

6. Parcheta, C. E., Pavlov, C. A., Wiltsie, N., Carpenter, K. C., Nash, J., Parness, A., & Mitchell, K. L. (2016). A robotic approach to mapping post-eruptive volcanic fissure conduits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 320, 19-28.
7. Zaichenko, S., Shalenko, V., Shevchuk, N., & Vapnichna, V. (2017). Development of a geomechatronic complex for the geotechnical monitoring of the contour of a mine working. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(9 (87)), 19-25.
8. Marushchak, P. O., & Konovalenko, I. V. (2010). Izmereniye deformatsii materialov putem analiza tsifrovyykh izobrazheniy poverkhnosti. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 76(6). 55-61.
9. Mitrokhin, M. Yu., Spirin, V. A., & Aleksandrov, V. A. (2008). Vnutritrubnaya diagnostika trudnodostupnykh uchastkov lineynoy chasti MG. *Gazovaya promyshlennost*. (6). 72-74.
10. Egorov, I. N., & Kadkhim, D. A. (2011). Primeneniye mobilnykh robotov pri vnutritrubnoy diagnostike truboprovodov s peremennym poperechnym secheniyem. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal «Neftegazovoye delo*. (3). 73-85.
11. Golubkin, I. A., & Shcherbatov, I. A. (2014). Sistema upravleniya mobilnym kolesnym robotom dlya vnutritrubnoy inspektsii gazoprovodov. *Informatika i sistemy upravleniya*. (4). 129-140.
12. Voronchikhin, S. Yu., Samokrutov, A. A., & Sedelev, Yu. A. (2016). Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya tekhnologicheskikh truboprovodov kompressornykh stantsiy PAO «Gazprom» s primeneniyyem robotizirovannykh skanerov. *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Vesti gazovoy nauki*. (3). 120-130.
13. Liu, J., Zhong, L., Wickramasuriya, J., & Vasudevan, V. (2009). uWave: Accelerometer-based personalized gesture recognition and its applications. *Pervasive and Mobile Computing*, 5(6), 657-675.
14. Jang, I. J., & Park, W. B. (2003, October). Signal processing of the accelerometer for gesture awareness on handheld devices. In *Robot and Human Interactive Communication, 2003. Proceedings. ROMAN 2003. The 12th IEEE International Workshop on* (pp. 139-144). IEEE.
15. Kozlov, A., Sazonov, I., Vavilova, N., & Parusnikov, N. (2013). Calibration of an inertial measurement unit on a low-grade turntable with consideration of spatial offsets of accelerometer proof masses. *Proc. ICINS*, 126-129.

Надійшла 24.09.2018

Received 24.09.2018

УДК 621.313.821

В.В. Чумак, канд.тех.наук, доц. ORCID 0000-0001-8401-7931

О.В. Вишневський, 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»**

УДОСКОНАЛЕНА ВИСОКОЧАСТОТНА МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Хвильові процеси в електричних машинах представляють собою один з найменш вивчених режимів їх роботи, але ці процеси суттєво впливають на роботу міжвиткової і особливо корпусної ізоляції.

В цій роботі представлена точна високочастотна модель асинхронного двигуна. Запропонована модель дозволяє аналізувати обидва явища, як високочастотні аж до декількох мегагерц, завдяки статичному живленню, так і низькочастотних явищ, які зазвичай аналізуються за допомогою кількісних характеристик двигуна.

Представлено порівняння експериментальних і змодельованих частотних характеристик для двигуна 4А80А4.

Ключові слова: високочастотні явища, ємнісний ефект, міжвиткова ємність, вихрові струми, імпеданс, резонанс струмів.

Вступ. Електроприводи з ШІМ (широтно-імпульсна модуляція), статичні перетворювачі потужності і асинхронні двигуни мають широке застосування в різних галузях промисловості завдяки

