

*д.т.н. Заблодський М.М.,
к.т.н. Ямкова М.А.
(ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна, Fosse2006@mail.ru),
Шадрін С.В.
(ТОВ «Нафтапромторг», м. Алчевськ, Україна)*

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ РОЗМІРНОЇ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ ОБРОБКИ ВВЕДЕННЯМ КОРЕГУЮЧОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ

Запропоновано створювати при електрохімічній обробці дефектного стрижня в роторі асинхронного двигуна корегуюче магнітне поле для підвищення точності видалення стрижня. Розглянуто особливості процесу при круглих, еліптичних і прямокутних пазах в роторі.

Ключові слова: електрохімічна обробка, пази в роторі, напруженість магнітного поля, густина струму.

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

Як відомо, асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором найбільш поширені у промисловості і в побутовій техніці завдяки своїм перевагам, основними з яких є простота конструкції і надійність. Та, на жаль, і у цих двигунів можуть бути дефекти, що виникають під час їх виготовлення і експлуатації.

Серед цих дефектів найбільш часто зустрічаються пошкодження ротору, тобто ослаблення стрижнів у пазах, порушення контакту в місцях припайки стрижня до короткозамикаючих кілець, виникнення тріщин і обривів стрижнів. Ці обриви можуть призвести до затягування часу пуску, а при тяжких умовах запуску двигун або не розв'є потрібної швидкості, або, при обриві зразу кількох стрижнів, взагалі не запуститься. До того ж порушення симетрії магнітних потоків викликає підвищення вібрації і шуму.

Для виявлення таких дефектів існують різні методи (вимірювання магнітного потоку розсіювання, безпосереднє вимірювання активного опору стрижнів, магнітна порошкова дефектоскопія тощо), які досить широко освітлені у літературі і застосовуються на практиці [1]. Після визначення дефектного стрижня його потрібно видалити. Звичайно для цього пропонується висвердлювати стрижень свердлами з подовженим хвостом.

Але на практиці такий спосіб не можна признати зручним, бо зі збільшенням довжини свердла збільшуються і погрішності обробки. До того ж пази в роторі, а отже і стрижні, можуть мати різні конфігурації (рис. 1), при яких їх доволі складно видалити фрезеруванням. Теоретично для видалення довгого і тонкого стрижня складної форми можна застосувати кілька способів: випалення алюмінія з пазів при нагріванні до температури 700 °С і хімічне витравлення лужним розчином.

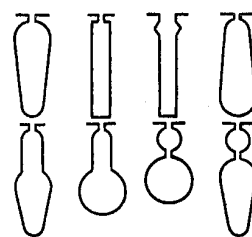


Рисунок 1 - Форми пазів у роторі асинхронних двигунів

На жаль, виявилось, 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) [2]. Сутність способу полягає в отриманні на місці стрижня отвору, який повторює за формою і розмірами сам паз. Форма паза при цьому не має значення.

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.

Електрохімічна обробка здійснюється завдяки струму, що протікає у силовому колі електротехнічного комплексу для електрохімічної обробки. При протіканні цього струму створюється магнітне поле, перпендикулярне до струму, а наявність електричного і магнітного полів викликає виникнення складової швидкості електроліту, що направлена назовні пазу (рис.2). При цьому знижується точність електрохімічної обробки і починає руйнуватися бокова поверхня пакету, в якому встановлено стрижень, що не можна признати задовільним.

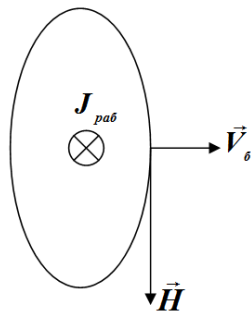


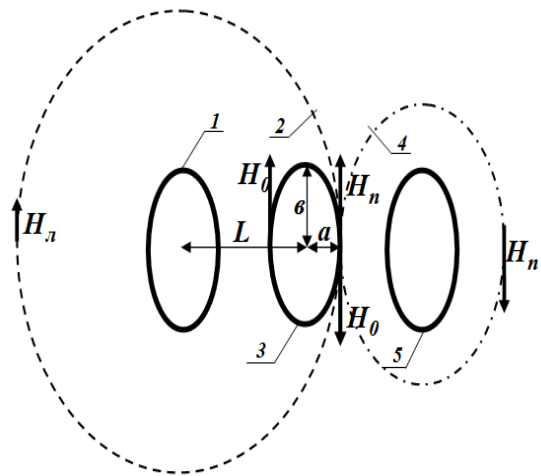
Рисунок 2 – Напрямок бокової швидкості електроліту

Для підвищення точності розмірної електрохімічної обробки потрібно зменшувати бокову швидкість електроліту.

