

УДК 621.313.821

О.Л. Тимошук, канд.тех.наук, доц., ORCID 0000-0003-1863-3095

О.В. Вишневецький, аспірант, ORCID 0000-0001-7814-9030

А.С. Стулішенко, магістр, ORCID 0000-0001-9982-9246

Є.С. Ігнатюк, магістр, ORCID 0000-0002-4675-8728

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ ВИСОКОЧАСТОТНИХ ПРОЦЕСІВ В АСИНХРОННИХ ДВИГУНАХ З ВСИПНИМИ ОБМОТКАМИ НА ОСНОВІ ЛАНЦЮГОВИХ СХЕМ ЗАМІЩЕННЯ

В статті представлено математичну модель високочастотних явищ в обмотках низьковольтних асинхронних двигунів з емалевою ізоляцією провідників за допомогою ланцюгових схем заміщення. Для оцінки вхідних і хвильових опорів застосована модель з зосередженими параметрами одноланкового або багатоланкового ланцюга. Проведено порівняння результатів отриманих на розроблених моделях різної складності та результатів експериментальних досліджень на прикладі низьковольтних асинхронних двигунів малої потужності зі всипними обмотками.

Ключові слова: високочастотні процеси, всипні обмотки електричних машин, ланцюгова схема заміщення, математична модель, вхідний опір, хвильовий опір, зосереджені параметри, розподілені параметри.

Математична модель обмотки

Дослідження роботи електричної машини і огляд комутаційних, хвильових і імпульсних процесів потребує математичного опису обмотки. В цілому реальна обмотка представляє складну систему. Очевидна неоднорідність системи, оскільки витки навіть однієї котушки мають різні параметри в залежності від положення в пазу, не кажучи про те що в межах одного витка питомі параметри активної і реактивної частини відрізняються. Очевидним є перехід від однієї котушки до іншої, тобто система є дискретною і однорідною. Тому широко уявлення обмотки у вигляді довгої однорідної лінії з розподіленими параметрами звичайно буде давати значні похибки при огляді процесів в середині обмотки. Для оцінки вхідних і хвильових опорів подібна модель з усередненими параметрами може застосовуватись. Однак для розрахунку режимів використання цієї моделі ускладнює розрахунки, не наближуючись до фізичної сутності[1].

Для оцінки можливого спрощення математичного опису вхідних опорів проведемо порівняння результатів отриманих на моделях різної складності, та дослідних результатів.

Порівняння частотних залежностей різних моделей обмотки

Обмотки електричних машин представляють системи елементів з частотнозалежними параметрами. При достатньо високих частотах магнітні потоки обмоток виражаються в потоки розсіювання, замикаючі в основному по немагнітних шляхах. Тому параметри обмоток на високих частотах практично не залежать від напруги. Розглядаючи дослідні частотні залежності $Z_{вх}(\omega)$, зняті для малих двигунів і аналогічні характеристики для крупних машин, можна зробити висновок про повну якісну схожість, але є великі розбіжності в конструкції і розмірах обмоток.

В цих залежностях характерним є величина і відношення резонансних частот в режимах х.х та к.з. Розглянемо ці відношення в різних моделях.

При представленні обмотки довгою однорідною лінією вхідний опір визначається рівнянням

$$Z_{вх} = \frac{Z_2 Ch \gamma l + Z_B Sh \gamma l}{Z_2 Sh \gamma l + Z_B Ch \gamma l}$$

Для граничних режимів – холостого ходу ($Z_2 = \infty$) і короткого замикання ($Z_2 = 0$) вхідні опори дорівнюють

$$Z_0 = Z_B \frac{ch \gamma l}{sh \gamma l} \quad \text{та} \quad Z_K = Z_B \frac{sh \gamma l}{ch \gamma l}$$

Для перших резонансних частот, нехтуючи втратами в системі

$$\gamma l = \sqrt{Z'Y'} \cong j\omega l \sqrt{L'C'} = j\omega \sqrt{LC}$$

© О.Л. Тимошук, О.В. Вишневецький, А.С. Стулішенко, Є.С. Ігнатюк, 2019

де Z' і Y' - питомі опори і провідність.

