



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **102590** (13) **U**  
(51) МПК (2015.01)  
*H02K 17/02* (2006.01)  
*G01R 19/00*

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
УКРАЇНИ

## (12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки:	u 2015 03860	(72) Винахідник(и):	Огарь Віта Олександрівна (UA)
(22) Дата подання заявки:	23.04.2015	(73) Власник(и):	КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО, вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, Полтавська обл., 39600 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель:	10.11.2015		
(46) Публікація відомостей про видачу патенту:	10.11.2015, Бюл.№ 21		

## (54) СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТ В СТАЛІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З УРАХУВАННЯМ НАСИЧЕННЯ

### (57) Реферат:

Спосіб визначення втрат в сталі асинхронного двигуна з урахуванням насичення полягає у вимірюванні напруги, струму статора, визначенні втрат в сталі в функції е.р.с. з досліду неробочого ходу. Для врахування вищих гармонійних струму розглядається схема заміщення асинхронного двигуна, у якій виділяються дві е.р.с, одна з яких наводиться в контурі струмом, який змінюється у часі, друга - е.р.с, яка є джерелом вищих гармонійних струму, що протікає по ланцюгу, у зв'язку з цим схема заміщення поділяється на дві складові: перша справедлива для першої гармоніки струму, друга - для вищих гармонійних, величина е.р.с. розраховується на основі параметрів схеми заміщення та виміряного струму статора.

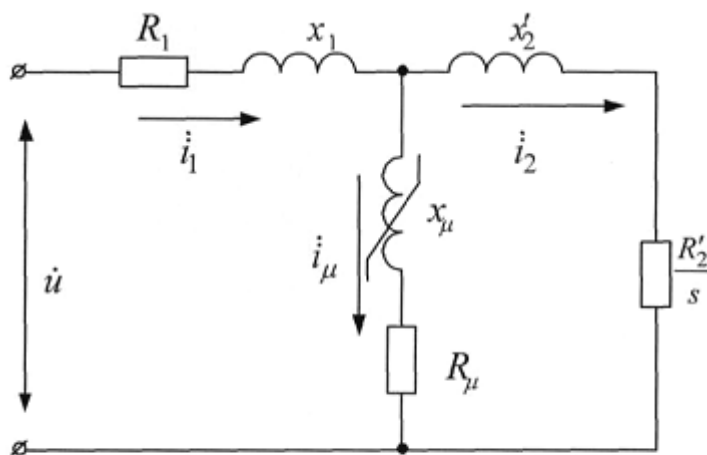


Fig. 1

UA 102590 U



Корисна модель належить до електротехніки, а саме до ідентифікації і паспортизації асинхронних двигунів, і може бути використана під час побудови систем управління електроприводом за мінімумом втрат в сталі та оцінюванні теплового стану асинхронного двигуна загальнопромислового призначення на підприємствах з метою підвищення їх ресурсу працездатності.

Однією з основних причин виходу з ладу асинхронних двигунів є пробій ізоляції обмотки, що обумовлено її тепловим старінням. Значний вплив на перегрів ізоляції чинять втрати в сталі двигуна. У асинхронних двигунів (АД), які пройшли стадію ремонтних операцій, зростає струм неробочого ходу, знижується перевантажувальна здатність, пусковий і номінальний моменти, зростає рівень енергоспоживання.

Відомий спосіб визначення втрат в сталі асинхронного двигуна на основі дослідів неробочого ходу [ГОСТ 7217-87. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний. Москва, 1987]. Спосіб полягає у визначенні струму та втрат неробочого ходу у режимі не навантаженого двигуна. Вимірюються лінійні напруга, струм статора, частота та підведена потужність, дослід виконується з поступовим пониженням напруги. Втрати неробочого ходу розділяються на втрати в обмотці статора та на суму втрат в сталі і механічних втрат. Розділення суми втрат в сталі та механічних втрат на складові частини виконується за залежністю цієї суми від квадрату прикладеної напруги. Величина механічних втрат визначається шляхом екстраполяції нижньої прямолінійної частини цієї залежності на нульове значення прикладеної напруги.

Недоліком даного способу є визначення втрат в сталі у функції напруги, що прикладена до обмотки статора двигуна і не враховує її активний і індуктивний опори, нехтування якими при визначенні втрат в сталі призводить до похибок у розрахунках.

Ознаки, які збігаються з суттєвими ознаками корисної моделі, що заявляється:

- вимірювання напруги та струму статора;
- розділення втрат неробочого ходу на втрати в сталі та механічні;
- визначення величини механічних втрат шляхом екстраполяції нижньої прямолінійної частини цієї залежності на нульове значення прикладеної напруги.

