

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНОГО ОСАДЖЕННЯ МЕТАЛІВ: СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

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

Проблема математичного моделювання електроенергетичних комплексів електроосадження металів є актуальною, оскільки математичне моделювання являє собою невід'ємну складову частину розробки нових та вдосконалення існуючих електротехнічних пристроїв та систем. Впровадження зазначених комплексів, а особливо таких, що живляться від джерел імпульсного струму, як відомо, є ефективним ресурсом енергозберігаючим заходом в галузі ремонту машин і механізмів. При цьому постає задача пошуку ефективних режимів роботи джерела струму, тобто форми та тривалості імпульсів, котрі забезпечать ефективність роботи електротехнічного комплексу за заданими критеріями. Вказані критерії можна умовно віднести до декількох груп. По-перше, це технологічні критерії, що обумовлюють необхідні фізико-механічні властивості отриманого шару покриття. По-друге, це критерії надійності, як самої електроустановки, так і процесу відновлення. До третьої групи можна віднести критерії економічної ефективності роботи комплексу. Нарешті, важливими є також критерії електромагнітної сумісності розробленого комплексу, екологічні критерії, критерії безпеки експлуатації електроустаткування, тощо.

Відшукати режими роботи джерела, котрі задовольняють усім зазначеним критеріям виключно експериментальним шляхом не представляється можливим через надзвичайно великий обсяг експериментальних досліджень. У виробничих умовах такі дослідження є занадто дорогими, проте навіть лабораторні дослідження потребують виготовлення нехай і малопотужного, проте реального джерела струму або напруги, при чому параметри такого джерела є наперед невідомими. Як правило зазначене завдання розв'язують комбінованим шляхом. Спочатку розробляють електричну схему заміщення електротехнічного комплексу осадження металу, або його окремих частин, потім на основі цієї схеми розробляють відповідну математичну модель і на основі багаторазового розв'язання задачі аналізу при різних парамет-

рах кола попередньо обирають перспективні режими електроосадження металів, порівнюючи результати розрахунків з відомими електричними показниками якості, швидкості зростання осадженого покриття, тощо. При цьому обсяг експериментальних досліджень суттєво зменшується, вони проводяться переважно з перевіркою метою.

Різноманітність осаджуваних металів, складу електролітів, форм та габаритів електролізерів зумовлює необхідність врахування в моделі тих чи інших процесів, тому моделі мають відмінності. Метою цієї статті є розгляд основних електричних схем заміщення та відповідних математичних моделей кіл електролітичного осадження металів, а також їх окремих частин, зазначення області їх можливого застосування та існуючих при цьому обмежень, а також визначення шляхів уточнення та розвитку зазначених моделей для вирішення більш широкого кола прикладних задач.

Основними складовими частинами електротехнічного комплексу електроосадження металу, як відомо, є джерело живлення та електролізер. Оскільки найважливіші технологічні критерії осаджуваного покриття безпосередньо пов'язані зі значеннями та формою електричних величин в електролізері, зокрема зі спадом напруги на міжфазній границі катод-електроліт (прикатодним спадом напруги або катодною поляризацією), то будь-яка, навіть найпростіша схема заміщення такого комплексу має містити у своєму складі схему заміщення електролізера і зокрема його катоду, бо саме на ньому відбувається осадження металу; джерело живлення при цьому може бути заміщене ідеальним джерелом струму або напруги. Саме до такого типу належали перші схеми заміщення зазначених кіл. Розглянемо їх докладніше.

Початком розробки математичних моделей електрохімічних кіл можна вважати праці Герішера та Ердей – Груца [1, 2], у котрих зроблено спробу змоделювати катод (підсистему катод – електроліт) в режимі електролізера шляхом паралельного вмикання лінійних рези-

стора та конденсатора або ідеального напівпровідникового діода та лінійного конденсатора. Автори розраховували середнє значення прикатодного спаду напруги при виділенні водню під час пропускання синусоїдного струму через електролітичну комірку. Закономірностям, що отримані на моделях, дано спрощену математичну інтерпретацію.

