

## ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ В НЕЛІНІЙНОМУ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОМУ КОЛІ З ТРЬОМА РЕАКТИВНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ ПРИ ДІЇ ІМПУЛЬСНОЇ ВХІДНОЇ НАПРУГИ

Бондар О.І., к.т.н.

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна  
Україна, 49010, Дніпропетровськ, вул. Акад. В.А. Лазаряна, 2, "ДІТ", каф. "Теоретичні основи електротехніки"  
тел. (056) 373-15-37, E-mail: evm@diit.dp.ua

*В статті представлено уточнену математичну модель електролізера осадження металів з урахуванням катодної та анодної ємності, а також індуктивності електроліту. Отримано часові залежності основних електричних величин, які є показниками кількісного зростання та якості металевих покриттів. Наведено результати експериментальної перевірки адекватності розробленої моделі.*

*В статье представлена уточненная математическая модель электролизера осаждения металла с учетом катодной и анодной емкостей, а также индуктивности электролита. Получены временные зависимости электрических величин, которые являются показателями количественного роста и качества металлических покрытий. Приведены результаты экспериментальной проверки адекватности полученной модели.*

Актуальність задачі аналізу нелінійних електричних кіл обумовлена передусім широким практичним використанням в сучасній електротехніці нелінійних пристроїв та систем. Процеси в окремих класах таких систем є на сьогодні малодослідженими. Так, наприклад, у колах з електролізерами імпульсного електроосадження металів з технологічних позицій необхідним є пошук ефективних режимів роботи імпульсного джерела енергії при осадженні покриття заданого типу. Тобто необхідно визначити форму та тривалість імпульсів джерела в процесі осадження, які забезпечать необхідні фізико-механічні властивості отриманого шару покриття з мінімальною тривалістю процесу осадження. Як правило таке завдання розв'язують шляхом математичного моделювання. При цьому вибір здійснюють за результатами розв'язання нелінійної диференційної системи рівнянь електромагнітного стану модельованого кола, порівнюючи їх з відомими електричними показниками якості та швидкості зростання осадженого покриття. Різноманітність осаджуваних металів, складу електролітів та габаритів електролізерів зумовлює необхідність врахування в моделі тих чи інших процесів, тому моделі мають відмінності. На сьогодні розроблено ряд моделей таких кіл, загальною особливістю яких є наявність у складі схеми модельованого кола двох енергоємних елементів. Так, наприклад, в роботах [1] та [2] представлено моделі кіл з електролізерами, які містять два ємнісних елементи, що заміщують поляризаційні процеси в при катодному та при анодному шарах електроліту. При цьому явищем утворення магнітного поля (тобто наявністю індуктивності системи) нехтували як другорядним по відношенню до розглянутих. Проте, як показали експериментальні дослідження в лабораторних та виробничих [3] умовах, таке нехтування при високій швидкості наростання імпульсу джерела призводить до суттєвого "завалювання" фронту поляризуючого імпульсу струму, що призводить до отримання завищених розрахункових значень максимуму прикатодного спаду напруги та середнього струму осадження і необхідності зменшення завантаження електролізера по

відношенню до передбачених значень. Зазначені причини викликали необхідність розробки моделей, які враховують хоча б наближено індуктивність таких систем. Так, в роботі [4] представлено модель та розрахунок процесів у колі з електролізером осадження металу з врахуванням індуктивності електроліту. Але ця модель справедлива лише для систем з неполярним знехтуваним анодом, при моделюванні яких припустимо знехтувати анодними процесами. В роботі [5] представлено між іншим схему заміщення електролізера, що враховує катодні та анодні процеси, а також індуктивність електроліту, але відповідну математичну модель не розроблено, оскільки це не входило до задач цього дослідження. Отже, метою цієї роботи є розробка математичної моделі кола з електролізером імпульсного осадження металів, яка відрізняється від існуючих урахуванням катодної та анодної ємності, а також індуктивності електроліту з метою уточненого визначення електричних показників якості та швидкості нанесення металевих покриттів.

Схему заміщення кола з електролізером представлено на рис 1,а. У ній відображено процеси розчинення аноду ( $R_a$ ) утворення подвійного шару зарядів біля поверхні аноду ( $C_a$ ), теплові втрати в електроліті ( $R$ ), створення магнітного поля змінним у часі струмом ( $L$ ), катодне накопичення зарядів ( $C_k$ ) і безпосередньо процес осадження металу (нелінійний елемент  $HP_{mk}$ ). При розробці цієї схеми використано припущення про другорядність процесу виділення водню у порівнянні з процесом осадження металу.