Відомий спосіб прийнято у якості аналогу корисної моделі, що заявляється.

Найбільш близьким до корисної моделі, що заявляється, та вибраним як прототип є спосіб визначення втрат сталі у функції е.р.с. (електрорушійна сила) [Е.М. Коварский, Ю.И. Янко. Испытание электрических машин. - М. Энергоатомиздат, - 1990, 320 с]. Спосіб полягає у визначенні втрат в сталі за допомогою формули  $p_c = p_{c_x} (E/E_x)^2$ , де  $E$  - е.р.с. обмотки якоря у режимі, для якого визначаються втрати в сталі,  $E_x$  - е.р.с. даної обмотки у досліді неробочого ходу. Втрати в сталі  $p_{c_x}$  визначаються з дослідів неробочого ходу двигуна, які включають в себе основні втрати, створені першою гармонійною магнітного поля, та змінні втрати. Змінні втрати, які створюються зубцевими гармонічними поля у зверненому до повітряного зазору шарі активної сталі, поділяються на пульсаційні - втрати від гістерезису та поверхневі - втрати від вихрових струмів.

Недоліком способу є неврахування вищих гармонійних струму, які з'являються у результаті наявності нелінійного елемента у контурі намагнічування схеми заміщення АД, що призводить до зниження точності розрахунку втрат в сталі асинхронного двигуна.

Ознаки, які збігаються з суттєвими ознаками корисної моделі, що заявляється:

- визначення втрат в сталі в функції е.р.с;
- визначення втрат в сталі з дослідів неробочого ходу.

В основі корисної моделі, що заявляється, поставлена задача визначення втрат в сталі в функції додаткової е.р.с. контуру намагнічування, що дозволяє врахувати вищі гармонійні струму, які з'являються під час роботи АД у режимі насичення.

Поставлена задача вирішується шляхом представлення схеми заміщення окремо для першої та вищих гармонік струму. При цьому для урахування вищих гармонійних струму розглядається схема заміщення АД, у якій виділяються дві е.р.с, одна з яких наводиться в контурі струмом, який змінюється у часі, друга - е.р.с, яка є джерелом вищих гармонійних струму, що протікає по ланцюгу. На основі математичного апарату та за допомогою параметрів схеми заміщення і вимірюного струму статора проводиться розрахунок складових додаткової е.р.с, що виникають у результаті нелінійності опору контуру намагнічування під час роботи АД у режимі насичення.

Технічний результат полягає у підвищенні точності визначення втрат в сталі асинхронного двигуна, що дозволить експлуатувати його у режимах, коли не буде відбуватися перегріву електричної машини та виходу її з ладу.

Корисна модель пояснюється кресленням, де на фіг. 1 зображено схему заміщення АД з урахуванням нелінійності кривої намагнічування, на якій прийнято позначення:  $R_1$  - активний опір статора;  $R'_2$  - приведений активний опір ротора;  $R_\mu$  - активний опір контуру намагнічування;  $s$  - ковзання АД;  $x_1$  - індуктивний опір статора;  $x'_2$  - приведений індуктивний опір ротора,  $x_\mu$  - нелінійний індуктивний опір контуру намагнічування,  $u$  - напруга мережі живлення,  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_\mu$  - струм відповідно статора, ротора і контуру намагнічування.

На фіг. 2 зображено схему заміщення асинхронного двигуна для лінійної системи, на якій прийнято наступні позначення:  $e$  - е.р.с. першої гармоніки;  $R_1$  - активний опір статора;  $R'_2$  - приведений активний опір ротора;  $s$  - ковзання АД;  $x_1$  - індуктивний опір статора;  $x'_2$  - приведений індуктивний опір ротора;  $x_\mu$  - нелінійний індуктивний опір контуру намагнічування,  $u$  - напруга мережі живлення,  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_\mu$  - струм відповідно статора, ротора і контуру намагнічування.

На фіг. 3 зображено схему заміщення АД для  $v$ -тої гармоніки, яка генерується нелінійним елементом на якій прийнято позначення:  $R_1$  - активний опір статора;  $R'_2$  - приведений активний опір ротора;  $s_v$  - ковзання на  $v$ -ій гармоніці асинхронного двигуна;  $x_{1v}$  - індуктивний опір статора;  $x'_{2v}$  - приведений індуктивний опір ротора на  $v$ -ій гармоніці;  $x_{\mu v}$  - індуктивний опір контуру намагнічування  $v$ -ої гармоніки;  $i_{1v}$ ,  $i_{2v}$ ,  $i_{\mu v}$  - струм відповідно статора, ротора і контуру намагнічування  $v$ -ої гармоніки;  $e_{\mu v}$  - е.р.с. вищих гармонійних, де індекс  $v$  відповідає номеру гармонік ( $v=2\dots n$ ),  $n$  - кількість гармонік, що враховуються під час розрахунків.