У роботі [3] встановлено кількісні співвідношення між параметрами вхідного струму довільної форми і напругою на гальванічній ванні. При розкладанні струму в ряд Фур'є автори обмежилися нульовою та першою гармоніками, а ємнісний струм не враховували.

Електрична модель процесів, що протікають на сферичному мікрокатоді, запропонована в [4]. Кінцеве інтегральне рівняння типу Вольтерра змодельовано на аналоговій електронній машині.

Питанням теорії електродного опору під час розглядання моделей різних лінійних електрохімічних кіл присвячено монографію [5] і статтю [6]. У ній методом еквівалентного багатоплюсника вирішують задачу відтворення еквівалентного електричного кола за допомогою матриці її контурних опорів.

Математичне моделювання лінійних електричних кіл, що заміщують катодні процеси при різноманітних вхідних збудженнях, розглянуто в [7]. Проте, по-перше, ємнісні струми не враховано, по-друге, основна спрямованість змісту монографії – вивчення кінетики катодних процесів.

Таким чином перший етап моделювання нелінійних електрохімічних кіл характеризується наступними особливостями. По-перше, автори обмежувались лише моделюванням електролізера, здебільшого його катоду. По-друге, запропоновані моделі ґрунтуються в основному лише на лінійному наближенні кінетичних механізмів, і, нарешті, по-третє, жодна зі згаданих моделей не носить загального характеру і є дійсною лише для конкретного кола у певному режимі. З вказаних причин згадані моделі володіють вкрай обмеженими можливостями щодо визначення режимів осадження металів навіть за технологічними критеріями, не говорячи про інші, і, власне з цією метою не використовувались. Вони призначались виключно для розв'язання локальних задач, таких наприклад, як визначення сили струму електролізера при заданій напрузі, тощо.

Початок нового етапу у математичному моделюванні кіл електроосадження металів пов'язаний з розробкою більш складних нелі-

нійних моделей. Це було обумовлено тим, що у більшості випадків кінетика катодних та анодних процесів описується нелінійними залежностями [8], тому використання лінійної моделі призводить до невірної визначення кількісних показників процесу, або навіть дає якісно невірні уявлення про нього у випадках виникнення у колі автоколивань, котрі неможливі в лінійних системах. Суто „електричний” підхід до дослідження коливань в електрохімічних системах запропоновано Франком [9,10]. Для вивчення коливальної поведінки електролізера анодного розчинення металів, що пасивуються, ним запропоновано схему кола, що містить резистивний елемент, вольт-амперна характеристика якого має ділянку з від'ємним нахилом, і ємність подвійного електричного шару біля аноду. В пізніших працях розглянуто еквівалентні схеми, що містили від'ємні та додатні опори, накопичувачі як ємнісного, так і індуктивного типу. Досліджено також вплив нахилу ділянки від'ємного опору на процес виникнення автоколивань.

Ключовим моментом у розвитку математичних моделей електрохімічних кіл на другому етапі стала робота [11]. На відміну від попередніх праць у [11] та інших публікаціях цього автора, а також його учнів [12,13], використовується системний підхід при математичному моделюванні процесів у нелінійних динамічних системах „джерело живлення – електролізер”. При цьому враховуються всі процеси, як на катоді, так і на аноді, а також активний спад напруги в електроліті. Аналіз процесів виконується чисельним, а не аналітичним методом. Питання автоколивань та стійкості режимів роботи таких нелінійних електрохімічних кіл не розглянуті, не враховано також індуктивність електролізера. Зазначені моделі було застосовано з метою вибору ефективних параметрів технологічного режиму у колах імпульсного електроосадження металів. Для цього проведено дослідження в результаті яких встановлено закономірності зміни структури, фізико-механічних властивостей, швидкості нанесень металевих покриттів від параметрів технологічного режиму, взаємозв'язки між електричними величинами в електролізері та властивостями покриттів, запропоновано методики розрахунку показників технологічного процесу відновлення, тощо [14-16].

