і відповідну зміну у часі протягом робочої зміни гальваноцеху електричних величин, пов'язаних з якістю і швидкістю нанесення покриттів. Тому метою цієї роботи є розробка нелінійно-параметричної моделі кола з електролізером імпульсного осадження металу та аналіз цього кола чисельним методом з метою отримання часових залежностей основних електричних величин, пов'язаних з якістю та швидкістю нанесення металевих покриттів, зокрема прикатодного спаду напруги та середнього значення струму осадження металу.

При побудові схеми заміщення кола з електролізером (рис. 1) враховано явища осадження металу на катоді та анодне розчинення металу (цим явищам еквівалентні відповідні нелінійні елементи  $HP_{МК}$  та  $HP_{МА}$ ), утворення подвійного шару зарядів біля поверхні катоду та аноду ( $C_K$ ,  $C_A$ ), створення змінного магнітного поля струмом в електроліті ( $L$ ) та теплові втрати в електроліті ( $R(t)$ ). Одночасно, процесом виділення водню на катоді знехтувано, як другорядним у порівнянні з процесом осадження металу.

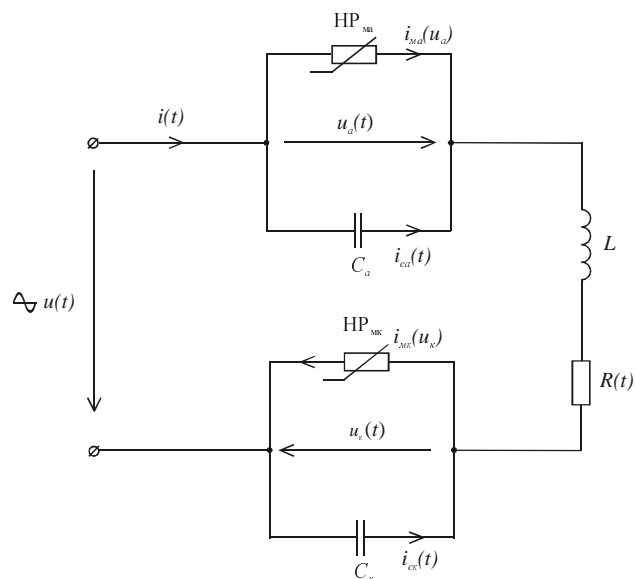


Рис. 1. Схема заміщення кола з електролізером осадження металу

Математично вхідну несинусоїдну трипульсову напругу (рис. 2, крива 1) описує залежність

$$u(t) = \begin{cases} U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) & \omega t \in \left[0, \frac{2\pi}{3}\right] \\ U_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) & \omega t \in \left[\frac{2\pi}{3}, \frac{4\pi}{3}\right] \\ U_m \sin\left(\omega t + \frac{7\pi}{6}\right) & \omega t \in \left[\frac{4\pi}{3}, 2\pi\right] \end{cases}, \quad (1)$$

де  $U_m$  – амплітуда фазної напруги трифазного джерела.

При розрахунках залежність (1) апроксимуємо першими трьома гармоніками її ряду Фур'є – нульовою, третьою та шостою (рис. 2, крива 2), тобто

$$u(t) = \frac{3\sqrt{3} U_{\max}}{\pi} \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{8} \cos 3\omega t - \frac{1}{35} \cos 6\omega t \right), \quad (2)$$

де  $U_{\max}$  – максимальне значення вхідної напруги.

Для випадку, коли характеристики нелінійних резистивних елементів  $HP_{МК}$  та  $HP_{МА}$  апроксимовано

неповним кубічним поліномом, а залежність зміни у часі активного опору електроліту лінійною функцією  $R(t) = k_1 + k_2 \cdot t$ , система рівнянь електромагнітного стану кола має вигляд

$$i(t) = i_{\text{МК}}(t) + i_{\text{СК}}(t), \quad (3)$$

$$i_{\text{МК}}(t) = z_1 \cdot u_{\text{К}}(t) + z_3 \cdot u_{\text{К}}^3(t), \quad (4)$$

$$i_{\text{СК}}(t) = C_{\text{К}} \frac{du_{\text{К}}(t)}{dt}, \quad (5)$$

$$i(t) = i_{\text{Ма}}(t) + i_{\text{Са}}(t), \quad (6)$$

$$i_{\text{Ма}}(t) = z_1 \cdot u_{\text{а}}(t) + z_3 \cdot u_{\text{а}}^3(t), \quad (7)$$

$$i_{\text{Са}}(t) = C_{\text{а}} \frac{du_{\text{а}}(t)}{dt}, \quad (8)$$

$$u(t) = u_{\text{К}}(t) + u_{\text{а}}(t) + R(t) \cdot i(t) + L \frac{di(t)}{dt}. \quad (9)$$