Аналіз досліджень і публікацій.

У існуючій літературі [3] або зовсім не приділяється увага боковій швидкості електроліту, або запропоновано ввести в міжелектродний проміжок додаткове джерело ЕРС для створення додаткового струму, направлено поперек проміжку. При цьому магнітне поле також змінює свій напрям, і міжелектродний проміжок стає фактично магнітогідродинамічним насосом. На жаль, при існуючих величинах міжелектродного проміжку можливість введення в нього додаткового джерела ЕРС виглядає сумнівною.

Але якщо повністю усунути бокову швидкість проблематично, можна зменшити її. Нами для цього запропоновано ввести у сусідні з оброблюваним стрижнем додатковий струм, направлений так само, як і робочий. Тоді ці струми будуть створювати магнітні поля, напруженості яких зможуть компенсувати напруженість, створену в оброблюваному стрижні (рис.3). Можна так розрахувати значення цих компенсаційних струмів, що бокова швидкість електроліту змінить свій напрям, і при обробці не буде руйнуватися пакет, тобто підвищиться точність обробки.



1 – лівий стрижень; 2 – магнітна силова лінія поля, створеного протікаючим по лівому стрижню струмом; 3 – оброблюваний стрижень; 4 – магнітна силова лінія поля, створеного протікаючим по правому стрижню струмом; 5 – правий стрижень;
 H_l - напруженість магнітного поля, створеного протікаючим по лівому стрижню струмом;
 H_n - напруженість магнітного поля, створеного протікаючим по правому стрижню струмом;
 H_o - напруженість магнітного поля, створеного протікаючим по оброблюваному стрижню струмом

Рисунок 3 – Створення компенсаційного магнітного поля

Постановка задачі.

Для підвищення точності розмірної електрохімічної обробки треба розрахувати значення компенсаційних струмів, що вводяться в сусідні з оброблюваним стрижні при різних формах пазів у роторі.

Основні результати досліджень.

Найчастіше в роторі асинхронних двигунів зустрічаються пази круглі, овальні і прямокутні пази, а також пази з конфігурацією, яка є комбінацією цих форм. Розглянемо вплив корегуючого магнітного поля на поле, що створюється при протіканні робочого струму в оброблюваному стрижні.

Зупинимося спочатку на випадку **круглих пазів**, який є найпростішим з точки зору теоретичного вивчення.

Як відомо, напруженість магнітного поля у провіднику визначається наступним чином [4]:

$$H_o = \frac{J_o \cdot R}{2}, \quad (1)$$

де H_o - напруженість магнітного поля, що створюється робочим електричним струмом у оброблюваному стрижні;

J_o - густина робочого струму;

R - радіус стрижня в роторі.

Густина робочого струму при електрохімічній обробці залежить від багатьох електричних, геометричних і гідравлічних факторів (напруги, розміру електродів, між електродного проміжку, режиму течії електроліту, його концентрації тощо). За нашими дослідженнями

$$j_o = D \text{grad} C + \frac{DmF\vec{E}}{RT} C,$$

де C - концентрація електроліту, \vec{v} - швидкість електроліту, D - коефіцієнт дифузії, m - валентність іонів електроліту, R - газова постійна, T - температура електроліту по Кельвіну, F - постійна Фарадея, \vec{E} - напруженість електричного поля у міжелектродному проміжку.