Відповідно $Z_0 = -jZlctg(\omega\sqrt{LC})$ і $Z_k = jZ_btg(\omega\sqrt{LC})$

Перші резонансні частоти питомих вхідних опорів лінійної моделі відносяться як 1:2.

Частоти перших гармонік $/k=0/$ по умовам резонансу напруг відповідно дорівнюють

$$\omega_0 = \frac{\pi}{2\sqrt{LC}} \quad i \quad \omega_k = \frac{\pi}{\sqrt{LC}}$$

Для цепної моделі вільні перехідні функції на вході цепі із m п- подібних чотирьохполосників.

$$A_0(t) = \frac{1}{m} \sqrt{\frac{C'}{L'}} \sum_{k=1}^m \frac{\cos^2 \frac{a_k}{2}}{\sin \frac{a_k}{2}} \sin \omega_k t$$

де $a_k = \frac{2K-1\pi}{2m}$, $\omega_k = \frac{2}{\sqrt{L'C'}} \sin \frac{a_k}{2}$

$$A_k(t) = \frac{1}{m} \sqrt{\frac{C'}{L'}} \sum_{k=1}^m \frac{\cos^2 \frac{a_k}{2}}{\sin \frac{a_k}{2}} \sin \omega_k t$$

де $a_k = \frac{K\pi}{2m}$, $\omega_k = \frac{2}{\sqrt{L'C'}} \sin \frac{a_k}{2}$

При $k=1$ і $m \rightarrow 0$ коефіцієнти $a_k \rightarrow 0$, але індуктивності $L' = \frac{L}{m}$ і ємності $C' = \frac{C}{m}$ кожного чотирьохполосника також прагнуть до 0 і відповідно

$\omega_{1x} = \frac{\pi}{2\sqrt{LC}}$ і $\omega_x = \frac{\pi}{\sqrt{LC}}$, тобто отримані вирази аналогічні лінійної моделі.

При скороченні кількості ланок відповідні частоти будуть змінюватися[2].

При обмеженій кількості ланок кола ($m=1$; $m=2$ і $m=3$) частоти відповідно будуть дорівнювати (результати аведено в):

$$\begin{aligned} m=1 \quad \omega &= \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{LC}}; & \omega_k &= \frac{2}{\sqrt{LC}}; & \frac{\omega_k}{\omega_x} &= \sqrt{2} \\ m=2 \quad \omega &= \frac{1,532}{\sqrt{LC}}; & \omega_k &= \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{LC}}; & \frac{\omega_k}{\omega} &= 1,85 \\ m=3 \quad \omega_0 &= \frac{1,554}{\sqrt{LC}}; & \omega_k &= \frac{3}{\sqrt{LC}}; & \frac{\omega_k}{\omega} &= 1,93 \end{aligned}$$

Таблиця 1 – Порівняння дослідних і розрахункових резонансних частот

Двигун типу	Замер при f=10 Гц		Досліди			Довга лінія			Цепна лінія		
	L (r)	C a (пф)	ω_1	ω_2	$\frac{\omega_2}{\omega_1}$	$\omega_1 = \frac{\pi}{2\sqrt{LC}}$	$\omega_2 = \frac{\pi}{\sqrt{LC}}$	$\frac{\omega_2}{\omega_1}$	$\omega_1 = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{LC}}$	$\omega_2 = \frac{2}{\sqrt{LC}}$	$\frac{\omega_2}{\omega_1}$
4AX7IHB	0.1	1160	157.	251.10 ³	1.5	145.10 ³	291.10 ³	2.0	130	185	1.42
4AX80A4Y	0.01	920	10 ³	502.10 ³	9	385.10 ³	772.10 ³	0	346	491	1.41
B	8	720	345.	1004	1.4	345.10 ³	691.10 ³	2.0	310	440	9
4A100L43	0.01	720	10 ³	10 ³	5	238.10 ³	476.10 ³	0	214	303	1.41
A02-41-4	2		489 10 ³	62810 ³	2.0			2.0			9
	0.01		358 10 ³		6			0			1.41
	6				1.7			2.0			5
					9			0			