Подальший розвиток вищезгадані моделі набули в роботі [17]. Зокрема в ній між іншим наведена найбільш загальна електрична схема заміщення електролізера осадження металів

(рис.1), котра відрізняється від раніше існуючих одночасним врахуванням катодних, анодних процесів, а також теплових втрат та індуктивності електроліту. Далі шляхом нехтування другорядними явищами для окремих випадків побудовано ряд спрощених схем заміщення, котрі містять два енергоємні елементи. На відміну від усіх попередніх робіт аналіз електромагнітних процесів у електрохімічних колах виконано за допомогою аналітичного методу – методу перетворення змінних. В результаті автором вперше отримано аналітичні співвідношення зміни у часі прикатодного спаду напруги та струмів для різних, у тому числі і суттєвих, нелінійностей електрохімічних елементів і різних форм вхідних напруги чи струму, які дозволяють якісно оцінювати вплив різних факторів на технологічні показники процесу осадження. Також встановлено закономірності впливу електричних параметрів вхідної дії (амплітуди, частоти, щільності) на величину прикатодного спаду напруги, що є основним технологічним параметром електрохімічних кіл з електролізерами. Перевагами використання аналітичного методу є те, що завдяки загальному характеру аналітичний розв’язок дозволяє прогнозувати значення основних показників якості та кількісного росту осаджуваного покриття при широкій зміні параметрів елементів кола, аналізувати вплив кожного параметра на кінцевий результат. Проте такий підхід має і суттєві обмеження. По-перше, метод перетворення змінних придатний до аналізу процесів у колах, що містять лише два енергоємні елементи, і відповідно електромагнітні процеси в яких описує нелінійне диференціальне рівняння другого порядку, по-друге отриманий розв’язок є наближеним, і нарешті отримати розв’язок у явному вигляді можливо не при усіх видах апроксимації нелінійності системи, зокрема автором розглянуто лише апроксимацію кубічним поліномом.

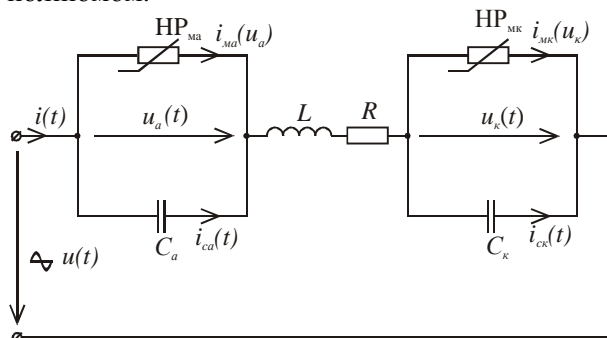


Рис. 1. Загальна схема електролізера осадження металу

Оскільки електрична схема заміщення електролізера рис. 1 має найбільш загальний харак-

тер серед усіх розглянутих схем і є їх узагальненням, зупинимось на ній детальніше. Нижче (табл. 1) представлена відповідність між процесами в електролізері осадження та електричними елементами, що їх заміщують.

Таблиця 1

Співставлення явищ в електролізері та елементів схеми заміщення рис. 1

Фізичне явище	Електричний елемент схеми заміщення
Розряд іонів металу, що осаджується на катоді	Нелінійний резистор, $HP_{\text{мк}}$
Накопичення електричних зарядів біля поверхні катоду	Ємність, $C_{\text{к}}$
Виділення водню на катоді	Нелінійний резистор, $HP_{\text{н}}$
Розчинення металу аноду	Нелінійний резистор, $HP_{\text{ма}}$
Накопичення зарядів біля поверхні аноду	Ємність, $C_{\text{а}}$
Теплові втрати в електроліті	Лінійний резистор, $R$
Створення магнітного поля в електроліті струмом, що протікає в ньому	Індуктивність, $L$