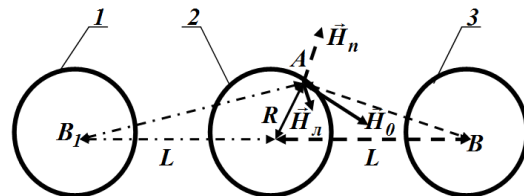
Зовні провідника напруженість магнітного поля визначається наступним чином

$$H_{л} = \frac{J_o \cdot R^2}{2 \cdot r_{л}}; \quad H_n = \frac{J_o \cdot R^2}{2 \cdot r_n}, \quad (2)$$

де $H_{л}$ - напруженість магнітного поля, яке створене струмом у лівому пазі; $r_{л}$ -

відстань від осі лівого провідника до завданої точки, H_n - напруженість магнітного поля, яке створене струмом у правому пазі; r_n - відстань від осі правого провідника до завданої точки

Для визначення сумарної напруженості магнітного поля у завданій точці треба, користуючись принципом суперпозиції, визначити значення напруженостей, які створюються робочим струмом у оброблюваному стрижні і двома компенсаційними струмами у сусідніх стрижнях. При цьому необхідно враховувати що вектор напруженості іде під прямим кутом до радіус-вектора, який з'єднує вісь провідника і завдану точку (рис.4).



1 – лівий стрижень; 2 – оброблюваний стрижень; 3 – правий стрижень; $H_{л}$ - напруженість магнітного поля, створеного протікаючим по лівому стрижню струмом; H_n - напруженість магнітного поля, створеного протікаючим по правому стрижню струмом; H_o - напруженість магнітного поля, створеного протікаючим по оброблюваному стрижню струмом

Рисунок 4 – Напруженості магнітних полів, створених струмами у трьох стрижнях

Розглянемо розподіл напруженостей на кордоні між стрижнем і пакетом, тобто на окружності радіусу R . Треба врахувати, що відстані від осей лівого і правого стрижнів до точки будуть змінюватися в залежності від її координати. Будемо використовувати полярні координати R, φ .

Введемо позначення, зміст яких зрозумілий з рис.5.

Знайдемо значення напруженостей, що створюються 3 струмами, і кути між їх напрямками. Для цього треба визначити $r_{л}$ і

r_n - відстані від осей лівого і правого стрижня до точки, що знаходиться на оброблюваному стрижні:

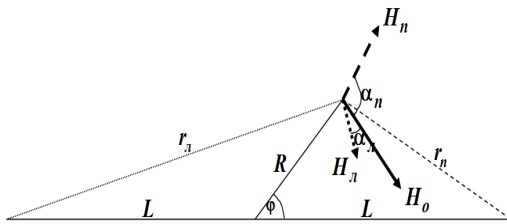


Рисунок 5 – Напрям напруженостей

$$r_n = \sqrt{R^2 + L^2 - 2RL \cos \varphi},$$

$$r_l = \sqrt{R^2 + L^2 + 2RL \cos \varphi},$$

де R - радіус стрижня, L - відстань між осями стрижнів.

Кути між напруженостями знаходяться так:

$$\alpha_n = \arccos \frac{R^2 + r_n^2 - L^2}{2Rr_n},$$

$$\alpha_l = \arccos \frac{R^2 + r_l^2 - L^2}{2Rr_l}.$$

Після визначення напруженостей за виразами (1) і (2) знайдемо корегуючу напруженість H_k , створену струмами у лівому і правому стрижнях, і кут α_k між нею і H_n (рис.6):

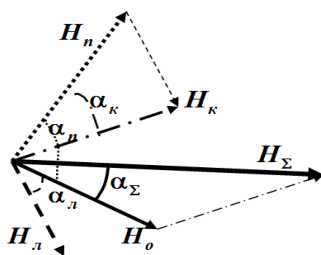


Рисунок 6 – Вектори напруженостей і кути між ними

$$H_k = \sqrt{H_n^2 + H_l^2 + 2H_n H_l \cos(\alpha_n + \alpha_l)},$$

$$\alpha_k = \arccos \frac{H_n^2 + H_k^2 - H_l^2}{2H_n H_k}.$$

Визначимо загальну напруженість H_Σ і кут α_Σ між нею і напруженістю, створеною робочим струмом:

$$H_\Sigma = \sqrt{H_o^2 + H_k^2 + 2H_o H_k \cos(\alpha_n - \alpha_k)}$$

$$\alpha_\Sigma = \arccos \frac{H_o^2 + H_\Sigma^2 - H_k^2}{2H_o H_\Sigma}.$$

За цими виразами був визначений розподіл загальної напруженості (у відносних одиницях) і кута α_Σ між нею і напруженістю, створеною робочим струмом по висоті паза (теж у відносних одиницях).