Для оцінки втрат в системі, що визначають параметри моделі, були проведені дослідні по виміру $tg\delta$ і добротність обмотки $Q = \frac{\omega L}{R}$ при різних станах обмотки. Однак такі виміри можуть бути проведені тільки в області низьких частот. В той самий час втрати в ізоляції дуже цінні з точки зору інформації про її стан. Однак в загальному випадку складно достовірно оцінити зміну складових втрат при зміні частоти навіть при постійному стану ізоляції. Для загальної оцінки добротності системи були розглянуті резонансні явища як по частотним залежностям вхідних опорів Z_0 і Z_k так і по резонансним відношенням напруги на виході і вході обмотки в режимі х.х

Потрібно одразу відмітити що другий метод виявився мало ефективним, з огляду на істотного зсуву резонансних частот при зміні стану ізоляції. Так при вимірах по схемі рис.1.а. були отримані наступні залежності для сухої нової ізоляції

F кГц	10	20	30	40	45	50	55	60
U1 ,В	9.2	9.2	9.2	10.12	9.4	9.4	10.0	9.4
U5 ,В	10	12.42	20.2	30.64	33.3	40.5	45.5	32

Після режиму тепло-вологого старіння резонанс відповідно спостерігався на частоті 25~27.5 кГц, і співвідношення напруги було $U_1 = 11В$, $U_5 = 34В$, $U_1 = 11.8В$ і $U_5 = 36В$, тобто добротність системи зменшилась в 1.5 раз. Порівнюючи слабку залежність добротності можна пояснити тільки різко вираженою залежністю втрат в системі від частоти. Тому для оцінки цих факторів було сталих численне моделювання з оцінкою збіжності за досліджуваним даним [3]. Були задані варіанти сталих $tg\delta = \frac{G}{\omega C} = 0.002; 0.08; 0.2$ $Q = 4; 10; 20$ для двигунів 4АХ71Н8 з параметрами $L = 0.1$ Гн, $C = 1200$ Пфі двигуна 4АХ80А4У3 з параметрами $L = 0.018$ Гн, $C = 920$ Пф.

Зміни частоти задавались в межах від 50 до 200000 Гц.

В основу розрахункової моделі було покладено довгу однорідну лінії спрощену ланцюгову схему. При розрахунку використовувались такі основні співвідношення, та результати розрахунків приведені на рис.2-3.

$$1-Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} e^{-\frac{j}{Q} + tg\delta} cth[\frac{\omega}{2} \sqrt{LC} (\frac{1}{Q} + tg\delta) + j \frac{\omega}{2} \sqrt{LC} \sqrt{4 - (\frac{1}{Q} + tg\delta)^2}] = Ae^{-ja} cth(x + jy)$$

Де $e^{-ja} = \cos A - jsinA$; та $cth(x+jy) = \frac{shx - jsin2y}{ch2x - cos2y}$

$$Im(Z_0) = \frac{-j\sqrt{\frac{L}{C}} [\cos \frac{1}{Q} + tg\delta - sin\omega\sqrt{LC} \sqrt{4 - (\frac{1}{Q} + tg\delta)^2} + sh \frac{\omega}{2} \sqrt{LC} (\frac{1}{Q} + tg\delta) \sin(\frac{1}{Q} + tg\delta)]}{ch\omega\sqrt{LC} (\frac{1}{Q} + tg\delta) - cos\omega\sqrt{LC} \sqrt{4 - (\frac{1}{Q} + tg\delta)^2}}$$

$$R_e|Z_0| = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}} [\cos \frac{1}{Q} + tg\delta - sh\omega\sqrt{LC} \sqrt{4 - (\frac{1}{Q} + tg\delta)^2} - \sin \frac{1}{Q} + tg\delta - sin\omega\sqrt{LC} \sqrt{4 - (\frac{1}{Q} + tg\delta)^2}]}{ch\omega\sqrt{LC} (\frac{1}{Q} + tg\delta) - cos\omega\sqrt{LC} \sqrt{4 - (\frac{1}{Q} + tg\delta)^2}}$$