Вхідна напруга – імпульсна однополярна (рис. 1,б). Математично її описує вираз:

$$u(t) = \begin{cases} U_{\max} & t \in [0..T] \\ 0 & t \in [T..T] \end{cases}, \quad (1)$$

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

Тоді, якщо характеристику нелінійного резистивного елемента  $HP_{mk}$  апроксимувати неповним кубічним поліномом, система рівнянь електромагнітного стану кола запишеться у вигляді

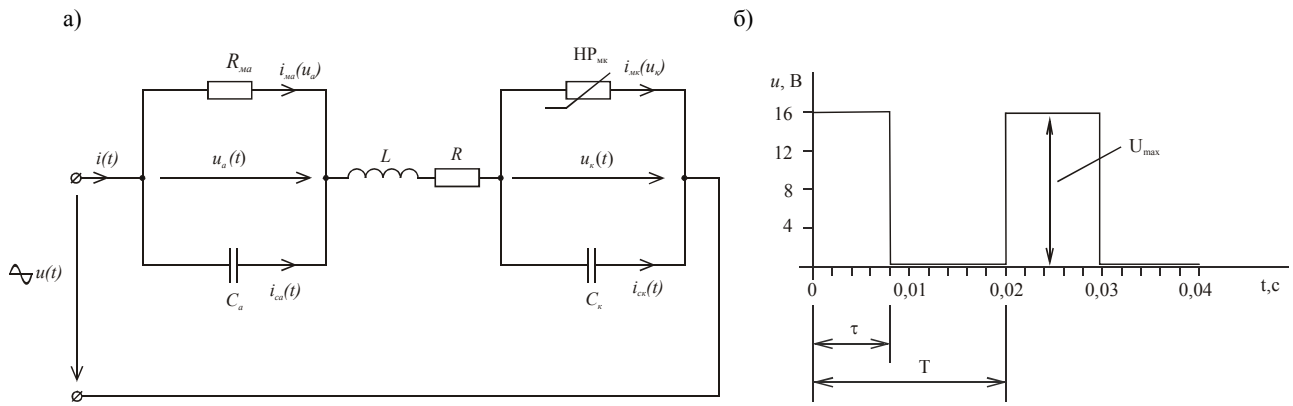


Рис. 1. Схема заміщення електролізера (а) та часова залежність вхідної імпульсної однополярної напруги (б)

$$i(t) = i_{\text{МК}}(t) + i_{\text{СК}}(t), \quad (2)$$

$$i(t) = i_{\text{Ма}}(t) + i_{\text{Са}}(t), \quad (3)$$

$$u(t) = u_{\text{к}}(t) + u_{\text{а}}(t) + R \cdot i(t) + L \frac{di(t)}{dt}, \quad (4)$$

$$i_{\text{МК}}(t) = z_1 \cdot u_{\text{к}}(t) + z_3 \cdot u_{\text{к}}^3(t), \quad (5)$$

$$i_{\text{Ма}}(t) = \frac{u_{\text{а}}(t)}{R_{\text{а}}}, \quad (6)$$

$$i_{\text{Са}}(t) = C_{\text{а}} \frac{du_{\text{а}}(t)}{dt}, \quad (7)$$

$$i_{\text{СК}}(t) = C_{\text{к}} \frac{du_{\text{к}}(t)}{dt}. \quad (8)$$

Незалежні початкові умови:

$$u_{\text{к}}(0) = 0, \quad u_{\text{а}}(0) = 0, \quad i(0) = 0. \quad (9)$$

В наведених рівняннях:

$i(t)$  – повний струм електролізера;

$i_{\text{МК}}(t)$  – частковий струм розряду іонів металу на катоді

$$i_{\text{МК}}(t) = S \cdot j_{\text{МК}}(t), \quad (10)$$

де  $j_{\text{МК}}(t)$  – густина струму розряду іонів металу на катоді;  $S$  – площа електродів;  $i_{\text{Ма}}(t)$  – частковий струм розчинення іонів металу на аноді;  $i_{\text{СК}}(t)$ ,  $i_{\text{Са}}(t)$  – ємнісні струми катоду та аноду;  $u_{\text{к}}$ ,  $u_{\text{а}}$  – при катодний та при анодний спади напруги; (катодна та анодна поляризації).

$C_{\text{а}}$ ,  $C_{\text{к}}$  – ємності подвійних (катодного та анодного) шарів зарядів, що дорівнюють

$$C_{\text{к}} = C_{\text{а}} = C_0 \cdot S, \quad (11)$$

де  $C_0$  – питома ємність електроду;  $R_{\text{а}}$  – активний опір аноду;  $R$  – активний опір електроліту

$$R = \rho \cdot \frac{d}{S}, \quad (12)$$

де  $\rho$  – питомий активний опір електроліту;  $d$  – відстань між електродами;  $z_1$ ,  $z_3$  – коефіцієнти апроксимації поляризаційної кривої для границі катод – електроліт;  $L$  – індуктивність електроліту.