Початкові умови:

$$u_{\text{К}}(0) = 0, \quad u_{\text{а}}(0) = 0, \quad i(0) = 0. \quad (10)$$

В рівняннях (3) – (10):  $i(t)$  – повний струм кола з електролізером  $i_{\text{МК}}(t)$ ,  $i_{\text{Ма}}(t)$  – часткові струми осадження металу на катоді та розчинення аноду;  $i_{\text{СК}}(t)$ ,  $i_{\text{Са}}(t)$  – ємнісні струми катоду та аноду;  $u_{\text{К}}$ ,  $u_{\text{а}}$  – приелектродні спади напруги; (катодна та анодна поляризації);  $C_{\text{К}} = C_{\text{а}} = C_0 \cdot S$  – ємності, еквівалентні утворенню приелектродних шарів зарядів;  $L$  – індуктивність кола;  $C_0$  – питома ємність електроду;  $S$  – питома ємність електроду;  $z_1$ ,  $z_3$  – коефіцієнти апроксимації.

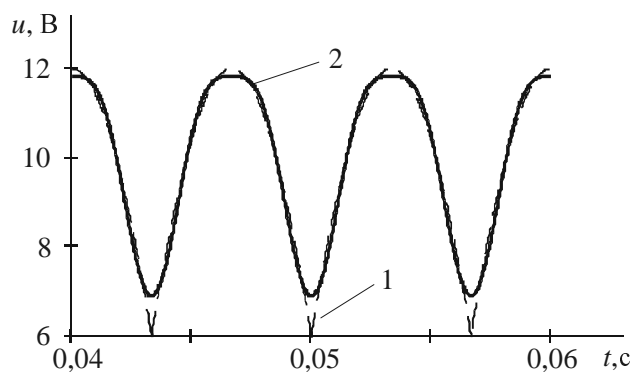


Рис. 2 Вхідна трипульсова несинусоїдна напруга (1) та її апроксимація (2)

Систему рівнянь (3) – (10) можна звести до нелінійного диференційного рівняння третього порядку складеного відносно прикатодного спаду напруги. Розв'язок зазначеного рівняння отримано чисельним методом Рунге – Кутта на ПЕОМ з використанням існуючих функцій математичної системи Maple. В якості прикладу розрахунок виконано для кола з електролізером нікелювання. Параметри схеми заміщення запозичено з [4] – [6] і складають:  $C_0 = 8 \cdot 10^{-5}$  Ф/см<sup>2</sup>;  $S = 10000$  см<sup>2</sup>;  $L = 42$  мкГн;  $U_{\text{max}} = 12$  В. Коефіцієнти апроксимації характеристик (рис. 4):  $z_1 = 8,0$  См  $z_3 = 609,5$  См<sup>1/3</sup>,  $k_1 = 0,08$  Ом;  $k_2 = 1,665 \cdot 10^{-5}$  Ом/с. Результати розрахунків представлено на рис. 3, 4 та 5. Як бачимо з рис. 3, часова залежність прикатодного спаду напруги є несинусоїдною, з періодом котрий

дорівнює періоду вхідної напруги. Слід також відзначити набагато менший діапазон зміни значень прикатодного спаду напруги у порівнянні з випадками живлення аналогічних кіл від джерел однофазної несинусоїдної напруги.

