УДК 621.3:621. 9. 04

д.т.н. Заблодський М.М.,
к.т.н. Ямкова М.А.
(ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна),
Шадрін С.В.
(ТОВ «Нафтапромторг», м. Алчевськ, Україна)

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИЛОВОГО КОЛА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ РОЗМІРНОЇ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ ОБРОБКИ

Запропоновано математичну модель силового кола електротехнічного комплексу для електрохімічної обробки з урахуванням його електричних, гідравлічних і геометричних параметрів.

Ключові слова: *електрохімічна обробка, електротехнічний комплекс, міжелектродний проміжок, нелінійний опір, електроліт.*

Предложена математическая модель силовой цепи электротехнического комплекса для электрохимической обработки с учетом его электрических, гидравлических и геометрических параметров.

Ключевые слова: *электрохимическая обработка, электротехнический комплекс, межэлектродный промежуток, нелинейное сопротивление, электролит.*

Постановка проблеми і її зв´язок з науковими і технічними завданнями.

У теперішній час в промисловості і побутовій техніці серед електричних двигунів найбільше поширення набули асинхронні з короткозамкненим ротором. Це пов´язано, насамперед, з їхньою дешевизною (у порівнянні з іншими електродвигунами) і простотою. Однак зараз ціни на алюміній в Україні встановлено на рівні світових, що призводить до подорожчання двигунів.

У цих умовах стає актуальною задача ремонту асинхронних двигунів. Якщо раніш, за часів СРСР, часто ремонт двигуна коштував більше, ніж його виготовлення, то зараз вигідніше відновлювати ротори. Оскільки практично всі підприємства з виробництва електричних машин були засновані до 1991 року, в них відсутні цеха для відновлення роторів, що тепер призводить до збитків, бо дефектні двигуни доводиться викидати.

Обрив стрижнів у роторі – дефект, що зустрічається дуже часто. Експлуатація двигуна навіть при одному-двох обірваних стрижнях призводить до подальшого виходу з ладу інших стрижнів і відмові двигуна у роботі.

Короткозамкнена обмотка ротора являє собою залиті у пази з електротехнічної сталі (покриті спеціальною плівкою) алюмінієві стрижні складної конфігурації. Ці стрижні з´єднані між собою кільцями з того ж алюмінію, що вилиті разом з ними за один цикл лиття.

Після того, як продіагностовано обрив конкретного стрижня у роторі, виникає задача з його видалення. Теоретично видалення стрижнів можливо кількома способами: виплавленням алюмінія з пазів при нагріванні до температури 700 ^{o}C; хімічним витравленням лужним розчином, висвердлюванням і фрезеруванням пазу.

На жаль, виявилося, що всі ці способи не можна застосувати на практиці. Тому у нашому університеті було запропоновано для розв´язання цієї задачі використати розмірну електрохімічну обробку (РЕО) [1]. Сутність способу полягає в отриманні на місці стрижня отвору, який повторює за формою і розмірами сам паз.

Розмірна електрохімічна обробка використовується для електропровідних матеріалів. До її переваг відносяться можливість отримання довгих і вузьких отворів складної конфігурації, високий клас точності, відсутність залишкових напруг і т.і.

Але при всіх перевагах електрохімічна обробка має і деякі недоліки, і підвищене енергоспоживання – найбільш суттєвий з них. Тому в задачі оптимізації систем керування РЕО входить не тільки підвищення точності обробки, але і зниження енерговитрат. Для цього необхідно розробити адекватну модель силового ланцюга електротехнічного комплексу [2].

Для синтезу енергозберігаючої системи керування процесом електрохімічної обробки треба отримати математичний опис об´єкту керування, в якості якого виступає міжелектродний проміжок.

Аналіз досліджень і публікацій.

Існуючі математичні моделі міжелектродного проміжку отримані за умови доволі сильних припущень і не враховують вплив деяких істотних факторів.