На фіг. 4 наведена залежність сумарних втрат в сталі та механічних АД  $P'(U^2)$  у функції напруги живлення  $U$ , на якій прийнято наступні позначення:  $U_1$ ,  $U_2$  - значення напруг, які визначаються з досліду неробочого ходу;  $P'_1$ ,  $P'_2$  - втрати, розраховані для відповідних значень напруг  $U_1$ ,  $U_2$ ;  $P'_3 = P_{\text{мех}}$  - механічні втрати асинхронного двигуна.

На фіг. 5 наведена залежність втрат в сталі АД  $P_{\text{ст}}(E'^2)$  у функції додаткової е.р.с.  $E'^2$ , на якій прийнято наступні позначення:  $P_{\text{ст}1}$ ,  $P_{\text{ст}2}$  - втрати в сталі асинхронного двигуна для рівнів напруг  $U_1$ ,  $U_2$  відповідно;  $E'^2_1$  та  $E'^2_2$  розрахункові значення додаткової е.р.с. для рівнів напруги  $U_1$ ,  $U_2$ ;  $\beta$  - кут нахилу залежності  $P_{\text{ст}}(E'^2)$

Спосіб реалізується наступним чином.

З метою підвищення точності визначення втрат в сталі асинхронного двигуна розглянемо схему заміщення двигуна з урахуванням нелінійності кривої намагнічування (фіг. 1). Наявність нелінійного елемента у контурі намагнічування схеми заміщення АД призводить до появи вищих гармонійних струму, який протікає по ланцюгу. З метою урахування цього явища при оцінюванні втрат в сталі асинхронного двигуна виділяємо дві е.р.с, одна з яких наводиться в контурі струмом, який змінюється у часі (фіг. 2), друга - е.р.с, яка є джерелом вищих гармонійних струму, що протікає по ланцюгу (фіг. 3). Тоді, схему заміщення можна розділити на дві: перша (фіг. 2) справедлива для першої гармоніки струму; друга (фіг. 3) - для вищих гармонійних.

Для визначення втрат в сталі розраховуємо е.р.с. при відомих параметрах схеми заміщення у ненасиченому стані та виміряних напрузі та струмі статора.

Для першої гармоніки струму величина е.р.с. розраховується згідно з схемою заміщення - фіг. 2:

$$e = u - i_1 z_1,$$

$$\text{де } z_1 = R_1 + jx_1,$$

де  $u$  - напруга мережі живлення;  $i_1$  - струм статора,  $z_1$  - повний опір статорного кола;  $R_1$  - активний опір статора;  $x_1$  - індуктивний опір статора.

Для розрахунку гармонійних складових додаткової е.р.с. необхідне знання гармонійних складових усіх струмів. Для цього за допомогою розкладання у ряд Фур'є знаходимо гармонійні складові виміряного струму статора.

Гармонійні складові струмів  $i_{2v}$  та  $i_{\mu v}$  відповідно знаходимо як:

$$i_{2v} = i_{1v} \frac{\sqrt{x_1^2 v^2 + R_1^2}}{\sqrt{x_2'^2 v^2 + \left(\frac{R'_2}{s_v}\right)^2}}, \quad (1)$$

де  $x'_2$  - приведений індуктивний опір ротора;  $v$  відповідає номеру гармонік ( $v = 2\dots n$ ),  $n$  - кількість гармонік, що враховуються під час розрахунків;  $R'_2$  - приведений активний опір ротора;  $s_v$  - ковзання на  $v$ -ій гармоніці АД,  $s_v = \frac{v-1+s_1}{v}$ ;  $s_1$  - ковзання АД на першій гармоніці;  $i_{1v}$  - струм статора  $v$ -ої гармоніки, тоді

$$i_{\mu v} = i_{1v} \left( 1 + \frac{\sqrt{x_1^2 v^2 + R_1^2}}{\sqrt{x_2^2 v^2 + \left(\frac{R'_2}{s_v}\right)^2}} \right), \quad (2)$$

Гармонійні складові е.р.с, згідно з залежностями (1), (2) можна розрахувати:

$$e_v = i_{1v} \left( \left( 1 + \frac{\sqrt{x_1^2 v^2 + R_1^2}}{\sqrt{x_2^2 v^2 + \left(\frac{R'_2}{s_v}\right)^2}} \right) \times \sqrt{v^2 x_{\mu}^2 + R_{\mu}^2} + \sqrt{v^2 x_1^2 + R_1^2} \right), \quad (3)$$

