

РОЗВИТОК МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПОКРИТТІВ В РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧИХ УСТАНОВКАХ ІМПУЛЬСНОГО ЕЛЕКТРОЛІТИЧНОГО ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ

Представив д.т.н., професор Костін М.О.

Однією з ресурсозберігаючих технологій які є перспективними для впровадження на ремонтних підприємствах залізничного транспорту є технологія імпульсного електроосадження металів.

В свою чергу, проблема пошуку нових, більш ефективних, режимів роботи комплексів імпульсного електроосадження металів невідривно пов'язана з задачею їх математичного моделювання та аналізу відповідних електричних кіл. Передбачення значень електричних величин у цих колах, що є показниками якості та кількісного росту осаджуваних покриттів при широкій зміні параметрів елементів, кола та вхідної дії, легко здійснити при наявності загальних (аналітичних) залежностей зазначених величин.

Для отримання таких залежностей, у свою чергу, є необхідним розвиток та вдосконалення аналітичних методів аналізу електрохімічних кіл, що враховують їх особливості, зокрема наявність у складі їх схем заміщення мінімум двох реактивних елементів, активних елементів (лінійних або нелінійних, у тому числі і з суттєвими нелінійностями), можливість виникнення тривалих перехідних процесів (до години і більше), тощо. В роботі [3] виконано порівняльний аналіз існуючих на сьогодні методів аналізу нелінійних систем, які застосовують в теоретичній електротехніці та суміжних галузях знань, і зроблено висновок, що для застосування, з метою аналізу електрохімічних кіл, найбільш придатним є метод перетворення змінних. Власне розвитку та адаптації цього методу і присвячена згадана робота [3].

Слід відзначити, що схемам заміщення електрохімічних кіл, котрі розроблено, як в роботі [3], так і в більш ранніх роботах інших авторів, наприклад [1,5], притаманний той недолік, що вони не враховують зміну параметрів елементів кола у часі, зокрема збільшення активного опору електроліту внаслідок зменшення концентрації іонів металу у ньому а також впливу теп-

лових процесів. Отже, питання впливу зміни активного опору електроліту на основні електричні показники властивостей осаджуваних покриттів лишається недослідженим. Тому метою цієї роботи є аналіз електромагнітних процесів в електрохімічному колі електролізера осадження металу на основі параметричної моделі та отримання аналітичної часової залежності прикатодного спаду напруги, як основного електричного показника якості осаджуваного покриття на основі методу перетворення змінних.

Елементи схеми заміщення електролізера імпульсного осадження металевих покриттів (рис. 1) відображають такі процеси: утворення подвійного шару зарядів біля поверхні катоду (C_k), процес осадження металу (лінійний елемент R_{mk}), утворення магнітного поля при протіканні струму через електроліт (L). Особливостями даної схеми є, по-перше, врахування зміни у часі теплових втрат у електроліті ($R(t)$), по-друге, припущення про неполярну взаємозв'язок між прикатодним спадом напруги і катодним струмом розрядження іонів металу (зокрема, це має місце при осажденні мідних покриттів). Явищем виділення водню на катоді знехтувано як другорядним у порівнянні з явищем розрядження іонів металу.

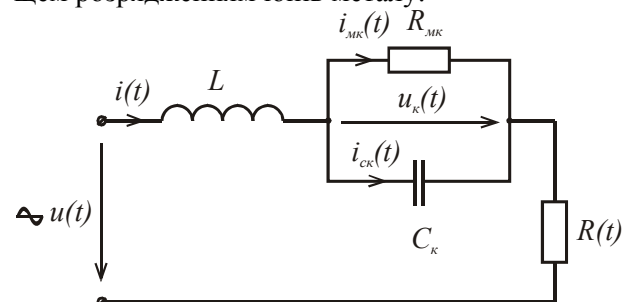


Рис. 1.