Дуже важливим параметром процесу РЕО є щільність струму. Зрозуміло, що для підвищення продуктивності процесу електрохімічної обробки бажано підтримувати щільність робочого струму на рівні граничному рівні. Інтуїтивно зрозуміло, що граничне значення щільності струму повинно залежати від електричних параметрів (напруженості електричного поля), параметрів електроліту (його в´язкості і витрати, а також початкової концентрації електроліту) і геометричних параметрів (розмірів катод-інструменту і міжелектродного проміжку). Та на жаль в існуючій літературі відсутні кількісні залежності між цими величинами.

До того ж у існуючих моделях силового кола робляться, на наш погляд, вельми сильні припущення про постійність електропровідності електроліта і його опору незалежно від швидкості електроліту і робочого струму; не враховується режим течії електроліту і т.і. [3].

Постановка задачі.

Для проектування системи керування електротехнічним комплексом для електрохімічної обробки металів, що забезпечить високу продуктивність, точність і низьке енергоспоживання, треба мати математичну модель об´єкту керування, тобто силового кола комплексу.

Основні результати досліджень.

До силового кола електротехнічного комплексу для електрохімічної обробки входять джерело живлення, з´єднувальні дроти, трансформатор, стовпчик електроліту у катод-інструменті, міжелектродний проміжок і анод.

Блок живлення будемо вважати безінерційним. Тоді його передатна функція $W_{ип}$ визначається як опір джерела живлення:

$$W_{ип} = (0.2 - 0.3)U_{кл} / I_{ном}, \qquad (1)$$

де $U_{кл}$ - класифікаційна напруга, $I_{ном}$ - номінальний робочий струм джерела живлення.

Трансформатор є форсуючою ланкою

$$W_{тр} = R_{тр}\left(\frac{L_{тр}}{R_{тр}}p + 1\right), \qquad (2)$$

де $R_{тр}$ і $L_{тр}$ - повний активний опір трансформатору, приведений до його первинної обмотки і його індуктивність відповідно.

$$R_{тр} = R_1 + R_2(w_1/w_2);\ L_{тр} = X_{тр}/(2\pi f),$$

де R_1 і R_2 - активний опір первинної і вторинної обмотки відповідно; w_1 і w_2 - число витків цих обмоток; $X_{тр}$ - індуктивний опір трансформатора; f - частота мережі.

З´єднювальні дроти, строго кажучи, описуються як форсуюче-коливальна ланка, бо в них є активний опір, індуктивність між двома дротами [4] і ємність:

$$W_{пр} = \frac{R_{пр}\left(\frac{L_{пр}}{R_{пр}}p + 1\right)}{p^2 C_{пр} L_{пр} + pC_{пр} R_{пр} + 1}, \qquad (3)$$

де $L_{пр}$ - індуктивність дводротової лінії, $C_{пр}$ - ємність між двома провідниками:

$$L_{пр} = \frac{\mu_0 I}{\pi}\left[ln\left(\frac{D}{R}\right) + \frac{\mu}{4}\right],\ C_{пр} = \frac{\pi\varepsilon\varepsilon_0 l}{ln\left(\frac{D}{R}\right)},$$

де I - сила струму, D - відстань між провідниками, R - радіус дротів, μ_0 - магнітна проникність вакууму, ε - діелектрична проникність.

Стовпчик електроліту в катод-інструменті має активний опір і ємність [4], і являє собою інерційну ланку з передатною функцією

$$W_{ст} = \frac{R_{ст}}{pC_{ст}R_{ст} + 1} \qquad (4)$$

причому опір стовпчика електроліту у катод-інструменті, як показано у [4],

$$R_{ст} = \frac{1}{\chi h 4\, K'/K},$$

де χ - електропровідність електроліту, що залежить від робочого струму, K' і K - зв´язані еліптичні інтеграли першого роду, аргумент яких

$$k = \frac{1 - \frac{R^2}{D^2}}{1 + \frac{R^2}{D^2}},$$

де R - внутрішній радіус катод-інструменту, D - зовнішній радіус катод-інструменту.