5

де  $x_{\mu}$  - індуктивний опір контуру намагнічування,  $R_{\mu}$  - активний опір контуру намагнічування. Втрати в сталі визначаються швидкістю зміни індукції:

$$\Delta P_{CT}(t) = c \left\{ \frac{dB(t)}{dt} \right\}^2, \quad (4)$$

10

де  $c$  - апроксимаційний коефіцієнт,  $B(t)$  - залежність магнітної індукції, яка представлена у вигляді гармонійного ряду:

$$B(t) = \sum_{k=1}^{k=\infty} (B_{ak} \sin(k\omega t) + B_{bk} \cos(k\omega t)),$$

де  $k$  - кількість гармонік,  $B_{ak}$ ,  $B_{bk}$  - синусна та косинусна складові індукції,  $\omega$  - кутова швидкість АД,  $t$  - час.

15

Також втрати в сталі можна представити у вигляді:

$$\Delta P_{CT}(t) = c' E(t)^2, \quad (5)$$

де  $E(t)$  е.р.с. в контурі намагнічування,  $c'$  - апроксимаційний коефіцієнт. Після перетворень маємо:

20

$$\begin{aligned} \Delta P_{CT}(t) &= c \left\{ \frac{dB(t)}{dt} \right\}^2 = \\ &= c \left\{ \sum_{k=1}^{k=\infty} (\omega \cdot k B_{ak} \cos(k\omega t) - \omega \cdot k B_{bk} \sin(k\omega t)) \right\}^2 = \\ &= c \left\{ \sum_{k=1}^{k=\infty} a \cdot \omega \cdot k E_{ak} \cos(k\omega t) - a \cdot \omega \cdot k E_{bk} \sin(k\omega t) \right\}^2, \\ &= c' \left\{ \sum_{k=1}^{k=\infty} \omega \cdot k E_{ak} \cos(k\omega t) - \omega \cdot k E_{bk} \sin(k\omega t) \right\}^2, \end{aligned} \quad (6)$$

де  $a$  - коефіцієнт переходу між індукцією та е.р.с. Якщо

$$B(t) = B_1 \sin(\omega t) + B_3 \sin(3\omega t) + \dots + B_v \sin(v\omega t), \quad (7)$$

25

де  $B_1, B_3 \dots B_n$  - амплітуди гармонік індукції, то е.р.с. буде дорівнювати:

$$E(t) = \frac{dB(t)}{dt} = B_1 \omega \cos(\omega t) + 3B_3 \omega \cos(\omega t) + v B_v \omega \cos(v \omega t) = a \begin{bmatrix} e_1 \omega \cos(\omega t) + 3e_3 \omega \cos(3\omega t) + \dots + \\ + v e_v \omega \cos(v \omega t) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

де  $e_1, e_2, \dots, e_v$  - гармонійні складові е.р.с.

Підставивши вираз (8) в (5) отримаємо:

5

$$\begin{aligned} \Delta P_{CT}(t) &= c' \left\{ \omega^2 e_1^2 \cos^2(\omega t) + 6\omega^2 e_1 \cos(\omega t) \times e_3 \cos(3\omega t) + 2\omega^2 e_1^2 \cos(\omega t) e_v v \cos(v \omega t) + \right. \\ &\quad \left. + 9\omega^2 e_3^2 \cos^2(3\omega t) + 6\omega^2 e_3 \cos(3\omega t) e_v v \times \cos(v \omega t) + \omega^2 e_v^2 \cos^2(v \omega t) v^2 \right\} = \\ &= c' \left\{ \omega^2 e_1^2 \left[ \frac{1}{2} (1 + \cos(2\omega t)) \right] + 6\omega^2 e_1 e_3 \left[ \frac{1}{2} (\cos(\omega t + 3\omega t) + \cos(\omega t - 3\omega t)) \right] + \right. \\ &\quad + 2\omega^2 e_1^2 e_v v \left[ \frac{1}{2} (\cos(\omega t + v \omega t) + \cos(\omega t - v \omega t)) \right] + 9\omega^2 e_3^2 \left[ \frac{1}{2} (1 + \cos(6\omega t)) \right] + \\ &\quad + 6\omega^2 e_3 e_v v \left[ \frac{1}{2} (\cos(\omega t + 3\omega t) + \cos(\omega t - 3\omega t)) \right] + \omega^2 e_v^2 v^2 \left[ \frac{1}{2} (1 + \cos(2v \omega t)) \right] \left. \right\} = \\ &= c' \left\{ \frac{1}{2} \omega^2 e_1^2 + \frac{1}{2} \omega^2 e_1^2 \cos(2\omega t) + 3\omega^2 e_1 e_3 \cos(4\omega t) + 3\omega^2 e_1 e_3 \cos(2\omega t) + \right. \\ &\quad + \omega^2 e_1^2 e_v v \cos(\omega t + v \omega t) + \omega^2 e_1^2 e_v v \cos(-\omega t + v \omega t) + \frac{9}{2} \omega^2 e_3^2 + \frac{9}{2} \omega^2 e_3^2 \cos(6\omega t) + \\ &\quad + 3\omega^2 e_3 e_v v (\cos(\omega t + 3\omega t) + 3\omega^2 e_3 e_v v \cos(v \omega t - 3\omega t)) + \frac{1}{2} \omega^2 e_v^2 v^2 + \frac{1}{2} \omega^2 e_v^2 v^2 \cos(2v \omega t) \left. \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