Для підвищення точності електрохімічної обробки необхідно, щоби бокова швидкість була направлена всередину паза, а для цього загальна напруженість повинна бути направлена протилежно тій напруженості, що створюються робочим струмом, тобто в ідеальному випадку $\alpha_\Sigma \rightarrow \pi$. При цьому значення загальної напруженості не має вирішального значення, бо вона створює бокову швидкість електроліту, направлену всередину стрижня, і точність обробки при таких умовах не знижується.

Напруженість магнітного поля залежить від густини струму. Густина робочого струму в електроліті визначається параметрами процесу електрохімічної обробки і не може перевищувати $J_{пред}$. Зрозуміло, що ця величина значно менша, ніж допустима густина струму у алюмінієвих стрижнях. Для створення компенсаційних полів треба визначити достатню густину струму у цих стрижнях, бо якщо вона буде дорівнювати густині струму в електроліті, значної компенсації отримати не вдасться, оскільки напруженість магнітного поля зовні провідника зворотно-пропорційна відстані від його осі до заданої точки (див.2). На рис. 7 і 8 наведено розподіл загальної напруженості і кута компенсації по висоті паза у відносних одиницях при цих умовах.

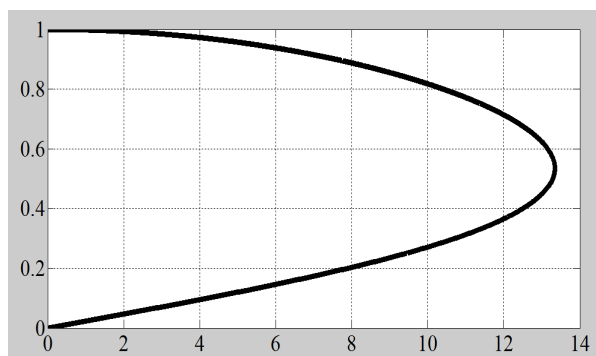


Рисунок 7 – Розподіл кутів між сумарною і основною напруженостями по висоті пазу при $J_n = J_d = J_o$

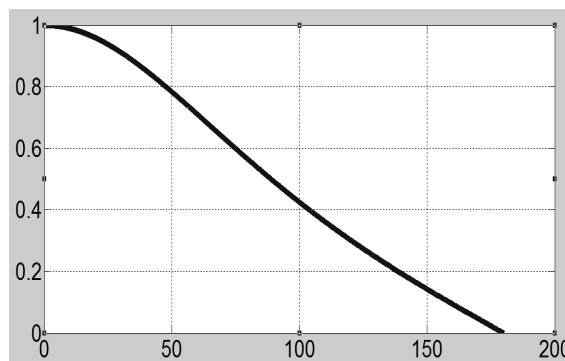


Рисунок 9 – Розподіл кутів між сумарною і основною напруженостями по висоті пазу при $J_n = J_d = 5J_o$

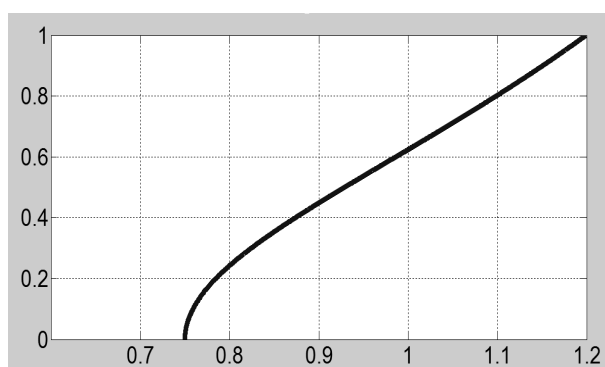


Рисунок 8 – Розподіл сумарної напруженості по висоті пазу у відносних одиницях при $J_n = J_d = J_o$

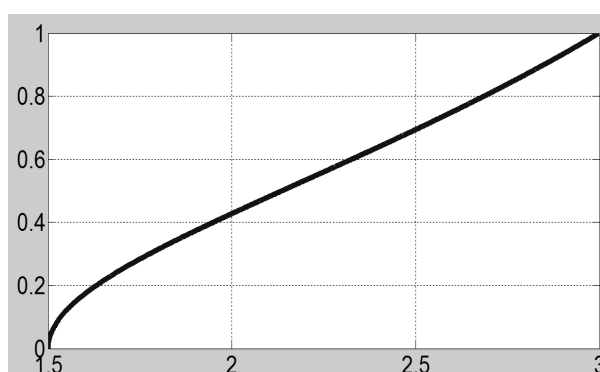


Рисунок 10 – Розподіл сумарної напруженості по висоті пазу у відносних одиницях при $J_n = J_d = 5J_o$