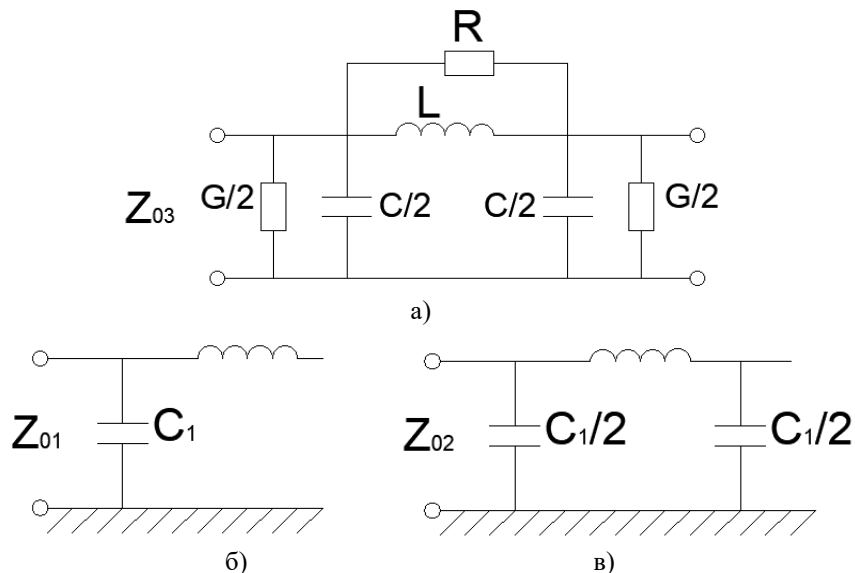


Рисунок 1 – а) розрахунок ланцюгової лінії б,в) – порівняння дослідних частотних залежностей з результатами розрахунків по спрощеній схемі