Для визначення ємності електроліту у катод-інструменті є вирази, наведені у [4]:

$$C_{ст} = \frac{2\pi h\varepsilon\varepsilon_0}{Arsh\left(\frac{h}{R}\right) - \sqrt{\frac{R^2}{h^2} + 1} + \frac{R}{h}}.$$

У той час як структурні схеми трансформатора і джерела живлення відомі, схема заміщення міжелектродного проміжку потребує вивчення і покращення. У існуючій літературі наведено спрощені схеми, які не враховують цілий ряд вельми суттєвих факторів, одним з головних є течія електроліту у міжелектродному проміжку [5].

Найбільш істотним недоліком усіх відомих нам математичних моделей, є, на наш погляд, вельми сильне припущення, що електропровідність електроліту і граничний струм вважають постійними незалежно від швидкості електроліту і величини робочого струму.

Для більш точного визначення залежності граничного струму від гідравлічних, геометричних і електричних параметрів у [2] запропоновано наступний підхід: спочатку потрібно знайти поле швидкостей електроліту в міжелектродному проміжку з розв´язання рівняння Нав´є-Стокса, потім з використанням знайденого розподілу швидкості розв´язати рівняння дифузії для отримання поля концентрації електроліту згідно з

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{v}\, grad C = D\nabla^2 C, \qquad (5)$$

де C - концентрація електроліту, $\vec{v}$ - швидкість електроліту, D - коефіцієнт дифузії, t - час.

Потім визначено граничну щільність струму $j_{пред}$, що тече в міжелектродному проміжку, згідно з виразом

$$j_{пред} = D grad C + \frac{DmF\vec{E}}{RT} C, \qquad (6)$$

де m - валентність іонів електроліту, R - газова постійна, T - температура електроліту по Кельвіну, F - постійна Фарадея, $\vec{E}$ - напруженість електричного поля у між електродному проміжку.

По знайденим значенням щільності струму при заданій концентрації електроліту і напруженості електричного поля визначаються складові повного ефективного опору міжелектродного проміжку:

$$Z_0 = \frac{RT}{F^2 D_1 D_2 m_1 m_2}; \qquad (7)$$

$$Z_1 = \frac{RT(m_1 + m_2)}{Fm_1 m_2 (i_{пред} - i)}; \qquad (8)$$

$$Z_2 = \frac{2RT}{Fi}, \qquad (9)$$

де $i_{пред}$ - граничний струм, i - робочий струм.

При розв´язанні цієї задачі нами були прийняті такі припущення: електрод вважався круглим, а електроліт – нестисливою ньютонівською рідиною.

Для визначення поля швидкості електроліту у міжелектродному проміжку розглянемо просторову осесиметричну течію в´язкої рідини міжелектродного проміжку поблизу критичної точки. При такій течії рідина набігає на стінку, перпендикулярну напряму руху, і відтікає від критичної точки вздовж цієї стінки по радіусах. Для цього випадку існує точне розв´язання рівняння Нав´є-Стокса [6]. Задача розв´язується у циліндричній системі координат r, φ, z. Площина $z = 0$ суміщена зі стінкою, а ось z направлена протилежно набігаючій течії.

Позначимо U і V радіальну і осеву швидкості при течії ідеальної рідини, і $u(r, z)$ і $v(r, z)$ - відповідні швидкості для в´язкої течії. Внаслідок осевої симетрії $v_\varphi = 0$ і $\partial/\partial\varphi = 0$. Тому рівняння Нав´є-Стокса і рівняння нерозривності мають такий вигляд:

$$v\frac{\partial v}{\partial r} + w\frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial r} + \gamma\left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right),$$

$$v\frac{\partial w}{\partial r} + w\frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} + \gamma\left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right),$$

$$\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0,$$

де p - тиск електроліту, ρ - його щільність, γ - кінематична в´язкість.