Як видно з цих рисунків, при компенсаційних струмах, що дорівнюють робочим, особливого ефекта добитися не вдається – напруженість магнітного поля, а отже і бокова швидкість електроліту змінює свій напрям максимум на 13 градусів, що недостатньо для підвищення точності. Значення напруженості знижується теж незначно (максимум на 25 відсотків), а у верхній частині пазу взагалі підвищується, у той час як для отримання точності необхідно або змінити напрям напруженості магнітного поля на протилежний, або, при незмінному напрямі, значно зменшити її величину.

Таким чином, для підвищення точності обробки необхідно, щоби густина корегуючого струму була більша чим густина робочого струму. На рис. 9 і 10 наведені результати при $J_n = J_d = 10J_o$.

При густині корегуючого струму $J_n = J_d = 5J_o$ вдається значно змінити напрям загальної напруженості. Модуль її при цьому збільшується, але це практично не має значення, оскільки бокова швидкість направлена всередину пазу, що підвищує точність обробки.

Розглянемо випадок **еліптичних пазів**. Принцип корекції магнітного поля аналогічний випадку круглих пазів, тобто введення струмів, що за напрямом співпадають в робочим струмом, у два сусідніх пази (див. рис. 3). Різниця полягає у розподілі магнітного поля. На рис.11 наведено екіпотенціали і лінії струму у цьому випадку [4].

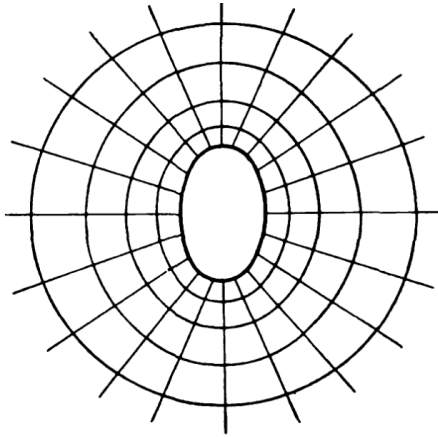


Рисунок 11 – Картина поля при еліпсоїдних пазах

Визначення напруженості можливе кількома методами: перетворенням еліптичного кордону до кругового методом конформних перетворень, використанням еліптичних функцій [4] і безпосередньо в еліптичній системі координат ξ, η [5], де ξ визначає софокусні витягнуті еліпсоїди обертання, а η - гіперболоїди обертання (рис.11).

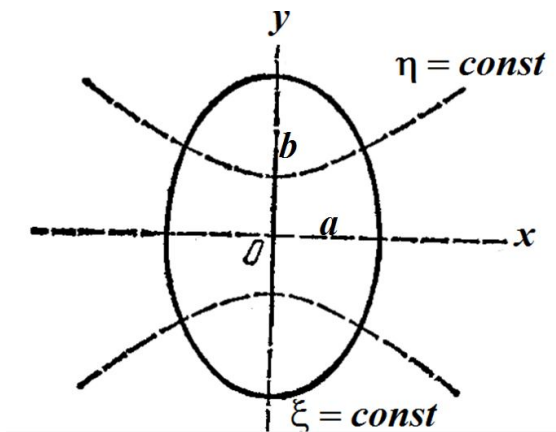


Рисунок 12 – Система координат витягнутого еліпсоїда

Як показано в [5], напруженість магнітного поля у цьому випадку визначається таким виразом:

$$H = \frac{J}{\sqrt{b^2 - a^2}} \operatorname{Arth} \sqrt{\frac{b^2 - a^2}{\xi + a^2}},$$

де b і a - велика і мала полуосі еліпсоїда відповідно, J - густина струму. Напрями напруженостей у цьому випадку представлені на рис.3, а розрахунок загальної напруженості і куту корекції аналогічний випадку круглих пазів, за винятком визначення напруженостей магнітних полів, що створюються робочим і компенсаційними струмами. Для знаходження цих значень потрібно перейти від системи координат витягнутого еліпсоїда до декартової системи. Як вказано у [5]:

$$\xi = \left(\frac{r_1 + r_2}{2} \right)^2 - a^2,$$

$$r_1^2 = x^2 + \left(y - \sqrt{b^2 - a^2} \right)^2,$$

$$r_2^2 = x^2 + \left(y + \sqrt{b^2 - a^2} \right)^2.$$

Результати розрахунків показали, що як і у попередньому випадку, густина корегуючого струму повинна бути вище густини робочого струму, бо інакше не вдається значно зменшити напруженість магнітного поля, створену робочим струмом. А при $J_n = J_n = 5J_o$ вдається досягнути бажаного результату (рис.13 і 14).