$$Z_{03-} \rightarrow G - const$$

$$Z_{03+} \rightarrow G - var$$

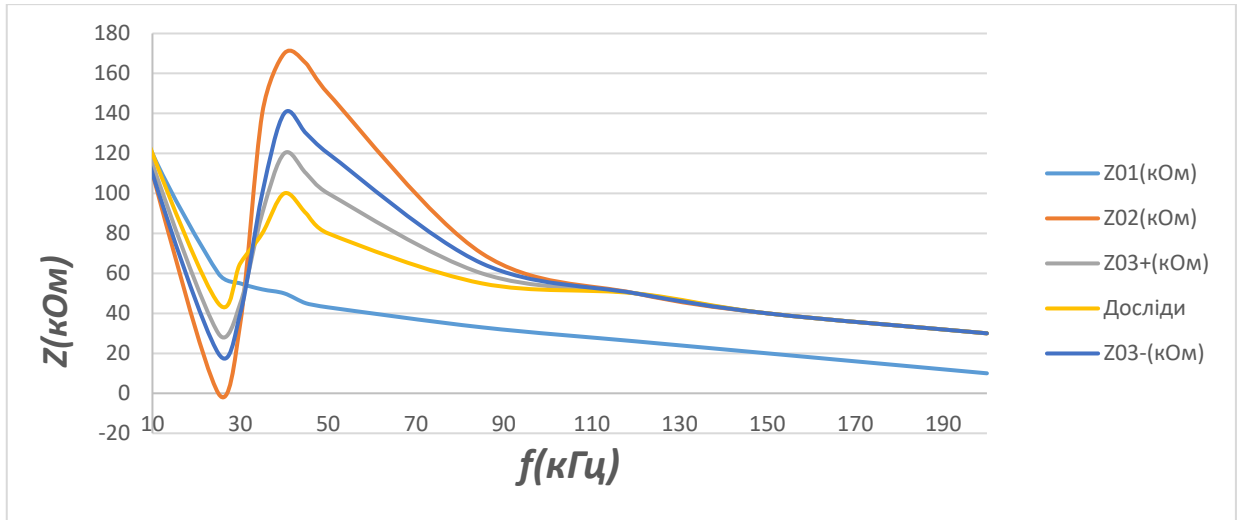


Рисунок 2 – Б – двигун типу 4AX71H8

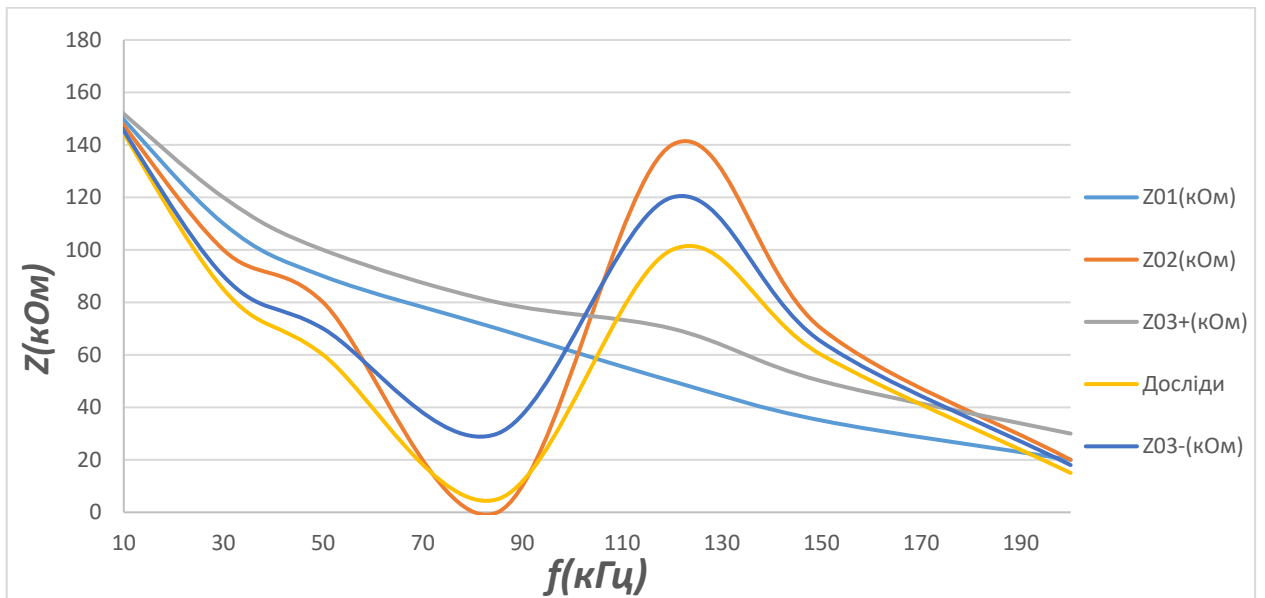


Рисунок 3 –в – двигун типу 4AX80L443

$$\varphi_0 = \operatorname{arctg} \frac{-j \operatorname{Im}|Z_0|}{\operatorname{Re}|Z_0|}$$

$$2 - Z_k = \sqrt{\frac{L}{C}} e^{-j\frac{1}{Q} + tg\delta} \operatorname{th} \frac{\omega}{2} \sqrt{LC} \left(\frac{1}{Q} + tg\delta \right) + j \frac{\omega}{2} \sqrt{LC} \sqrt{4 - \left(\frac{1}{Q} + tg\delta \right)^2} = A e^{-ja} * \operatorname{th}(x + jy), \text{ де } (x + jy) = \frac{\operatorname{sh}(2x) + j \sin(2y)}{\operatorname{ch}(2x) + \cos(2y)}$$