Граничні умови:

$$v = 0, \quad w = 0 \quad при \quad z = 0,$$
$$v = V \quad при \quad z = \infty.$$

Для розв´язання рівняння Нав´є-Стокса використовується афінне перетворення. У кінцевому рахунку отримано вираз для осьової швидкості електроліту:

$$w = 2\left(\frac{Q}{2\pi r_k^2 d}\right)^{\frac{b+1}{2}} \gamma^{\frac{b-1}{2}} g z^b e^{G\sqrt{\frac{Q}{2\pi r_k^2 d\gamma}}z}. \quad (10)$$

Радіальна швидкість електроліту

$$v = \frac{Q}{2\pi r_k^2 d} r\left(1 - e^{-\sqrt{\frac{Q}{\pi r_k dT}}z}\right),$$

де $T = 0.7$, Q - витрата електроліту, r_k - радіус катод-інструменту, d - міжелектродний проміжок, $a = \frac{Q}{2\pi r_k d}$,

$g = 0.2358, b = 1.807, G = 0.0466$.

Вираз для осьової швидкості електроліту використовується для визначення розподілу його концентрації, а по величині радіальної швидкості перевіряється припущення про те, що дифузійний пограничний шар достатньо малий порівняно з поверхнею анода.

Розподіл концентрації електроліту визначається розв´язанням рівняння дифузії (5).

Запишемо вираз для граничної щільності струму, враховуючи розподіл концентрації електроліту, згідно з (6):

$$j_{пред} = Da_1 e^{\frac{1}{D}\int_0^\infty w(z)dz} + \frac{DmF\vec{E}}{RT} a_1 e^{\frac{1}{D}\int_0^\infty w(z)dz} z,$$

в цьому виразі $w(z)$ визначається за виразом (8).

У нашому випадку граничний струм у нерухомому електроліті дорівнює 0.44 А, а для рухомого електроліту граничний струм дорівнює 10.58 А (на практиці струм дорівнював 9-10 А).

За знайденими значеннями граничного струму знайдемо повний ефективний опір міжелектродного проміжку, що складається з омічного опору (7), дифузійного (8) і міграційного (9) опорів.

Наведемо залежність повного опору міжелектродного проміжку від робочого струму (рис.1) (характеристику розраховано у відносних одиницях). Як видно характеристика повного опору має U-образний вигляд, що поясняється переважанням на

різних стадіях електрохімічної реакції дифузійної чи міграційної перенапруги і опору відповідно. Наявність падаючої ділянки на характеристиці може призвести до виникнення нестійкості процесу обробки, тобто до коливань струму. Це поясняє часте виникнення режиму короткого замикання на практиці.

Рисунок 1 – Залежність повного опору міжелектродного проміжку від робочого струму у відносних одиницях

Питома ємність міжелектродного зазору дорівнює 16-20 мкФ/см^2.

Його еквівалентна індуктивність визначається в залежності від типу джерела живлення по часу встановлення нестаціонарного електрохімічного процесу. Вперше питання нестаціонарних явищ у гетерогенних процесах було докладно вивчене А.Н. Соколовим, потім В.Г. Левичем [5]. При цьому використано допущення про постійність у часі швидкості течії електроліту. Будемо вважати, що перехідний процес закінчується за 3 постійні часу, тоді при живленні від джерела напруги

$$T_u = \frac{1}{3}\sqrt[3]{\frac{\gamma}{\pi D v^3}},$$

а при живленні від джерела струму

$$T_u = \left(\frac{nF}{2j}\right)^2 \pi D C_0 .$$

Індуктивність $L_{заз}$ визначається як постійна часу, розділена на $R_{заз}$. Треба пам´ятати, що повний активний опір міжелектродного проміжку $R_{заз}$ є сумою омічного, дифузійного і міграційного опорів (7-9).

Таким чином, міжелектродний проміжок є форсуюче-коливною ланкою з передатною функцією

$$W_{заз} = \frac{R_{заз}\left(\frac{L_{заз}}{R_{заз}}p + 1\right)}{p^2 C_{заз} L_{заз} + p C_{заз} R_{заз} + 1}. \quad (11)$$

Наявність у передатній функції міжелектродного проміжку форсуючої ланки надає йому певні попереджувальні властивості, бо в систему вводиться крім самої величини і її похідна, тобто тенденція до її зміни. Це підтверджує адекватність математичної моделі міжелектродного проміжку, який, як відомо з практики [3], має властивість саморегульованості.