Тоді, якщо залежність $R(t)$ апроксимувати експоненціальною характеристикою

$R(t) = k_1 \cdot e^{k_2 t}$, система рівнянь електромагнітного стану кола рис.1 запишеться у вигляді:

$$i(t) = i_{mk}(t) + i_{ck}(t), \quad (1)$$

$$u(t) = u_{\kappa}(t) + L \frac{di(t)}{dt} + R(t) \cdot i(t), \quad (2)$$

$$i_{mk}(t) = \frac{u_{\kappa}(t)}{R_{\kappa}}, \quad (3)$$

$$i_{ck}(t) = C_{\kappa} \frac{du_{\kappa}(t)}{dt}. \quad (4)$$

Незалежні початкові умови:

$$u_{\kappa}(0) = 0, \quad i(0) = 0. \quad (5)$$

У наведених рівняннях: $i(t)$ – повний струм електролізера; $i_{mk}(t)$ – частковий струм розряду іонів металу на катоді; $i_{ck}(t)$ – ємнісний струм катоду; u_{κ} – прикатодний спад напруги; (катодна поляризація); C_{κ} – ємність подвійного (катодного) шару зарядів; R_{mk} – активний опір прикатодного шару, еквівалентний осадженню металу; k_1, k_2 – коефіцієнти апроксимації; $R(t)$ – часова залежність активного опору електроду; L – індуктивність електролізера.

Вхідна напруга живлення електролізера не-синусоїдна однопівперіодна (рис.2, крива 1). Розкладемо її в ряд Фур'є, обмежившись при цьому нульовою, першою та другою гармоніками (рис.2, крива 2).

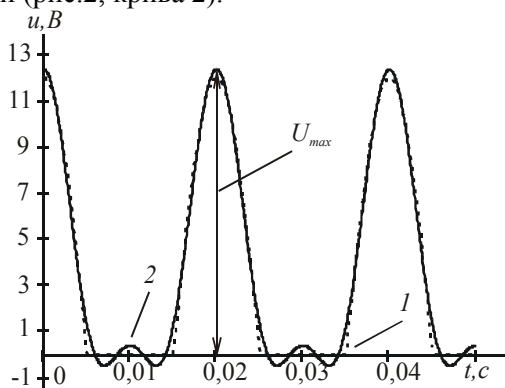


Рис. 2.

Тоді

$$u(t) = \frac{2 \cdot U_{max}}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{\pi}{4} \cos \omega t + \frac{1}{3} \cos 2\omega t \right) = U^{(0)} + U_m^{(1)} \cos \omega t + U_m^{(2)} \cos 2\omega t, \quad (6)$$

де U_{max} – максимальне значення вхідної напруги; $U_m^{(1)} = \frac{U_{max}}{2}$ – амплітуда першої гармоніки; $U_m^{(2)} = \frac{2 \cdot U_{max}}{3 \cdot \pi}$ – амплітуда другої гармоніки.

Приведемо систему (1) – (4) до параметричного диференціального рівняння другого порядку, що складено відносно прикатодного спаду напруги u_{κ} у вигляді

$$\frac{d^2 u_{\kappa}}{dt^2} + \left(\frac{k_1 e^{k_2 t}}{L} + \frac{1}{C_{\kappa} R_{\kappa}} \right) \frac{du_{\kappa}}{dt} + \left(\frac{k_1 e^{k_2 t}}{LC_{\kappa} R_{\kappa}} + \frac{1}{LC_{\kappa}} \right) \cdot u_{\kappa} = \frac{u(t)}{LC_{\kappa}} \quad (7)$$

$$\text{або} \quad \frac{d^2 u_{\kappa}}{dt^2} + N(t) \frac{du_{\kappa}}{dt} + T(t) \cdot u_{\kappa} = F(t), \quad (8)$$

$$\text{де} \quad N(t) = \frac{k_1 e^{k_2 t}}{L} + \frac{1}{C_{\kappa} R_{\kappa}}, \quad (9)$$

$$T(t) = \frac{k_1 e^{k_2 t}}{LC_{\kappa} R_{\kappa}} + \frac{1}{LC_{\kappa}}, \quad (10)$$