своїм підходящим характеристикам і гнучкості застосування. Ефекти високочастотних компонентів напруги, введених методом ШІМ, зазвичай не враховуються при аналізі електромеханічних характеристик двигуна. І навпаки висока dV/dt , що подається на двигун, вводить незначну кількість високочастотних струмів витoku, які протікають через розсіяну розподілену ємність між обмоткою статора і корпусом двигуна. Оскільки корпус двигуна зазвичай підключається до землі за допомогою схеми заземлення, струми високої частоти витoku присутні в електричній мережі можуть спричинити електромагнітні перешкоди. Протягом останніх років проблеми, спричинені високочастотними складовими та відповідними струмами витoku, були проаналізовані іншими дослідниками. У даній роботі представлена високочастотна модель асинхронного двигуна. В особливості, була визначена основна ціль представленої роботи, а саме, показати, що існує загальна модель, яка дозволяє нам одночасно розглянути поведінку електричних машин на високих і низьких частотах, а також може бути використана при широкому спектрі системного аналізу. Запропонована високочастотна модель базується на зосереджених параметрах і пов'язана з класичною моделлю кількісних даних, вона точна в діапазоні частот від декількох герц до декількох мегагерц, модель представлена на малюнку 1. Цей тип моделі уникає використання розподілених параметрів і відповідно кожна програма може бути використана без проблем. В даній роботі задовільні результати отримані за допомогою моделювання в програмі Simulink MatLab[1].

Головна частина. До високочастотних явищ відносяться два головних ємнісних ефекта:

1. Ємність між обмоткою і землею
2. Міжвиткова ємність обмотки

Очевидно, що обидві ємності по суті розподілені, але, як згадувалося раніше, запропонований підхід базується на зосереджених параметрах[2]. На рисунку 1 показано високочастотну схему фази, яка використовується з наступними зосередженими параметрами:

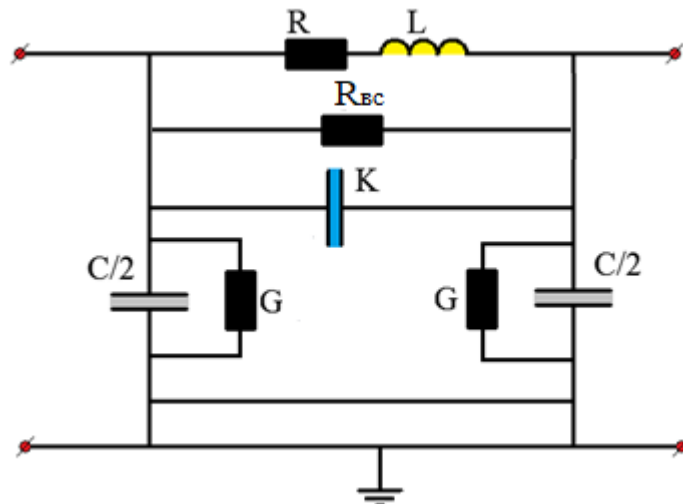


Рисунок 1 – Еквівалентна схема з зосередженими параметрами

- $R_{вс}$ – опір вихрових струмів
 R – опір фази статора і ротора
 L – індуктивність
 K – повздовжня ємність, що представляє міжвиткову розподілену ємність
 C – поперечна ємність, що представляє розподілені ємнісні пари між обмоткою і землею
 G – провідність, що представляє собою вихрові струми всередині магнітопровода і корпусу

Паралельне включення елементів схеми заміщення L і K , а також C і G , являються загальноприйнятими і пояснень не потребують. Паралельне, а не послідовне включення елементів L і r , витікає з простих фізичних міркувань. Вихрові струми, індуковані в сталених листах статора і ротора, являються, якби, вторинними струмами трансформатора. Як відомо, еквівалентну схему заміщення трансформатора зручно представити в вигляді паралельного з'єднання реактансу, що відповідає первинній обмотці і навантажуючого опору, який представляє вторинну обмотку[3].

Важливо підкреслити, що величини повинні розглядатися як значення, що відносяться до фази, з'єднаної зіркою. Обмотка до розподіленої ємності була представлена двома об'єднаними ємностями однієї величини, перша з яких була з'єднана між фазовим терміналом і землею, а друга - між нейтраллю двигуна і землею. Передбачається з'єднання двигуна в зірку, але дельта з'єднання двигуна не відміння обґрунтування моделі. Опір фази R і індукція фази L_d складає параметри 50/60 Гц отримані при

випробуваннях з замкненим ротором. Як показали результати експерименту, відклик двигуна з часом швидко затухає. Типові величини опору R занадто низькі, щоб пояснити затухання, які спостерігаються [4].