Отримаємо передатну функцію аноду. У нашому випадку він являє собою ротор асинхронного короткозамкненого двигуна, кожний стрижень якого має активний опір і індуктивність. Оскільки перехідний опір на границі стрижень-пакет значно більше опору стрижня, можна вважати, що робочий струм тече тільки по оброблюваному стрижню.

Індуктивність провідника, що лежить у відкритому разу з паралельними стінками і оточений сталевим масивом з нескінченно великою магнітною проникністю, визначається за формулою Рота [7]:

$$L_a = -\frac{2ab}{\pi^2 cdI}\sum_h\sum_k \frac{B_{h,k}}{(h-1)(2k-1)}\times$$
$$\times\left\{\left(\sin(h-1)\frac{\pi a_1^1}{a} - \sin(h-1)\frac{\pi a_1}{a}\right),\right.$$

де $B_{h,k}$ - коефіцієнти двойного ряду Фур´є, a і b - геометричні розміри пазу.

Активний опір аноду R_a визначається за відомою формулою.

Значить, анод являє собою інерційну ланку з передатною функцією

$$W_a = R_a\left(\frac{L_a}{R_a p + 1}\right). \quad (12)$$

Згідно з наведеними вище залежностями можна розрахувати параметри структурної схеми силового ланцюга електротехнічного комплексу для електрохімічної обробки. По результатам підрахунку, як і слід було очікувати, виявилось, що індуктивністю і ємністю з´єднувальних дротів можна було знехтувати, інші ж величини обов´язково повинні бути враховані.

Тоді, після деяких перетворень, можна отримати передатну функцію силового ланцюгу електротехнічного комплексу у наступному вигляді:

$$W = \frac{1}{R_E + R_{заз}} \frac{T_{заз} p + 1}{\frac{T_{заз} L_E}{R_E + R_{заз}} p^2 + Tp + 1}, \quad (13)$$

де $R_E = R_{ип} + R_{тр} + R_{ан} + R_{пр} + R_{ст}$,

$L_E = L_{тр} + L_{ан}$, $T = \frac{T_{заз} R_E + L_E + L_{заз}}{R_E + R_{заз}}$,

$T_{заз} = C_{заз} R_{заз}$.

Таким чином силовий ланцюг описується послідовним з´єднанням нелінійних форсуючої і двох інерційних ланок, бо коефіцієнт демпфування завжди (при робочих значеннях струму) більше одиниці.

Необхідно враховувати, що постійними можна вважати тільки активні опори джерела живлення, дротів і трансформатора (як і його індуктивність). Опір же електроліту, ємність стовпчика електроліту і індуктивність міжелектродного проміжка та анода залежать від величини робочого струму і є нелінійними. Опір аноду змінюється при його розчиненні.

Таким чином, нами вперше отримана структурна схема силового ланцюгу електротехнічного комплексу для електрохімічної обробки, яка враховує індуктивність і ємність міжелектродного проміжку, параметри стовпчика електроліту у катод-інструменті і їхні залежності від робочого струму, нелінійний характер яких, як нескладно показати, може призвести при живленні комплексу від джерела ЕРС до виникнення коливань струму і припинення процесу обробки (яке доволі часто і відбувається на практиці). Запропонована математична модель дозволяє пояснити це явище.

З передатної функції силового ланцюга (13) можна отримати такий вираз для робочого струму (числові коефіцієнти отримані з урахуванням постійних величин)

$$pI = \frac{0.87I^2 + (3.59 - 0.87I_{пред} - U)I + (U - 7.17)I_{пред}}{L(I_{пред} - I)}. \quad (14)$$

Диференційне рівняння (14) не вдається представити у формі Коші. Однак воно має розв´язання у неявній формі

$$\frac{\left(\mathrm{I}^2 - 28.89\mathrm{I} + 146.93\right)^{0.127} \left(2\mathrm{I} - 44.59\right)^{0.072}}{\left(2\mathrm{I} - 13.18\right)^{0.072}} = \mathrm{e}^{-\mathrm{t}} - 0.72.$$

На рис. 2 це розв´язання представлено графічно.