Згідно зі схемою рис.1 запишемо систему рівнянь електромагнітного стану, що описує процеси у відповідному колі електролізера у вигляді

$$i(t) = i_{\text{мк}}(t) + i_{\text{ск}}(t), \quad (1)$$

$$i(t) = i_{\text{ма}}(t) + i_{\text{са}}(t), \quad (2)$$

$$u(t) = u_{\text{к}}(t) + u_{\text{а}}(t) + R \cdot i(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (3)$$

$$i_{\text{мк}}(t) = f_1(u_{\text{к}}(t)), \quad (4)$$

$$i_{\text{ма}}(t) = f_2(u_{\text{а}}(t)), \quad (5)$$

$$i_{\text{са}}(t) = C_{\text{а}} \frac{du_{\text{а}}(t)}{dt}, \quad (6)$$

$$i_{\text{ск}}(t) = C_{\text{к}} \frac{du_{\text{к}}(t)}{dt}. \quad (7)$$

Незалежні початкові умови:

$$u_{\text{к}}(0) = 0, \quad u_{\text{а}}(0) = 0, \quad i(0) = 0. \quad (8)$$

В наведених рівняннях:

$i(t)$  – повний струм електролізера;

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

$i_{\text{ма}}(t)$  – частковий струм розчинення іонів металу на аноді;

$i_{\text{ск}}(t)$ ,  $i_{\text{са}}(t)$  – ємнісні струми катоду та аноду;

$u_{\text{к}}$ ,  $u_{\text{а}}$  – прикатодний та прианодний спади напруги (катодна та анодна поляризація);

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

$f_1(u_{\text{к}}(t))$ ,  $f_2(u_{\text{а}}(t))$  – нелінійні залежності;

$R$  – активний опір електроліту;

$L$  – індуктивність електроліту.

Система рівнянь (1) – (8) описує підсистему „електролізер”, при врахуванні процесів у підсистемі „джерело живлення” її слід доповнити відповідними рівняннями, вигляд і кількість яких залежать від схеми заміщення джерела. Так, наприклад, в [14] наведено схеми заміщення та моделі різних типів джерел живлення електролізерів, проте усі вони ґрунтуються на застарілій елементній базі (одно- та двоопераційні тиристри). Модель більш сучасного однофазного джерела живлення електролізера на базі IGBT-транзисторів представлено в [13].

Очевидно, що навіть сучасні моделі другого етапу розвитку мають обмеження у застосуванні. Найсуттєвішими з них є складність отримання параметрів схем заміщень електролізерів, у першу чергу ємностей  $C_{\text{а}}$ ,  $C_{\text{к}}$ . Вони суттєво залежать передусім від форми електродів, котра в свою чергу обумовлена видом відновлюваної деталі, проте дослідники моделюють здебільшого системи з електродами у формі плоских пластин однакового перерізу. Ще одним спрощенням, котре широко застосовують дослідники [11–13], є нехтування індуктивністю електроліту. При цьому процеси в електрохімічному колі також описують диференціальними рівняннями другого порядку. Проте в окремих випадках, зокрема при осадженні прямокутними імпульсами, індуктивності власне джерела живлення, гальванічної ванни та з’єднувальних провідників мають суттєвий негативний вплив на процес осадження металу. Так, у [14] автори відзначають „завалювання” переднього фронту імпульсів струму і зменшення тим самим його максимальної густини при незмінній довжині імпульсу в електролізері осадження нікелю. В кінцевому рахунку це призводить до необхідності завантаження електролізера лише до 30 – 35 % від нормального. В тій же роботі вказано і шляхи зменшення такого впливу – використання конденсаторних джерел живлення для гальванічних ванн, проте позбутися власної індуктивності ванни повністю неможливо, тобто по-

трібно її враховувати. Лише в роботі [17] автором запропоновано наближену методику оцінки індуктивності електроліту. Поширеним спрощенням є також нехтування змінами питомого опору електроліту, що відбуваються за рахунок зменшення концентрації іонів у ньому на протязі процесу осадження.