$$\operatorname{Im}|Z_k| = \frac{j \sqrt{\frac{L}{C}} \left[\cos \left(\frac{1}{Q} + tg\delta \right) \sin \left(\omega \sqrt{LC} \sqrt{4 - \left(\frac{1}{Q} + tg\delta \right)^2} \right) + \operatorname{sh} \left(\omega \sqrt{LC} \left(\frac{1}{Q} + tg\delta \right) \right) \sin \left(\frac{1}{Q} + tg\delta \right) \right]}{\operatorname{ch} \left(\omega \sqrt{LC} \left(\frac{1}{Q} + tg\delta \right) \right) + \cos \left(\omega \sqrt{LC} \sqrt{4 - \left(\frac{1}{Q} + tg\delta \right)^2} \right)}$$

$$R_e |Z_k| = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}} \left[\cos \left(\frac{1}{Q} + tg \delta \right) \sin \left(\omega \sqrt{LC} \left(\frac{1}{Q} + tg \delta \right) \right) + \sin \left(\frac{1}{Q} + tg \delta \right) \sin \omega \sqrt{LC} \left(\frac{1}{Q} + tg \delta \right) \right]}{ch \left(\omega \sqrt{LC} \left(\frac{1}{Q} + tg \delta \right) \right) + \cos \left(\omega \sqrt{LC} \sqrt{4 - \left(\frac{1}{Q} + tg \delta \right)^2} \right)}$$

$$\varphi_k = \arctg \frac{jI_m |Z_k|}{R_e |Z_k|}$$

$$3 - |Z_B| = \sqrt{|Z_0| \cdot |Z_k|} \text{ і } \varphi_B = \frac{\varphi_0 + \varphi_k}{2}$$

Для режимів холостого ходу і короткого замикання I_m і R_e представляють уявну і дійсну складову опору. З приведених розрахунків видно, що варіація Q і $tg \delta$ при приблизній рівності $\left(\frac{1}{Q} + tg \delta\right)$ дає близькі криві і, як наслідок, знайти $tg \delta$ з ціллю оцінки стану ізоляції не представляється можливим. Таким чином, аналіз вхідних опорів не дає можливості виділити $tg \delta$ на підвищених частотах. Це ж підтверджує аналіз розрахованих моделей[4].

Якщо розглянути просту модель обмотки у вигляді одного чотириполюсника, то можна відмітити, що для режиму холостого ходу можливі два резонанси – резонанс напруги і резонанс струмів. Якщо розглядати приблизні умови резонансу, то при резонансі напруги на частоті $\omega = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$ опір ланцюга $Z_1 - I_1$, буде визначатись тільки активним опором $Z_p \cong \frac{\omega L_1}{Q} + \frac{tg \delta}{\omega C}$ де $tg \delta_2 \approx tg \delta$ відповідає уявленню Y_1 , у вигляді послідовного з'єднання ємності C_1 і активного опору. При цьому $Z_1 \approx \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \left(\frac{1}{Q} + tg \delta \right) = \sqrt{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \left(\frac{1}{Q} + tg \delta \right)$. Резонанс струмів в режимі к. з. має місце при частоті $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

Провідність при цьому $y = \omega C_1 \left(\frac{1}{Q} + tg \delta \right)$, а опір $Z_{k1} \approx \sqrt{\frac{L}{C_1}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{Q} + tg \delta}$.

Очевидно, що якщо відома величина Q , то можна знайти $tg \delta$, але оскільки залежність $Q(\omega)$ складна, використовувати цей метод в такому вигляді неможливо.

В експериментах використовувались і інші методи оцінки добротності схеми[5].