Як видно на рис. 2 при деяких значеннях часу можливі два, три або чотири різних значення струму. На наш погляд, наявність двох точок біфуркації і неоднозначність значень струму може призвести до його коливань, при чому якщо струм буде стремитися до значень більших гранично допустимого (у нашому випадку 10 А), виникне коротке замкнення. Як відомо, це явище неодноразово виникає на практиці.

Така неоднозначність розв´язань виникає через нелінійну залежність опору міжелектродного проміжку від струму. Неврахування попередніми дослідженнями цієї залежності і неоднозначності (у відомій нам літературі опір електроліту у міжелектродному проміжку взагалі вважається постійним і незалежним від сили струму) не дозволяв пояснити часті виникнення режиму короткого замикання і, відповідно, вжити заходи з його запобігання.

На рис. 3 наведена залежність струму від часу, отримана у припущенні постійності опору. Як видно, вона повністю повторює нижню гілку характеристики на рис. 3, але не дозволяє отримати ще дві її гілки і передбачити можливість нестійкості робочого струму.

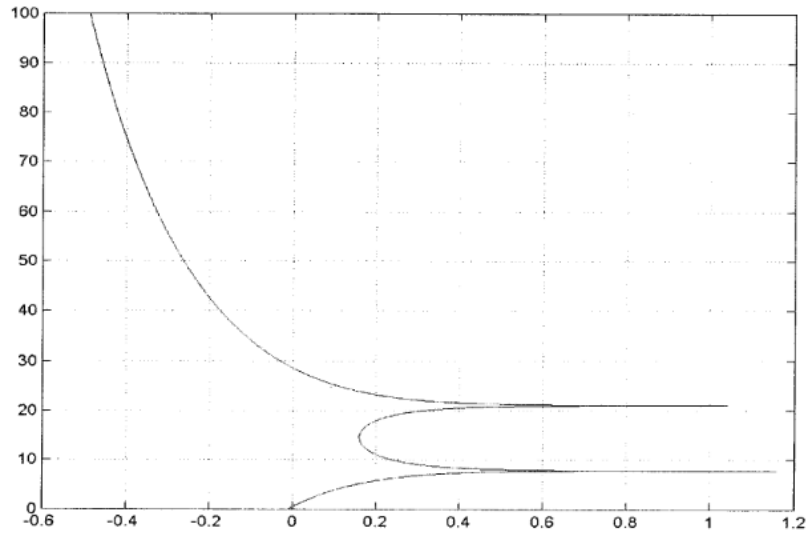

Рисунок 2 – Залежність робочого струму від часу

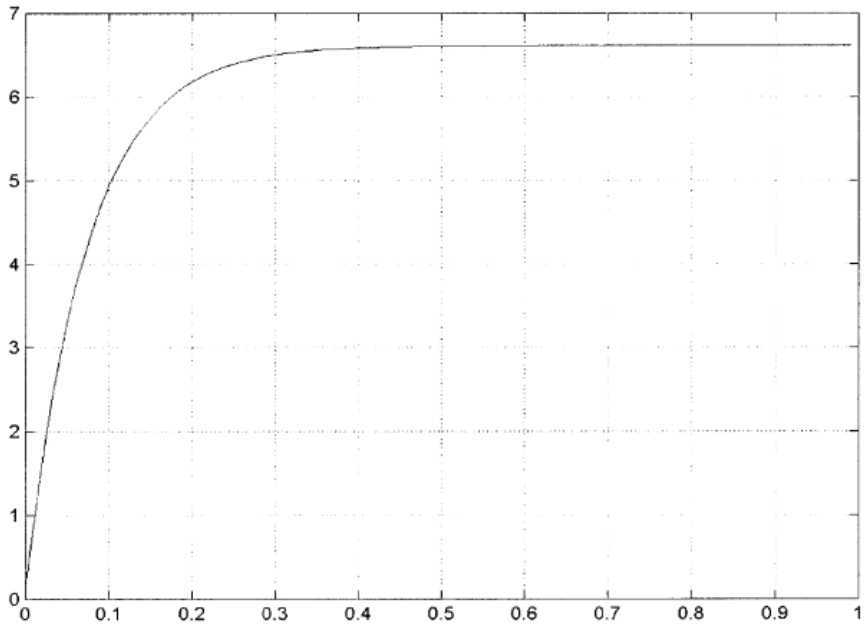

Рисунок 3 –Залежність робочого струму від часу у припущенні постійного опору

Таким чином, отриману математичну модель силового ланцюга електротехнічного комплексу для розмірної електрохімічної обробки можна признати адекватною, бо її використання дозволяє правильного теоретично розрахувати значення робочого струму; теоретично пояснити властивість саморегульованості міжелектродного проміжку (наявністю похідної у законі регулювання); теоретично обґрунтувати можливість виникнення режиму короткого замикання (за рахунок нелінійної U-образної залежності повного опору міжелектродного проміжку від робочого струму, падаюча гілка є може призвести до нестійкості процесу).

Висновки.

У статті здійснено теоретичне узагальнення й розв’язання актуальної науково-технічної задачі створення математичної моделі силового ланцюга електротехнічно-

го комплексу для розмірної електрохімічної обробки.