Перспективним шляхом подолання вищевказаних обмежень може бути розробка моделей, у котрих підсистема електролізера моделюється у вигляді рівнянь його електромагнітного поля. Принципово важливим є також і те, що лише за допомогою таких моделей можливо передбачити рівномірність розподілу струму, а отже і металу по поверхні електроду, що є однією з головних проблем технічної електрохімії.

У роботі [18] між іншим представлено критичний огляд перших робіт з розв’язання польових задач в електролізерах, а також описано такі наступні наближення при рішенні польових задач.

В першому наближенні автори враховують лише геометричні фактори. Електроди при цьому вважають неполяризуємими, питомий опір електроліту вважають постійним. Зазначене наближення є відомим, як проблема первинного розподілу струму.

В другому наближенні окрім геометричних факторів враховують приелектродні спади напруги (поляризацію). При цьому приймають, що поляризація лінійно залежить від густини струму

$$u_{\text{к}} = k_1 j_{\text{МК}} + k_2, \quad (9)$$

$$u_{\text{а}} = k_3 j_{\text{Ма}} + k_4. \quad (10)$$

де  $j_{\text{МК}}$ ,  $j_{\text{Ма}}$  – густина струму катоду та аноду;

$k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$  – постійні апроксимації.

Окрім цього вважають, що питомий опір електроліту є постійним. Це наближення задачі поля можна назвати спрощеною проблемою вторинного розподілення струму.

В третьому наближенні враховують геометричні фактори та форму поляризаційної кривої

$$u_{\text{к}} = f_3(j_{\text{МК}}) + k_5, \quad (11)$$

$$u_{\text{а}} = f_4(j_{\text{Ма}}) + k_6. \quad (12)$$

при незмінному опорі електроліту. Відповідна задача має назву проблеми вторинного розподілення струму.

І, нарешті, четверте наближення передбачає урахування не тільки геометрії електролізера, поляризації електродів та питомого опору електроліту, але і наслідки, пов’язані з протіканням

концентраційних та температурних змін, котрі впливають на зміну форми поляризаційної кривої та зміни значення питомого опору електроліту в часі.

Автор відзначає високу трудоемність розв'язання задач розрахунку полів електролізерів у третьому та четвертому наближенні, і як наслідок, відсутність розв'язків таких задач на момент публікації.

У тій же роботі наведено загальну систему диференціальних рівнянь, котра характеризує електричне поле в електролітичній комірці, котра живиться від джерела постійної напруги у вигляді

$$\operatorname{div} \bar{j} = 0, \quad (13)$$

$$\bar{j} = \frac{\bar{E}}{\rho}, \quad (14)$$

$$\operatorname{rot} \bar{E} = 0. \quad (15)$$

де  $\bar{j}$  – вектор густини струму;

$\bar{E}$  – вектор напруженості електричного поля;  
 $\rho$  – питомий опір електроліту.

Прикладом розв'язання польової задачі у другому наближенні може служити робота [19]. Автор розраховує тримірне поле в електролізері довільної форми, що живиться несинусоїдним (так званим перервно-реверсованим) струмом за допомогою метода вторинних джерел з використанням ЕОМ. Вирішення аналогічної задачі для двомірних полів представлено в [20, 21].

Слід зазначити, що дослідження у напрямку моделювання систем електролітичного осадження металів не обмежуються зазначеними напрямками. Зокрема активно розвивається новий підхід у дослідженні таких систем [22], який базується на фізико-хімії процесів у цих системах. А також поняття хаосу та самоорганізації. Так, наприклад, в роботі [23] математичну модель електролізера описано системою рівнянь неперервності та Пуассона. Досліджено стійкість процесів з позицій синергетики та теорії дисипативних структур. Авторами отримано також співвідношення, котрі дозволяють визначити взаємозв'язок флуктуацій електричної провідності та густини тепловиділення з флуктуаціями густини концентрацій заряджених компонент системи. Отже, можна констатувати послаблення уваги дослідників до описаного вище, на наш погляд, дуже перспективного підходу в моделюванні електрохімічних кіл.