$$F(t) = \frac{u(t)}{LC_{\kappa}}. \quad (11)$$

Перетворимо параметричне неоднорідне рівняння (8) на лінійне неоднорідне рівняння з постійними коефіцієнтами (12)

$$h''(v) + h'(v) = W(v) \quad (12)$$

за допомогою співвідношень

$$h(v) = u_{\kappa}(t) \Phi(t), \quad (13)$$

$$v = \phi(t). \quad (14)$$

Слід відзначити, що споріднений прийом використано в [2] для розв'язання задач прикладної механіки, але відмінність полягає у тому, що в зазначеній роботі вихідне рівняння є, по-перше, нелінійно-параметричним, а, по-друге, однорідним, при цьому неавтономні системи взагалі не розглядаються.

Диференціюючи (13) двічі по v з урахуванням (14) отримуємо

$$\frac{dh}{dv} = \frac{dh}{dt} \cdot \frac{dt}{dv} = \left(\dot{u}_{\kappa}(t) \Phi(t) + \dot{\Phi}(t) \right) \frac{1}{\dot{\phi}(t)}, \quad (15)$$

$$\frac{d^2 h}{dv^2} = \frac{d}{dv} \left(\frac{dh}{dv} \right) = \frac{d}{dt} \cdot \left(\frac{dh}{dv} \right) \cdot \frac{dt}{dv} =$$

$$= \frac{1}{\dot{\phi}^3(t)} \left[(\ddot{u}_\kappa(t) \Phi(t) + 2\dot{u}_\kappa(t) \dot{\Phi}(t) + u_\kappa(t) \ddot{\Phi}(t)) \dot{\phi}(t) - \right.$$

$$\left. - (\dot{u}_\kappa(t) \Phi(t) + u_\kappa(t) \dot{\Phi}(t)) \ddot{\phi}(t) \right]. \quad (16)$$

Підставляючи вирази (16) та (13) до (12) після перетворень маємо

$$\ddot{u}_\kappa + \left(\frac{2\dot{\Phi}(t)}{\Phi(t)} - \frac{\ddot{\phi}(t)}{\dot{\phi}(t)} \right) \dot{u}_\kappa +$$

$$+ \left(\frac{\ddot{\Phi}(t)}{\Phi(t)} - \frac{\dot{\Phi}(t)\ddot{\phi}(t)}{\Phi(t)\dot{\phi}(t)} + \dot{\phi}^2(t) \right) \cdot u_\kappa = \frac{\dot{\phi}^2(t)}{\Phi(t)} W(v). \quad (17)$$

Рівняння (8) та (17) співпадають, якщо

$$N(t) = \frac{2\dot{\Phi}(t)}{\Phi(t)} - \frac{\ddot{\phi}(t)}{\dot{\phi}(t)}, \quad (18)$$

$$T(t) = \frac{\ddot{\Phi}(t)}{\Phi(t)} - \frac{\dot{\Phi}(t)\ddot{\phi}(t)}{\Phi(t)\dot{\phi}(t)} + \dot{\phi}^2(t), \quad (19)$$

$$\frac{\dot{\phi}^2(t)}{\Phi(t)} W(v) = F(t), \quad (20)$$

Вирази (18) – (20) дозволяють наближено визначити невідомі функції $\Phi(t)$, $\phi(t)$, $W(v)$. Зокрема, якщо функції $\Phi(t)$, $\phi(t)$ змінюються повільно, тобто має місце нерівність

$$\frac{\ddot{\Phi}(t)}{\Phi(t)} - \frac{\dot{\Phi}(t)\ddot{\phi}(t)}{\Phi(t)\dot{\phi}(t)} \ll \dot{\phi}^2(t), \quad (21)$$

$$\text{вираз (19) можна спростити } \dot{\phi}(t) = \sqrt{T(t)} \quad (22)$$

При цьому з виразу (18) отримуємо:

$$\Phi(t) = \left[e^{\int N(t) dt} \sqrt{T(t)} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (23)$$

$$\text{з виразу (20)} \quad W(v) = \frac{\Phi(t) F(t)}{\dot{\phi}^2(t)}, \quad (24)$$

$$\text{а з (22)} \quad \phi(t) = \int \sqrt{T(t)} dt, \quad (25)$$

Розв'язок рівняння (13) є відомим і має вигляд

$$h(v) = G_1 \cos v + G_2 \sin v +$$

$$+ \int (-\sin v \cdot W(v)) dv \cdot \cos v +$$

$$+ \int (\cos v \cdot W(v)) dv \cdot \sin v, \quad (26)$$

Враховуючи, що з (14) витікає співвідношення

$$dv = \dot{\phi}(t) dt, \quad (27)$$

в результаті зворотного перетворення змінних у виразі (26) маємо розв'язок рівняння (8)

$$u_\kappa(t) = \frac{1}{\Phi(t)} [G_1 \cos \phi(t) + G_2 \sin \phi(t) +$$

$$+ \int \left(-\sin \phi(t) \cdot \frac{\Phi(t) F(t)}{\sqrt{T(t)}} \right) dt \cdot \cos \phi(t) +$$

$$+ \int \left(\cos \phi(t) \cdot \frac{\Phi(t) F(t)}{\sqrt{T(t)}} \right) dt \cdot \sin \phi(t)], \quad (28)$$

Постійні інтегрування у виразі (28) слід визначити з допомогою початкових умов (5).

В якості прикладу наведемо розрахунок часової залежності прикатодного спаду напруги в електролізері відновлення мідних контакторів електрорухомого складу залізниць при відсутності в електроліті поверхнево-активних речовин. Параметри схеми заміщення згідно з [3] та [4] наступні: активний опір катоду $R_\kappa = 6,667 \cdot 10^{-3}$ Ом; питома ємність катоду $C_{k0} = 8 \cdot 10^{-5}$ Ф/см²; площа катоду $S_\kappa = 10000$ см²; індуктивність електролізера $L = 2 \cdot 10^{-5}$ Гн. Коефіцієнти апроксимації: $k_1 = 0,08$; $k_3 = 0,00013$. Максимальне значення напруги живлення $U_{max} = 12$ В. Результати розрахунку наведено на рис.3 та 4. Залежність представлена на рис.3 свідчить, що при обраних значеннях параметрів елементів кола та вхідної дії перехідний процес у колі не тривалий (до 0,2 с) і характеризується відсутністю „стрибків” значень прикатодного спаду напруги, які могли б спричинити утворення дефектів кристалічної ґратки покриття. Крім цього характер зазначеної кривої показує, що процес осадження металу на катоді відбувається і в паузу живлячої напруги за рахунок енергії, яку запасє ємність C_k . Одночасно з рис.4 бачимо, що зменшення концентрації іонів в електроліті суттєво впливає на максимальне значення прикатодного спаду напруги (протягом 4 годин воно зменшується з 0,6 до 0,12 В), а, отже, і на властивості покриття, тому врахування параметричної залежності опору електроліту від часу є

важливим при аналізі електромагнітних процесів в електролізерах.