У верхній частині пазу напрям напруженості, а, отже, і бокової швидкості змінюється найменше, оскільки відстані від додаткових струмів до верхівки пазу однакові і напруженості, що створюються цими струмами, компенсують одна одну.

У середніх же частинах пазу відстані між осями сусідніх пазів і поверхнею оброблюваного пазу будуть різними, значить, різними будуть і напруженості, що створені струмами у лівому і правому стрижнях у заданій точці. У верхній третині пазу напрям напруженості змінюється від 0 до 60°, а в інших двох третинах кут між скорегованою напруженістю і напруженістю, створеною робочим струмом сягає від 60° до 180°. Модуль напруженості при цьому зростає, але це не має великого значення, оскільки бокова швидкість електроліту буде направлена всередину пазу, тобто точність обробки буде підвищуватися.

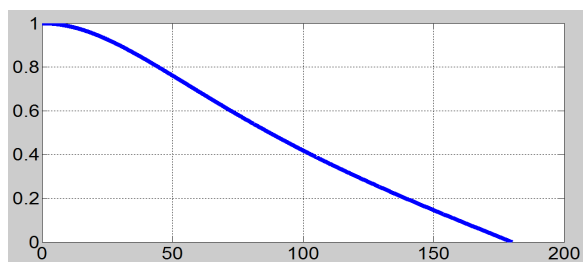


Рисунок 13 – Розподіл кутів між сумарною і основною напруженостями по висоті пазу при $J_n = J_l = 5J_o$

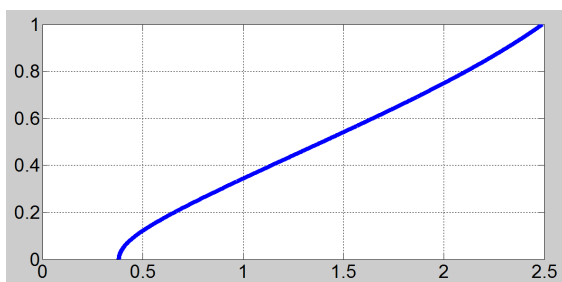


Рисунок 14 – Розподіл сумарної напруженості по висоті пазу у відносних одиницях при $J_n = J_l = 5J_o$

Розглянемо також випадок **прямокутних пазів**. Поле прямокутного провідника можна розрахувати кількома методами: методом Роговського, методом Рота, використовуючи конформне перетворення до безкінечної прямої лінії або одиначної окружності, а також визначивши векторний магнітний потенціал. Найбільш зручним нам здається знаходження складових напруженості через векторний магнітний потенціал [4]. Картина поля при цьому наведена на рис. 15.

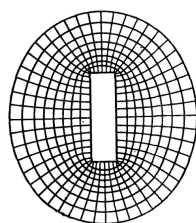


Рисунок 15 – Картина поля навколо прямокутного провідника

Для визначення складових напруженості застосовуються такі вирази:

$$H_x = \frac{I}{8\pi ab} \left[\begin{aligned} &(y+b)(\Theta_1 - \Theta_2) - \\ &-(y-b)(\Theta_4 - \Theta_3) + \\ &(x+a)\ln \frac{r_2}{r_3} - (x-a)\ln \frac{r_1}{r_4} \end{aligned} \right],$$

$$H_y = -\frac{I}{8\pi ab} \left[\begin{aligned} &(x+a)(\Theta_2 - \Theta_3) - \\ &-(x-a)(\Theta_1 - \Theta_4) + \\ &+(y+b)\ln \frac{r_2}{r_1} - (y-b)\ln \frac{r_3}{r_4} \end{aligned} \right]$$

Позначення у виразах зрозумілі з рис. 16.