## Висновки

Порівняльний аналіз математичних моделей систем електроосадження металів дозволяє зробити висновок, що нелінійні динамічні моделі типу „джерело живлення” – „електролізер” є найбільш ефективним засобом попереднього вибору ефективних параметрів режимів електроосадження металів. Використання таких моделей значно скорочує необхідний обсяг експериментальних досліджень та здешевлює розробку нових установок осадження металів.

Обмеження, що існують при використанні моделей зазначеного типу, пов'язані з тим, що при моделюванні підсистеми „електролізер” дослідники обмежуються моделюванням електричного кола, яке є еквівалентним електрохімічній системі, що вивчається і відповідно не враховують форму електродів та конфігурацію електролітичної комірки. При такому підході можливо змоделювати лише електролізери окремих конфігурацій, для яких на основі експериментальних даних є відомими параметри схеми заміщення. Слід також відзначити, що існуючі на сьогодні моделі підсистеми типу „джерело живлення” розроблено для імпульсних джерел живлення, що побудовані на застарілій елементній базі.

Перспективним шляхом подолання зазначених труднощів може стати розробка моделей електротехнічних комплексів імпульсного електроосадження металів, в яких підсистема „електролізер” моделюється за допомогою системи рівнянь електромагнітного поля, а модель підсистеми „джерело живлення” моделюється відповідними рівняннями електромагнітного стану електричної схеми заміщення кола джерела, що побудована з врахуванням особливостей сучасної напівпровідникової елементної бази. Такий підхід дозволить, по-перше, розробляти моделі для значно ширшого кола установок електроосадження металів з електродами довільної форми, по-друге, суттєво уточнити методику визначення індуктивності електроліту яка на сьогодні є суто оціночною; і, нарешті застосувати математичне моделювання для розв'язання нових прикладних задач таких, як прогнозування та забезпечення рівномірності шару покриття на поверхні електроду.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Gerischer H. Wechselstrompolarisation von Elektroden mit einem Potentialbestimmenden schritt beim gleichgewichtspotential [Text] / H. Gerischer // Zeitschrift Phys. Chem. – 1952. – V. 201, № 1/2. – S. 55 – 67.

2. Erdey-Gruz T. Zur Frage der electrolytischen Metallüberspannung [Text] / T. Erdey-Gruz, I. Devay // Zeitschrift Phys. Chem. – 1961. – V. 67. – S. 55 – 67.

3. Косов В. П. Диффузионная кинетика при нестационарных электродных процессах [Текст] / В. П. Косов, Н. К. Гораш // Электродная обработка материалов. – 1976. – №3(69). – С. 27 – 29.

4. Нигматуллин Р. Ш. Общее уравнение и электрический аналог электролитической ячейки со сферическим микроэлектродом [Текст] / Р. Ш. Нигматуллин // Докл. АН СССР, - Т.151, №6. – С. 1383 – 1386.

5. Графов Б. М. Электрохимические цепи переменного тока [Текст]: научное издание / Б. М. Графов, Е. А. Укше. – М.: Наука, 1973. – 127 с.

6. Графов Б. М. Метод эквивалентного многополюсника в теории электродного импеданса [Текст] / Б. М. Графов, Э. В. Пекар. // Электрохимия. – 1970. – Т.6, №4. – С. 547 – 556.

7. Черненко В. И. Прогрессивные импульсные и переменные токовые режимы электролиза [Текст]: научное издание / В. И. Черненко, К. И. Литовченко, Н. И. Папанова. – К.: Наукова думка, 1988. – 176 с.

8. Багоцкий В. С. Основы электрохимии [Текст]: учебник / В. С. Багоцкий. – М.: Химия, 1988. – 400 с.

9. Franck U. F. Instabilitätserscheinungen an passivierbaren Metallen [Text] / U. F. Franck // Zeitschrift für Elektrochemie. – 1958. – Bd.62. – S.649 – 655.