Інтегруємо вираз (10) та враховуємо те, що інтеграл від гармонійної функції на періоді її зміни буде дорівнювати нулю. Тоді втрати в сталі:

$$\Delta P_C = \frac{1}{2} c' \omega^2 (e_1^2 + 3^2 e_3^2 + \dots + v^2 e_v^2), \quad (10)$$

10

Враховуючи (11), втрати в сталі запишемо у вигляді:

$$\Delta P_C = \alpha \cdot E'^2, \quad (11)$$

$$\text{де } \alpha = \frac{1}{2} c' \omega^2, E'^2 = e_1^2 + 3^2 e_3^2 + \dots + v^2 e_v^2.$$

15

Для визначення апроксимаційного коефіцієнту  $c'$  проводимо дослід неробочого ходу. Для декількох значень напруги -  $U_1, U_2$  визначаємо потужність  $P_\partial$ :

$$P_\partial = u i_1.$$

Втрати потужності двигуна при проведенні дослід неробочого ходу включають в себе втрати у міді статора  $P_1$ , втрати в сталі  $P_{CT}$  та механічні втрати  $P_{мех}$ :

20

$$P_\partial = P_1 + P_{CT} + P_{мех}.$$

Втрати в міді можна визначити згідно з виразом:

$$P_1 = i_1^2 R_1,$$

$$\text{тоді } P' = P_\partial - P_1,$$

$$\text{де } P' = P_{CT} + P_{мех}.$$

25

Для відокремлення втрат в сталі від механічних втрат, будемо залежність  $P' = f(U)$  по визначеним з дослід неробочого ходу значенням напруг  $U_1, U_2$  та розрахованим  $P'_1, P'_2$  (фіг. 4). Отримуємо пряму, з якої визначаємо механічні втрати  $P'_3 = P_{мех}$  у точці  $U=0$  та розраховуємо значення  $P_{CT}$ :

$$P_{CT1} = P'_1 - P_{мех}, P_{CT2} = P'_2 - P_{мех}.$$

30

Розраховуємо  $E'^2_1$  та  $E'^2_2$  для напруг  $U_1, U_2$  відповідно та отримуємо залежність  $P_{CT}(E'^2)$  (фіг. 5), визначаємо коефіцієнт  $c'$ :

$$c' = \operatorname{tg} \beta.$$

# ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

- 5 Спосіб визначення втрат в сталі асинхронного двигуна з урахуванням насичення, що полягає у вимірюванні напруги, струму статора, визначенні втрат в сталі в функції е.р.с. з досліду неробочого ходу, який **відрізняється** тим, що для врахування вищих гармонійних струму розглядається схема заміщення асинхронного двигуна, у якій виділяються дві е.р.с, одна з яких наводиться в контурі струмом, який змінюється у часі, друга - е.р.с, яка є джерелом вищих гармонійних струму, що протікає по ланцюгу, у зв'язку з цим схема заміщення поділяється на дві складові: перша - справедлива для першої гармоніки струму, друга - для вищих гармонійних, величина е.р.с. розраховується на основі параметрів схеми заміщення та вимірюваного струму статора: для першої гармоніки струму:

$$e = u - i_1 R_1,$$

- 15 де  $e$  - е.р.с першої гармоніки,  $u$  - напруга мережі живлення,  $i_1$  - струм статора,  $R_1$  - активний опір статора, для вищих гармонійних:

$$e_v = i_{1v} \left( 1 + \frac{\sqrt{x_{1v}^2 v^2 + R_1^2}}{\sqrt{x_{2v}^2 v^2 + \left(\frac{R'_2}{s_v}\right)^2}} \times \sqrt{v^2 x_{\mu}^2 + R_{\mu}^2} + \sqrt{v^2 x_1^2 + R_1^2} \right),$$

- 20  $e_v$  - е.р.с вищих гармонійних, де індекс  $v$  відповідає номеру гармонік ( $v = 2 \dots n$ ),  $n$  - кількість гармонік, що враховуються під час розрахунків,  $i_{1v}$  - струм статора  $v$ -ої гармоніки,  $R'_2$  - приведений активний опір ротора,  $s_v$  - ковзання на  $v$ -ій гармоніці асинхронного двигуна,