В загальному випадку обчислення індуктивності подібних систем є складною задачею, що пов'язана з обчисленням електромагнітного поля ванни. Але за вказаних вище причин потрібна хоча б спрощена методика, котра дозволить оцінити індуктивність елект-

ролізера. Для оцінки індуктивності гальванічної ванни з електролітом будемо розглядати її як прямолінійний провідник прямокутного перерізу і обмеженої довжини (рис. 3), як це запропоновано в [5].

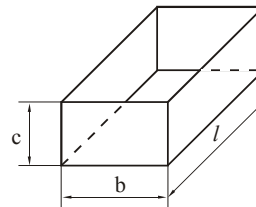


Рис. 3. Схематичне зображення гальванічної ванни для визначення індуктивності її електроліту

Тоді, згідно з [5], її індуктивність при дії постійного струму і невисоких частотах дорівнює

$$L_1 = \frac{\mu_0 l}{2 \cdot \pi} \left( \ln \frac{2l}{b+c} + \frac{1}{2} \right), \quad (13)$$

де  $l$  – довжина ванни;  $b$  і  $c$  – відповідно ширина і висота;  $\mu_0$  – магнітна постійна.

Систему рівнянь (2) – (9) розв'язано чисельно, за допомогою стандартних функцій математичного пакета Maple. Розрахунок виконано для електролізера нікелювання при наступних розрахункових даних  $C_0 = 8 \cdot 10^{-5}$  Ф/см<sup>2</sup>;  $S = 10000$  см<sup>2</sup>;  $\rho \cdot d = 800$  Ом·см<sup>2</sup>;  $U_{\text{макс}} = 16$  В. Коефіцієнти апроксимації у відповідності до нелінійної характеристики (рис. 4):  $z_1 = 8,0$  См  $z_3 = 609,5$  См<sup>3/2</sup>. Порівняння результатів розрахунку системи рівнянь (2) – (9) для при катодного спаду напруги (рис. 5) та часткового струму осадження (рис. 6) з чисельним розрахунком аналогічної моделі без врахування індуктивності електроліту ( $L = 0$ ), а також з результатами лабораторного експерименту (рис. 5 та 7) свідчать, по-перше, про адекватність математичної моделі, що описана рівняннями (2) – (9), а також про суттєві розбіжності між експериментальними даними та чисельним розрахунком при  $L = 0$  по швидкості зростання та спаду функцій  $u_{\text{к}}(t)$  та  $i_{\text{к}}(t)$ . При зменшенні тривалості поляризуючого імпульсу вхідної напруги тривалості поляризуючого імпульсу вхідної напруги зростають розбіжності також і в максимальному значенні при катодного спаду напруги та середньому значенні струму осадження, які виявляються завищеними у розрахунках при  $L = 0$ . Індуктивність, яку наближено оцінено за формулою (13), склала 42 мкГн. Вона близька до реальної і, виходячи з порі-

вняння рис. 5 та 7, є незначно заниженою. Причиною цього є спрощена методика її обчислення, що до того ж не передбачає врахування індуктивностей силових з'єднувальних провідників установки.

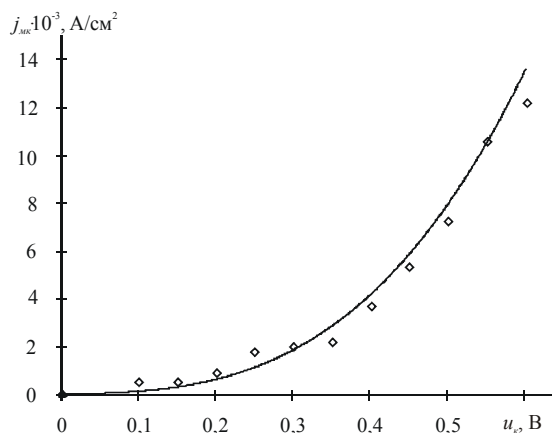


Рис. 4. Залежності густини струму осадження нікелю від при катодного спаду напруги катод – електроліт  
 ◇ експеримент, — аппроксимация