10. Franck U. F., Fitzhugh R. Periodische Elektrodenprozesse und ihre Beschreibung durch ein mathematisches Modell [Text] / U. F. Franck, R. Fitzhugh // Zeitschrift für Elektrochemie. – 1961. – Bd.65. – S.156 – 168.

11. Костин Н. А. Теоретическое обоснование и разработка технологических режимов электроосаждения металлов импульсным током [Текст]: дисс... д-ра техн. наук: 05.17.03. / Н. А. Костин. – Днепропетровск, 1983. – 458 с.

12. Бакум В. А. Импульсные источники питания электротехнологических установок гальванического осаждения металлов [Текст]: дисс... канд. техн. наук: 05.09.03. / В. А. Бакум. – Днепропетровск, 1997. – 177 с.

13. Бондар О. І. Вибір параметрів електротехнологічної установки гальванічного відновлення зношених деталей машин [Текст] / О. І. Бондар // Технічна електродинаміка. Темат. вип. „Проблеми сучасної електротехніки”. – 2006. – Ч. 3. – С. 103 – 108.

14. Костин Н. А. Применение гальванотехники при ремонте подвижного состава [Текст]: научное издание / Н. А. Костин, А. А. Куликов – М.: Транспорт. – 1981. – 109 с.

15. Артемчук В. В. Підвищення надійності корпусів букс колісних пар електровозів [Текст]: дисс... канд. техн. наук: 05.22.09 / В. В. Артемчук. – Дніпропетровськ, 2002. – 203 с.

16. Михайленко Ю. В. Разработка и оценка надежности технологического процесса восстановления

деталей электровозов гальваническим железением [Текст]: дисс... канд. техн. наук: 05.22.07 / Ю. В. Михайленко. – Днепропетровск, 1995. – 163 с.

17. Бондар О. І. Аналіз електричних кіл з нелінійними електрохімічними елементами методом перетворення змінних [Текст]: дисс... канд. техн. наук: 05.09.05 / О. І. Бондар. – Дніпропетровськ, 2006. – 181 с.

18. Гнусин Н. П. Моделирование электрических полей в электролитах и некоторые вопросы равномерности распределения тока на электродах [Текст] / Н. П. Гнусин // Ученые записки БелИИЖТа. – Гомель: Изд-во при БелИИЖТе. – 1957. – Вып. IV. – 208 с.

19. Костин Н. А. К расчету равномерности гальванических покрытий методом вторичных источников [Текст] / Н. А. Костин // Вопросы усовершенствования процессов гальванопокрытий при ремонте подвижного состава: Труды ДИИТа. – Днепропетровск: Изд-во при ДИИТе. – 1975. – Вып. 173/1. – С. 32 – 36.

20. Костин Н. А. Обратная краевая задача модификации профиля анода электролизера [Текст] / Н. А. Костин // Вопросы усовершенствования процессов гальванопокрытий при ремонте подвижного состава: Труды ДИИТа. – Днепропетровск: Изд-во при ДИИТе. – 1975. – Вып. 173/1. – С. 42 – 44.

21. Костин Н. А. Метод пересчета распределения тока и металла на деталях при изменении профиля электролизера [Текст] / Н. А. Костин // Вопросы усовершенствования процессов гальванопокрытий при ремонте подвижного состава: Труды ДИИТа. – Днепропетровск: Изд-во при ДИИТе. – 1975. – Вып. 173/1. – С. 32 – 36.

22. Нечипорук В. В. Самоорганизация в электрохимических системах [Текст]: научное издание / В. В. Нечипорук, И. Л. Эльгурт. – М.: Наука, 1992. – 168 с.

23. Нефедов П. В. Возмущения и неустойчивости в процессах амбиполярной диффузии [Текст] / П. В. Нефедов, В. Ф. Резцов // Доповіді. НАН України. – 2004. – № 1. – С. 81-84.

**Ключові слова:** моделювання, енергетичний комплекс, електроліт, осадження металів.

**Ключевые слова:** моделирование, энергетический комплекс, электролит, осаждение металлов.

**Keywords:** simulation, energy complex, electrolyte, deposition of metals.