Суть виконаних досліджень полягає у теоретичному поясненні властивості саморегульованості міжелектродного проміжку та можливості виникнення режиму короткого замикання, а також у теоретичному розрахунку робочого струму комплексу в залежності від його електричних, геометричних і гідравлічних параметрів.

Найбільш суттєві наукові і прикладні результати, висновки і рекомендації полягають у наступному:

1. Вперше запропоновано залежності повного опору міжелектродного проміжку від електричних, гідравлічних і геометричних параметрів. Встановлено U-образну залежність опору від робочого струму, що призводить до його нестійкості, тобто вперше теоретично пояснено часте виникнення режиму короткого замикання при електрохімічній обробці.

2. Вперше наведено залежності для врахування нелінійного опору стовпчика електроліту у катод-інструменті.

3. Вперше враховано індуктивності міжелектродного проміжку і аноду, що дозволило створити більш точну математичну модель комплексу.

4. Вперше запропоновано математичну модель силового ланцюга електротехнічного комплексу для електрохімічної обробки металів та сплавів, яка дозволяє:

- правильного теоретично розрахувати значення робочого струму;
- теоретично пояснити властивість саморегульованості міжелектродного проміжку (наявністю похідної у законі регулювання).

Бібліографічний список

1. Пат. 77041 Україна, МПК H02K 15/00, H02K 15/08. Спосіб відновлення литих короткозамкнених обмоток роторів / Заблодський М.М., Заблодська Т.П., Шадрін С.В.,; заявник і патентовласник Донбаський державний технічний університет. - № 77041; заявл. 29.06.2004 ; опубл. 16.10.2006, Бюл. № 10.

2. Обоснование и выбор источника питания для комплекса электрохимической обработки металлов / Н.Н. Заблодский, С.В. Шадрин, М.А. Ямковая //Технічна електродинаміка. – 2004. - № 5. – С. 68-74.

3. Орлов В.Ф. Электрохимическое формообразование / В.Ф. Орлов, Б.И. Чугунов. – М.: Машиностроение, 1990.

4. Бухгольц Г. Расчет электрических и магнитных полей / Г. Бухгольц. – М.: Изд-во ностранной литературы, 1961.

5. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика / В.Г. Левич. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1952.

6. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1974.

7. Бинс К. Анализ и расчет электрических и магнитных полей / К. Бинс, П. Лауренсон. – М.: Энергия, 1970.

Рекомендовано до друку д.т.н, проф. Лущиком В.Д.