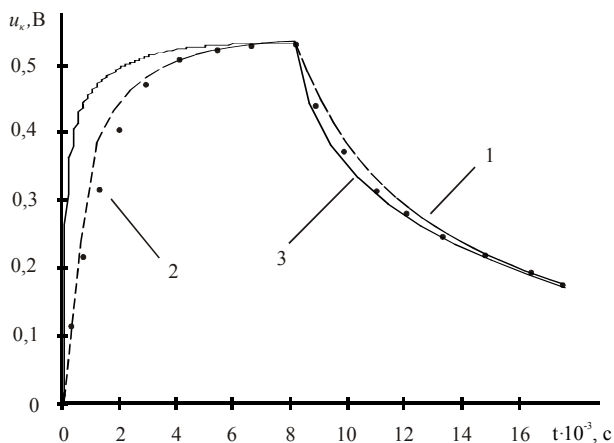


Рис. 5. Часові залежності прикатодного спаду напруги у колі рис. 1, а: 1 – за чисельним розрахунком системи рівнянь (2)– (9), 2 – за результатами експерименту, 3 – за чисельним розрахунком при  $L=0$

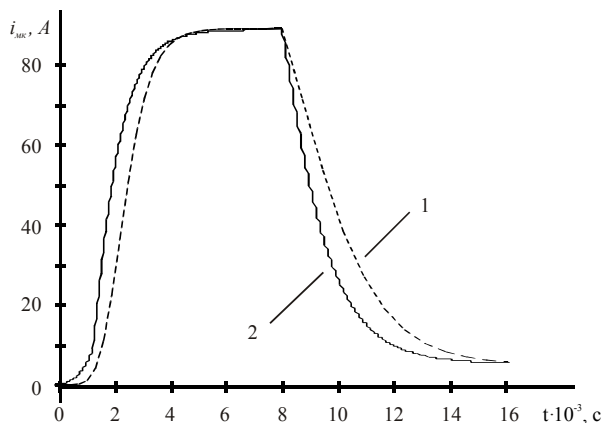


Рис. 6. Часові залежності часткового струму осадження нікелю: 1 – за чисельним розрахунком системи рівнянь (2) – (9), 2 – за чисельним розрахунком при  $L=0$

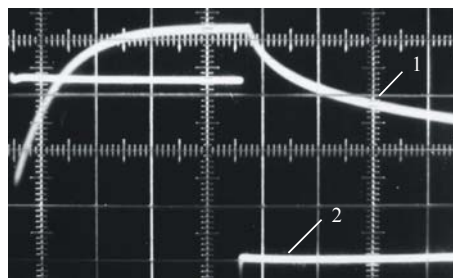


Рис. 7. Осцилограма прикатодного спаду напруги  $u_k(t)$  (1) та вхідної напруги  $u(t)$  (2). Розгортка 2 мс/под. Масштаби по вісі напруг 0,2 В/под для  $u_k$ , 5 В/под для  $u$

## ВИСНОВКИ

Усі існуючі на сьогодні моделі кіл з нелінійними електрохімічними елементами, зокрема з електролізерами осадження металів, містять два реактивних елементи. Внаслідок цього вони не в змозі в повній мірі правильно відобразити процеси у колах з електролізерами при наявності поляризованого аноду та імпульсної вхідної дії. Це призводить до похибок при визначенні ефективних параметрів роботи джерела живлення такого кола шляхом математичного моделювання.

Як свідчать результати лабораторного експерименту, представлена в цій роботі модель є достатньо адекватною і дозволяє з певним ступенем точності отримувати електричні показники якості і швидкості зростання покриття, якими є часові залежності при катодного спаду напруги та струму осадження. Тому є можливість суттєво зменшити обсяг експериментальних досліджень на користь математичного моделювання таких електричних кіл.

Перспективи подальшого розвитку запропонованої моделі пов'язані передусім з розробкою інженерних методик не тільки оціночного, але і уточненого визначення індуктивності розглянутої системи на основі розрахунку просторового електромагнітного поля гальванічної ванни, а також експериментальних досліджень зазначеного питання.

## ЛІТЕРАТУРА

- [1] 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.
- [2] Бондар О.І. Усталені процеси в колі з нелінійним електрохімічним елементом при дії несинусоїдної вхідної напруги // Електротехніка і електромеханіка. – 2004. – № 3. – С. 68 – 72.
- [3] Костин Н.А., Куликов А.А. Применение гальванотехники при ремонте подвижного состава. М.: Транспорт. – 1981. – 109 с.
- [4] Бондар О.І. Аналіз електромагнітних процесів у колі другого порядку методом перетворення змінних // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2002. – № 4 (50). – С. 196–201.
- [5] Бондар О.І. Аналіз електричних кіл з нелінійними електрохімічними елементами методом перетворення змінних: Дисс... канд. техн. наук: 05.09.05. – Дніпропетровськ, 2006. – 181 с.

Надійшла 21.02.2007