$s_v = \frac{v-1+s_1}{v}$ ;  $s_1$  - ковзання асинхронного двигуна на першій гармоніці;  $x_{1v}$  - індуктивний опір статора,  $x'_{2v}$  - приведений індуктивний опір ротора на  $v$ -ій гармоніці,  $x_{\mu}$  - індуктивний опір контуру намагнічування,  $R_{\mu}$  - активний опір контуру намагнічування,  $i_{1v}$  - струм статора  $v$ -ої гармоніки,  $i_{2v}$  - струм, який протікає у роторі:

$$25 \quad i_{2v} = i_{1v} \frac{\sqrt{x_{1v}^2 v^2 + R_1^2}}{\sqrt{x_{2v}^2 v^2 + \left(\frac{R'_2}{s_v}\right)^2}},$$

$i_{\mu v}$  - струм у контурі намагнічування:

$$i_{\mu v} = i_{1v} \left( 1 + \frac{\sqrt{x_{1v}^2 v^2 + R_1^2}}{\sqrt{x_{2v}^2 v^2 + \left(\frac{R'_2}{s_v}\right)^2}} \right),$$

втрати в сталі представимо у вигляді:

$$\Delta P_{ст}(t) = c' E(t)^2,$$

- 30 де  $E(t)$  - е.р.с. в контурі намагнічування,  $c'$  - апроксимаційний коефіцієнт, для визначення якого будується залежність  $P_{ст}(E^2)$  на основі проведеного досліду неробочого ходу (фіг. 4), втрати в сталі визначаються швидкістю зміни індукції:

$$\begin{aligned}\Delta P_{CT}(t) &= c \left\{ \frac{dB(t)}{dt} \right\}^2 = \\ &= c \left\{ \sum_{k=1}^{k=\infty} (\omega \cdot k B_{ak} \cos(k\omega t) - \omega \cdot k B_{bk} \sin(k\omega t)) \right\}^2 = \\ &= c \left\{ \sum_{k=1}^{k=\infty} a \cdot \omega \cdot k E_{ak} \cos(k\omega t) - a \cdot \omega \cdot k E_{bk} \sin(k\omega t) \right\}^2 = \\ &= c' \left\{ \sum_{k=1}^{k=\infty} \omega \cdot k E_{ak} \cos(k\omega t) - \omega \cdot k E_{bk} \sin(k\omega t) \right\}^2,\end{aligned}$$

де  $k$  - кількість гармонік,  $B_{ak}$ ,  $B_{bk}$  - синусна та косинусна складові індукції,  $\omega$  - кутова швидкість асинхронного двигуна,  $t$  - час,  $c$  - апроксимаційний коефіцієнт, індукція у вигляді гармонічного ряду має вигляд:

$$5 \quad B(t) = B_1 \sin(\omega t) + B_3 \sin(3\omega t) + \dots + B_n \sin(n\omega t),$$

де  $B_1, B_3, \dots, B_n$  - амплітуди гармонік індукції, знаходимо е.р.с:

$$E(t) = \frac{dB(t)}{dt} = B_1 \omega \cos(\omega t) + 3B_3 \omega \cos(3\omega t) + v B_v \omega \cos(v\omega t) = a \left[ \begin{aligned} &e_1 \omega \cos(\omega t) + 3e_3 \omega \cos(3\omega t) + \dots + \\ &+ v e_v \omega \cos(v\omega t) \end{aligned} \right],$$

де  $a$  - коефіцієнт переходу між індукцією та е.р.с, згідно з цим, втрати в сталі:

$$\begin{aligned}\Delta P_{CT}(t) &= c' \left\{ \begin{aligned} &\omega^2 e_1^2 \cos^2(\omega t) + 6\omega^2 e_1 \cos(\omega t) \times e_3 \cos(3\omega t) + 2\omega^2 e_1^2 \cos(\omega t) e_v v \cos(v\omega t) + \\ &+ 9\omega^2 e_3^2 \cos^2(3\omega t) + 6\omega^2 e_3 \cos(3\omega t) e_v v \times \cos(v\omega t) + \omega^2 e_v^2 \cos^2(v\omega t) v^2 \end{aligned} \right\} = \\ &= c' \left\{ \begin{aligned} &\omega^2 e_1^2 \left[ \frac{1}{2} (1 + \cos(2\omega t)) \right] + 6\omega^2 e_1 e_3 \left[ \frac{1}{2} (\cos(\omega t + 3\omega t) + \cos(\omega t - 3\omega t)) \right] + \\ &+ 2\omega^2 e_1^2 e_v v \left[ \frac{1}{2} (\cos(\omega t + v\omega t) + \cos(\omega t - v\omega t)) \right] + 9\omega^2 e_3^2 \left[ \frac{1}{2} (1 + \cos(6\omega t)) \right] + \\ &+ 6\omega^2 e_3 e_v v \left[ \frac{1}{2} (\cos(\omega t + 3\omega t) + \cos(\omega t - 3\omega t)) \right] + \omega^2 e_v^2 v^2 \left[ \frac{1}{2} (1 + \cos(2v\omega t)) \right] \end{aligned} \right\} = \\ &= c' \left\{ \begin{aligned} &\frac{1}{2} \omega^2 e_1^2 + \frac{1}{2} \omega^2 e_1^2 \cos(2\omega t) + 3\omega^2 e_1 e_3 \cos(4\omega t) + 3\omega^2 e_1 e_3 \cos(2\omega t) + \\ &+ \omega^2 e_1^2 e_v v \cos(\omega t + v\omega t) + \omega^2 e_1^2 e_v v \cos(-\omega t + v\omega t) + \frac{9}{2} \omega^2 e_3^2 + \frac{9}{2} \omega^2 e_3^2 \cos(6\omega t) + \\ &+ 3\omega^2 e_3 e_v v (\cos(\omega t + 3\omega t) + 3\omega^2 e_3 e_v v \cos(v\omega t - 3\omega t)) + \frac{1}{2} \omega^2 e_v^2 v^2 + \frac{1}{2} \omega^2 e_v^2 v^2 \cos(2v\omega t) \end{aligned} \right\}\end{aligned}$$

10 інтегруємо дану залежність та отримуємо вираз для визначення втрат в сталі:

$$\Delta P_C = \frac{1}{2} c' \omega^2 (e_1^2 + 3^2 e_3^2 + \dots + v^2 e_v^2)$$

$$\text{або } \Delta P_C = \alpha \cdot E'^2,$$

$$\text{де } \alpha = \frac{1}{2} c' \omega^2, E'^2 = e_1^2 + 3^2 e_3^2 + \dots + v^2 e_v^2,$$

для визначення апроксимаційного коефіцієнту  $c'$  проводимо дослід неробочого ходу, визначаємо для декількох значень напруги -  $U_1, U_2$  потужність  $P_\delta$ :

$$P_\delta = ui_1,$$

втрати потужності двигуна при проведенні досліді холостого ходу включають в себе втрати у міді статора  $P_1$ , втрати в сталі  $P_{CT}$  та механічні втрати  $P_{мех}$ :

$$P_\delta = P_1 + P_{CT} + P_{мех},$$

20 визначаємо втрати в міді:

$$P_1 = i_1^2 R_1,$$

а також суму втрат в сталі та механічних:

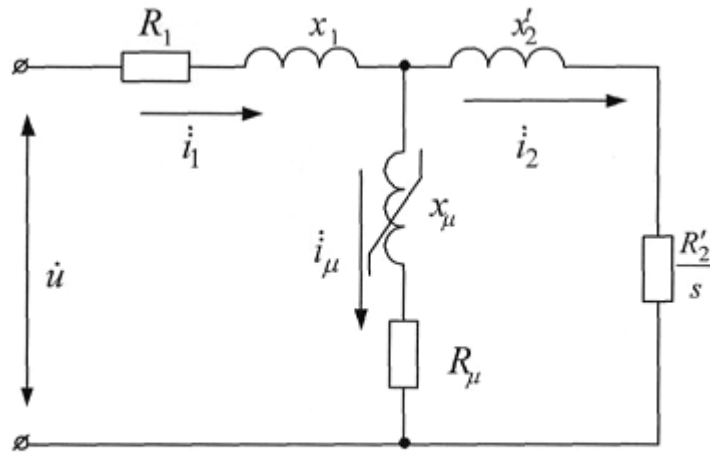
$$P' = P_\delta - P_1,$$



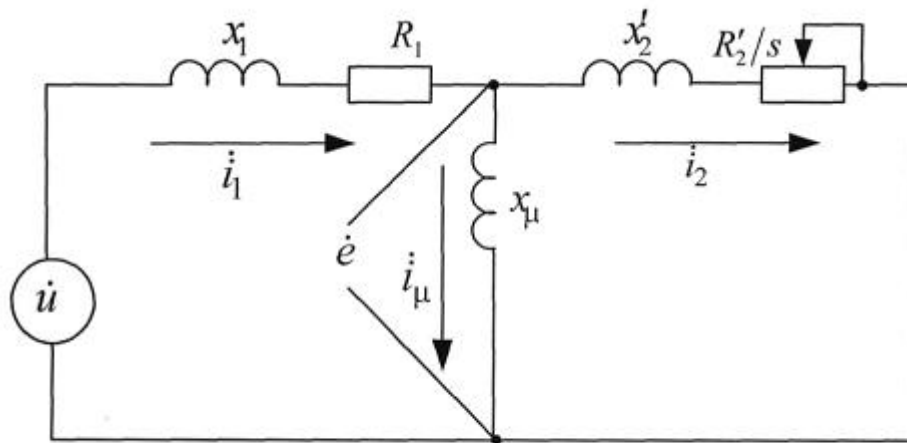
для відокремлення втрат в сталі від механічних втрат будуюмо залежність  $P' = f(U)$  по визначених з досліду неробочого ходу значеннях напруг  $U_1$ ,  $U_2$  та розрахованих  $P_1'$ ,  $P_2'$ , отримуємо пряму, з якої визначаємо механічні втрати  $P_3' = P_{\text{мех}}$  у точці  $U = 0$  та розраховуємо значення  $P_{\text{ст}}$ :

5  $P_{\text{ст1}} = P_1' - P_{\text{мех}}$ ,  $P_{\text{ст2}} = P_2' - P_{\text{мех}}$ ,

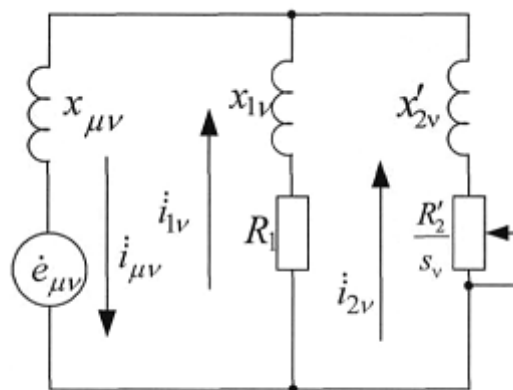
розраховуємо  $E_1'^2$  та  $E_2'^2$  для напруг  $U_1$ ,  $U_2$  відповідно та отримуємо залежність  $P_{\text{ст}}(E'^2)$ , визначаємо апроксимаційний коефіцієнт:  $c' = \text{tg}\beta$ .



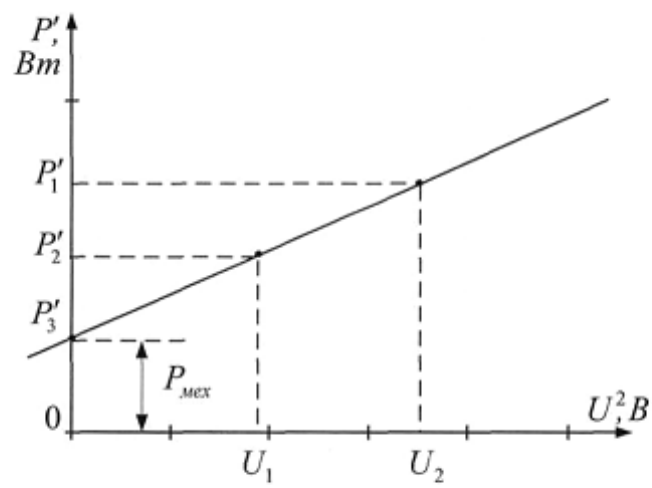
Фиг. 1



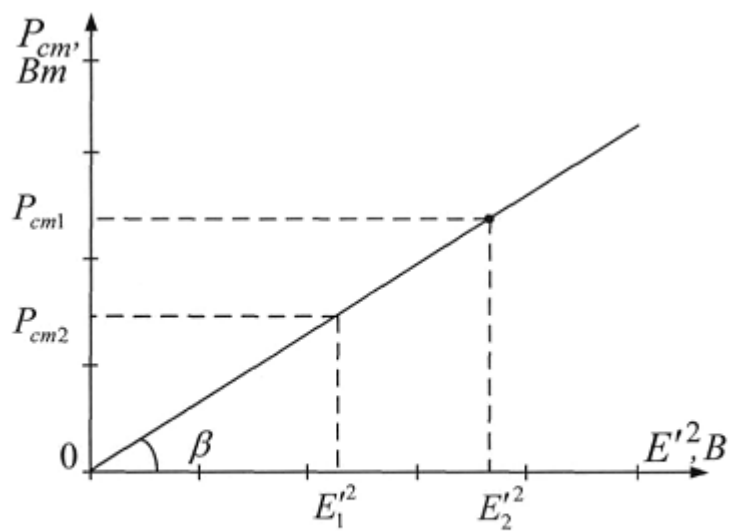
Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5

---

Комп'ютерна верстка Л. Ціхановська

---

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Василя Липківського, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

---

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601