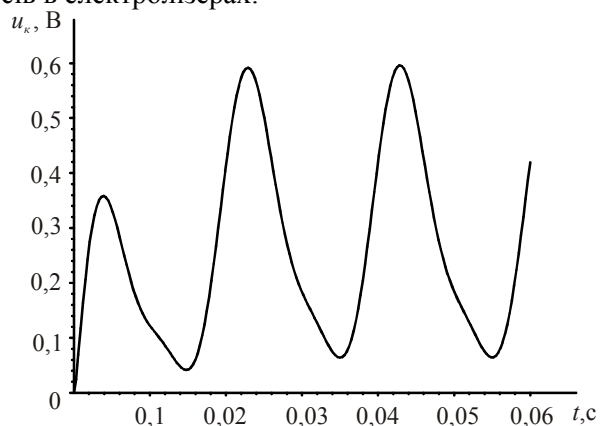


Рис. 3

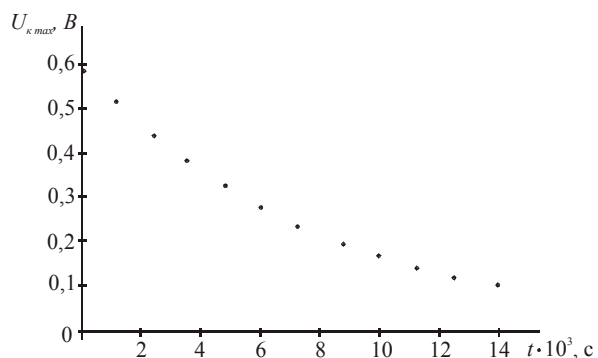


Рис. 4

Проведені у роботі дослідження дозволяють зробити наступні висновки.

1. В математичній моделі електролізера осадження металевих покриттів, на відміну від попередніх робіт схожої тематики, враховано параметричну залежність активного опору електроліту від часу, що дозволяє більш точно прогнозувати електричні показники якості нанесених покриттів, зокрема форму і значення прикатодного спаду напруги.

2. Метод перетворення змінних є придатним до аналізу електромагнітних процесів в системах електроосадження металів. Як показано в роботі, вперше адаптовані до специфіки задачі регулярні прийоми дозволяють перехід від неоднорідного диференційного параметричного рівняння, що описує процеси у колі до лінійного неоднорідного диференційного рівняння з постійними коефіцієнтами.

3. Вперше отримана аналітична часова залежність прикатодного спаду напруги (вираз (29)) дозволяє за необхідності розраховувати перехідні або ж усталені процеси у досліджуваному колі, аналізувати вплив окремих параметрів на форму та значення електричних величин у колі, зокрема на максимальне значення прикатодного спаду напруги в усталеному режимі. Попе-

редній розрахунок перехідного процесу при цьому не є обов'язковим.

Серед перспектив подальших досліджень в розглянутому напрямку слід відзначити передусім необхідність провести адаптацію методу перетворення змінних до аналізу процесів у нелінійно-параметричних колах, що дозволить аналізувати процеси у колах електроосадження різних металів. Не менш актуальною залишається і розробка нових регулярних прийомів переходу від нелінійних рівнянь до лінійних з метою розповсюдження використання методу на інші класи електричних кіл та електротехнічних систем.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Бондарь И.Л., Костин Н.А. Исследование нелинейных электрохимических цепей с помощью преобразований Тейлора [Текст]: / И. Л. Бондарь, Н. А. Костин // Электронное моделирование. – 1980. – №3. – С. 55 – 57.
2. Бондарь Н.Г. Некоторые автономные задачи нелинейной механики [Текст]: научное издание / Н. Г. Бондарь. Киев: Наукова думка, 1969.– 302с.
3. Бондар О.І. Аналіз електричних кіл з нелінійними електрохімічними елементами методом перетворення змінних [Текст]: Дисс... канд. техн. наук / О. І. Бондар. – Дніпропетровськ, 2006. – 181 с.
4. Каданер Л.И. Справочник по гальваностегии. [Текст]: научное издание / Л.И. Каданер. К.: Техніка, 1976. – 253 с.
5. Костин Н.А., Шейкина О.Г. Электроимпульсное осаждение металлов и сплавов [Текст]: / Н. А. Костин, О. Г. Шейкина // Технічна електродинаміка. Темат. вип. „Проблеми сучасної електротехніки”. – 2000. – Ч. 1. – С. 74–77.

Ключові слова: електролітичне відновлення, імпульсна установка, якість покриття, ресурсозбереження, деталі електрорухомого складу.

Ключевые слова: электролитическое восстановление, импульсная установка, качество покрытия, детали электроподвижного состава.

Keywords: electrolytic recovery, pulse setting, the quality of coverage, the details of electric rolling stock.