Висновок

Використання в якості моделі довгої лінії і ланцюгової схеми з довільною кількістю ланок дає порівнянні результати

Кращий збіг з дослідними результатами дає використання моделі ланцюгової схеми з обмеженою кількістю ланок при оцінюванні за частотами резонансу

При розрахунках і аналізі системи на частотах до першої резонансної можливе використання найпростішої ланцюгової схеми при $m=1$

Визначення основних параметрів моделі – індуктивності L і ємності C легко здійснюється дослідним або розрахунковим шляхом. Основну складність являє собою визначення складових відносних втрат, особливо на підвищених частотах.

Список використаної літератури

1. Каганов З. Ч. Цепные дроби в электротехнике, часть I. Издательство «Наука», Сибирское отделение, Новосибирск, 1966
2. Борисоглебский П. В. Физические основы и методы профилактики промышленной изоляции. Госэнергоиздат, 1949.
3. Мамиконянц Л. Г. Контроль влажности изоляции электрических машин и трансформаторов по изменению емкостей их обмоток. Электрические станции, 1945
4. В. Г. Каганов Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы.
5. Boldea, I., & Nasar, S. A. (2010). The induction machines design handbook (2nd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.

O. Tymoshchuk, PhD Tech., associate professor. ORCID 0000-0003-1863-3095

O. Vishnevsky, post-graduate student ORCID 0000-0001-7814-9030

A. Stulyshenko, master ORCID 0000-0001-9982-9246

Ye. Ignatyuk, master ORCID 0000-0002-4675-8728

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ANALYSIS OF HIGH-FREQUENCY PROCESSES IN ASYNCHRONAL MOTORS WITH ABSORPTION WELDING ON THE BASIS OF CHANNEL LAYERING SCHEMES

The article presents a mathematical model of high-frequency phenomena in windings of low-voltage asynchronous motors with enamel isolation of conductors with the help of chain replacement schemes. For evaluation of input and wave impedance, a model with lumped parameters of a single-valley or multi-link chain is used. A comparison of the results of the developed models of various complexity and the results of experimental studies on the example of low-voltage asynchronous low-power motors with bulging windings is made.

Keywords: high-frequency processes, bulging windings of electric machines, circuit diagram of substitution, mathematical model, input resistance, wave resistance, concentrated parameters, distributed parameters.

References

1. Kaganov Z. Ch. Chain fractions in electrical engineering, part I. Nauka Publishing House, Siberian Branch, Novosibirsk, 1966
2. Borisoglebsky P.V. Physical bases and methods for the prevention of industrial isolation. Gosenergoizdat, 1949.
3. Mamikonyants LG, Insulation humidity control of electrical machines and transformers to change the capacity of their windings. Electric stations, 1945
4. V. G. Kaganov Electrical circuits with distributed parameters and chain diagrams.
5. Boldea, I., & Nasar, S. A. (2010). The induction machines design handbook (2nd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.

О.Л. Тимошук, канд.тех.наук, доц. ORCID 0000-0003-1863-3095

А.В. Вишнеvский, аспирант ORCID 0000-0001-7814-9030

А.С. Стулишенко, магистр ORCID 0000-0001-9982-9246

Е.С. Игнатьюк, магистр ORCID 0000-0002-4675-8728

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

АНАЛИЗ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПРОЦЕССОВ В АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ С ВСЫПНЫМИ ОБМОТКАМИ НА ОСНОВЕ ЦЕПНЫХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ

В статье представлены математическая модель высокочастотных явлений в обмотках низковольтных асинхронных двигателей с эмалевой изоляцией проводников, с помощью цепных схем замещения. Для оценки входных и волновых сопротивлений применена модель с сосредоточенными параметрами однозвенной или многозвенной цепи. Проведено сравнение результатов полученных на разработанных моделях различной сложности и результатов экспериментальных исследований на примере низковольтных асинхронных двигателей малой мощности по всыпным обмоткам.

Ключевые слова: высокочастотные процессы, всыпные обмотки электрических машин, цепная схема замещения, математическая модель, входное сопротивление, волновое сопротивление, сосредоточенные параметры, распределенные параметры.

Надійшла 17.12.2018

Received 17.12.2018