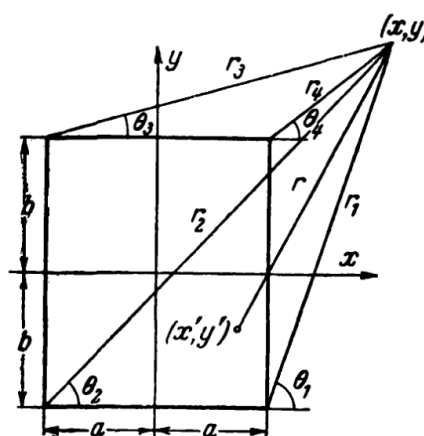


Рисунок 16 – До визначення складових напруженості магнітного поля

Принцип розрахунку такий же, як у попередніх випадках: у заданій точці знаходилися складові напруженості магнітних полів, що створюються робочим струмом у оброблюваному стрижні і двома рівним компенсаційним струмами у сусідніх стрижнях. Тільки у цьому випадку немає сенсу визначати кути між загальною і робочою напруженостями, оскільки нас цікавить на бокових гранях поперечна складова напруженості, яка створиватиме бокову швидкість, направлену назовні пазу, а на верхній і нижній сторонах – повздовжня складова напруженості, яка теж буде створювати бокову швидкість, направлену назовні пазу. Для підвищення точності обробки треба змінити напрям загальної напруженості відносно робочої.

Як показують розрахунки, і в цьому випадку компенсаційні струми повинні перевищувати робочий струм в оброблюваному стрижні. Тоді вдається отримати бажані результати (рис. 17).

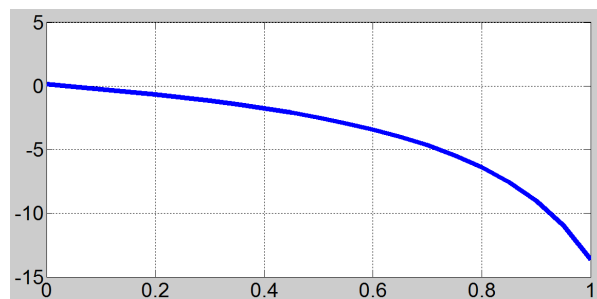


Рисунок 17 – Залежність у відносних одиницях поздовжньої напруженості від координати при компенсаційному току, що дорівнює 5 робочим.

Як видно, вже при струмі, який у 5 разів перевищує робочий струм електрохімічної обробки, вдається на 97% пазу змінити напрям загальної напруженості на протилежний. При цьому бокова швидкість електролізу направлена всередину пазу і точність електрохімічної обробки підвищується.

Бібліографічний список

1. Видеман Е. Конструкции электрических машин / Е. Видеман, В. Келленберер. – М.: Энергия
2. 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 патенто-власник Донбаський державний технічний університет. - № 77041; заявл. 29.06.2004 ; опубл. 16.10.2006, Бюл. № 10.
3. Орлов В.Ф. Электрохимическое формообразование / В.Ф. Орлов, Б.И. Чугунов. – М.: Машиностроение, 1990.
4. Бинс К. Анализ и расчет электрических и магнитных полей / К. Бинс, П. Лауренсон. – М.: Энергия, 1970.
5. Ландау Л.Д. Электродинамика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1982.

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

Стаття надійшла до редакції 25.06.13.

д.т.н. Заблодский Н.Н., к.т.н. Ямковая М.А., Шадрин С.В. (ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)
**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РАЗМЕРНОЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
 ВВЕДЕНИЕМ КОРРЕКТИРУЮЩЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Предложено создавать при электрохимической обработке дефектного стержня в роторе асинхронного двигателя корректирующее магнитное поле для повышения точности удаления

стержня. Рассмотрены особенности процесса при круглых, эллиптических и прямоугольных пазах.

Ключевые слова: *электрохимическая обработка, пазы в роторе, напряженность магнитного поля, плотность тока.*

Zablodskiy N.N., Yamkovaya M.A., Shadrin S.V. (DonSTU, Alchevsk, Ukraine)

IMPROVING THE ACCURACY OF THE DIMENSIONAL ELECTROCHEMICAL MACHINING INTRODUCTION OF CORRECTIVE MAGNETIC FIELD

Suggested to create an electrochemical processing defective rod in the rotor induction motor corrective magnetic field to increase the accuracy of removal of the rod. Considered are the peculiarities of the process under round, elliptical and rectangular slots.

Key words: *electrochemical treatment, grooves in the rotor, magnetic field strength, current density.*