Так, наприклад, в роботі [7] розглянуто електромагнітні процеси у колі з електролізером нікелювання при живленні від джерела однопівперіодної несинусоїдної напруги. Як показують результати розрахунків, діапазон зміни значень прикатодного спаду напруги, згідно формули

$$\Delta U_{\text{К}} = U_{\text{Кmax}} - U_{\text{Кmin}}, \quad (11)$$

де  $U_{\text{Кmax}}$ ,  $U_{\text{Кmin}}$  – максимальне та мінімальне значення прикатодного спаду напруги, складає  $\Delta U_{\text{К}} = 0,48$  В. В роботі [8] також досліджено процеси у колі з електролізером залізнення при його живленні від джерела двопівперіодної несинусоїдної напруги. У цьому випадку  $\Delta U_{\text{К}} = 0,17$  В. Одночасно, як бачимо з рис. 3, у разі використання трифазної випрямленої напруги  $\Delta U_{\text{К}} = 0,06$  В, що свідчить про те, що отримані в цьому випадку шари покриттів будуть ближчими за своїми властивостями до таких, що осаджені на постійному струмі.

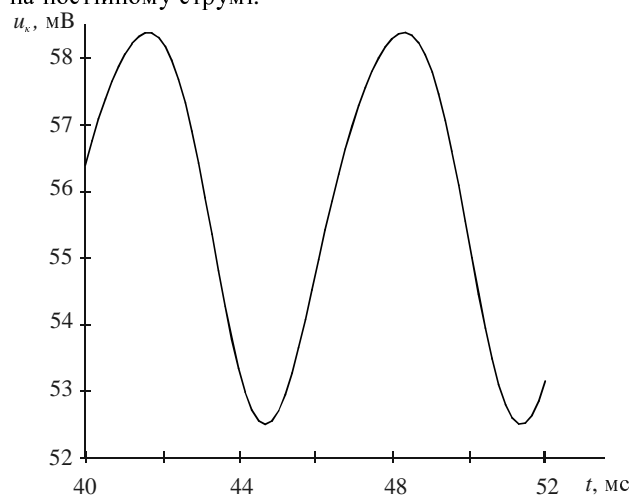


Рис. 3. Часова залежність прикатодного спаду напруги у колі рис. 1

Зростання у часі активного опору електроліту, яке відбувається внаслідок поступового зменшення концентрації іонів в електроліті, призводить до поступового зменшення максимального  $U_{\text{Кmax}}$  (рис. 4 крива 1) та мінімального  $U_{\text{Кmin}}$  (рис. 4 крива 2) значень прикатодного спаду напруги відповідно з 0,585 В до 0,36 В та з 0,525 В до 0,34 В протягом 4 годин, що зумовлює поступове збільшення зернистості покриття. Одночасно знижується і продуктивність електролізера, оскільки зменшується середнє значення струму осадження металу з 110 А на початку зміни до 36 А її середині.

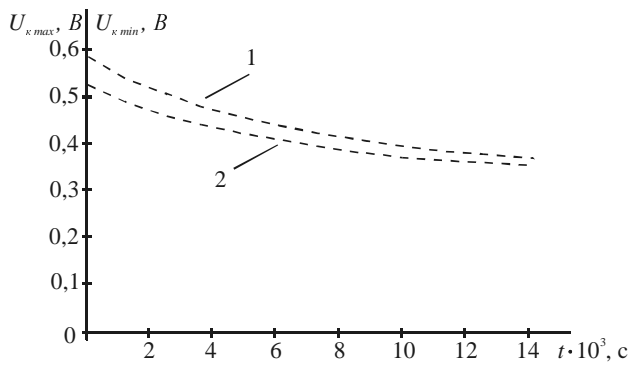


Рис. 4. Часові залежності максимального (1) та мінімального (2) значень прикатодного спаду напруги

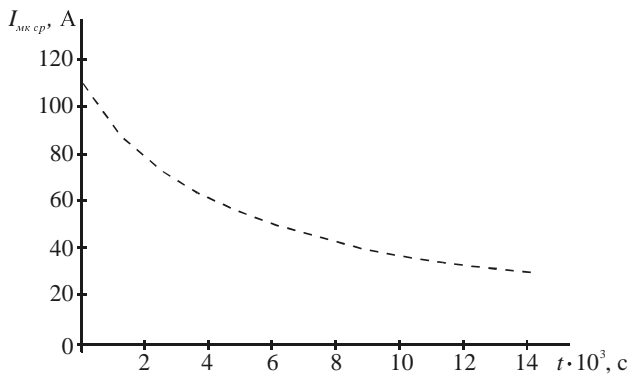


Рис. 5. Часова залежність середнього значення струму осадження в електролізері нікелювання

### ВИСНОВКИ

1. Результати розрахунків показують, що при живленні електролізера від джерела несинусоїдної напруги, зміна у часі активного опору електроліту суттєво впливає на електричні величини, пов'язані з показниками якості та кількісного зростання осаджуваних покриттів. Тому необхідна розробка відповідних моделей кіл зазначеного типу з метою вірного прогнозування таких показників.

2. Нагальною проблемою, що постає при моделюванні електрохімічних кіл, є розробка і вдосконалення існуючих чисельних та аналітичних методів їх аналізу, оскільки використання існуючих стандартних чисельних алгоритмів потребує занадто великого часу розрахунку (близько 17 годин для отримання залежностей рис. 4 та 5 на ПЕОМ середнього рівня). Серед аналітичних методів розрахунку нелінійних та параметричних кіл найбільш перспективним у цьому плані є адаптація для розв'язання такої задачі методу перетворення двох змінних [3], але при цьому схемі заміщення рис. 1 доведеться спрощувати, залишаючи лише два реактивні елементи і нехтуючи при цьому окремими явищами у колі.

3. Хоча модель, побудована на основі схеми заміщення рис.1, і є однією з таких, що найбільш повно враховують процеси, наявні у колах з електролізерами осадження металів, проте вона зберігає відомі принципи обмеження щодо перспектив розв'язування ряду задач і, зокрема, можливостей передбачити рівномірність розподілу струму а отже і металу по поверхні електроду, що є однією з головних проблем тех-

нічної електрохімії. Не менш важливою серед невирішених є і проблема забезпечення електромагнітної сумісності імпульсних напівпровідникових джерел живлення. Зауважимо також, що при створенні моделей кіл електролітичного осадження металів слід рахуватись також із труднощами отримання параметрів для схем заміщення електролізерів різних типів. Перспективним шляхом подолання цих складностей є розробка моделей нового типу, що базуються на рівняннях електромагнітного поля в електролізері а також враховують електромагнітні процеси, що протікають в несинусоїдних джерелах живлення відповідних електротехнічних комплексів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Костин Н.А. Теоретическое обоснование и разработка технологических режимов электроосаждения металлов импульсным током: Дисс... д-ра техн.наук: 05.17.03. – Днепропетровск, 1983. – 458 с.
2. Костин Н.А., Бондарь О.И., Михайленко Ю.В., Артемчук В.В. Моделирование процесса электролитического осаждения железа при восстановлении деталей подвижного состава // Технічна електродинаміка. Темат. вип. "Моделювання електронних, енергетичних та технологічних систем". – 1999. – Ч. II. – С. 35 – 38.
3. Бондар О.І. Аналіз електричних кіл з нелінійними електрохімічними елементами методом перетворення змінних: Дисс... канд. техн. наук: 05.09.05. – Дніпропетровськ, 2006. – 181 с.
4. Бондар О.І. Електромагнітні процеси в нелінійному електрохімічному колі з трьома реактивними елементами при імпульсній вхідній напругі // Електротехніка і електромеханіка. – 2007. – №. 5. – С. 34 – 36.
5. Каданер Л.И. Справочник по гальваностегии. К.: Техніка, 1976. – 253 с.
6. Багоцкий В.С. Основы электрохимии.– М.:Химия, 1988. – 400 с.
7. Бондар О.І. Усталені процеси в колі з нелінійним електрохімічним елементом при дії несинусоїдної вхідної напруги // Електротехніка і електромеханіка. – 2004. – №. 3. – С. 68 – 72.
8. Бондар О.І., Костін. М.О. Коливальні процеси в нелінійному електрохімічному колі при імпульсному збудженні // Технічна електродинаміка. – 2003. – №3. – С. 6 – 10.

Надійшла 15.12.2008

Бондар Олег Ігорович

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна  
Україна, 49010, Дніпропетровськ,  
вул. Акад. В.А. Лазаряна, 2, "ДІТ",  
кафедра "Теоретичні основи електротехніки"  
тел. (056) 373-15-37, e-mail: olbond36@mail.ru