Аналіз фізичного явища приводить до того, щоб вважати, що затухаючий фактор пов'язаний з фактом розсіювання енергії при високочастотних вихрових струмах. Як наслідок, опір R , що представляє собою вихрові струми, повинен бути з'єднаний паралельно з індуктивністю витoku. Щоб охарактеризувати двигун у високочастотному діапазоні, можна оцінити частотну характеристику двох імпедансів, визначених на малюнку 2 (а, б):

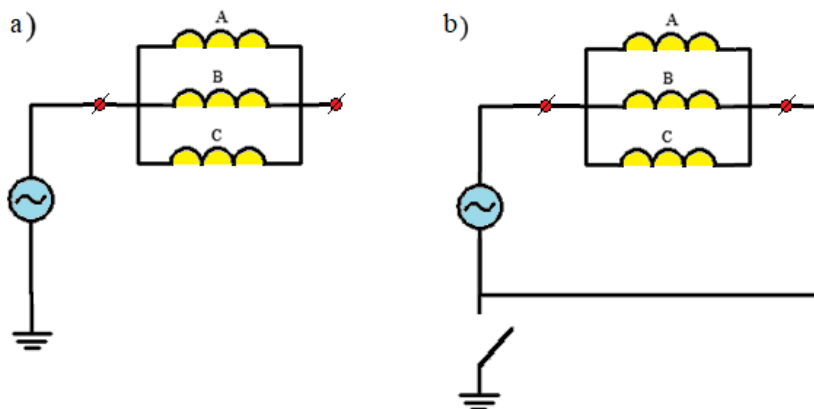


Рисунок 2 - З'єднання для вимірювання імпедансу - а) Z_{wg} - б) Z_{wn}

Імпеданс Z_{wn} , вимірювання між трьома фазами, які з'єднані разом з нейтраллю двигуна, з плаваючим заземленням (а).

Імпеданс Z_{wg} , вимірювання між трьома фазами, які з'єднані разом і клемою заземлення, з плаваючою нейтраллю двигуна (б).

Розробка моделі та експериментальні результати. У розглянутому частотному діапазоні опір фази R набагато менше, ніж індуктивність L_d [5]. У наступних міркуваннях опором статора можна буде нехтувати. Імпеданси схеми на рис. 2 (а, б) можуть бути легко оцінені за допомогою моделювання в Matlab. Нижче наведені схеми для моделювання.

Оцінка параметрів закладених у схему заміщення розраховувалась по частотним характеристикам знятих на двигуні 4A80A4, по методиці Каганова [6].

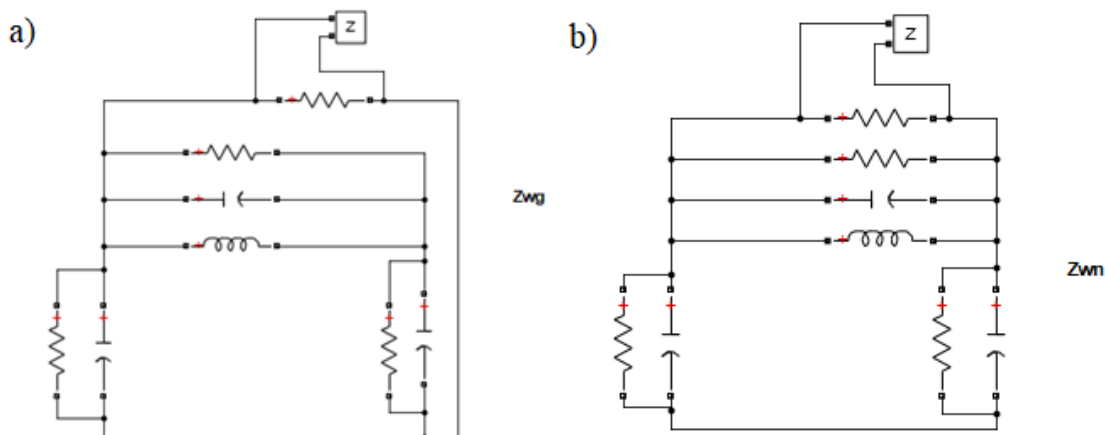


Рисунок 3 – Електричні схеми для Matlab а) - імпеданс Z_{wg} б) - імпеданс Z_{wn}

На рисунку 4-5 показні порівняння змодельованої і експериментально знятої частотної характеристики імпедансу Z_{wn} .

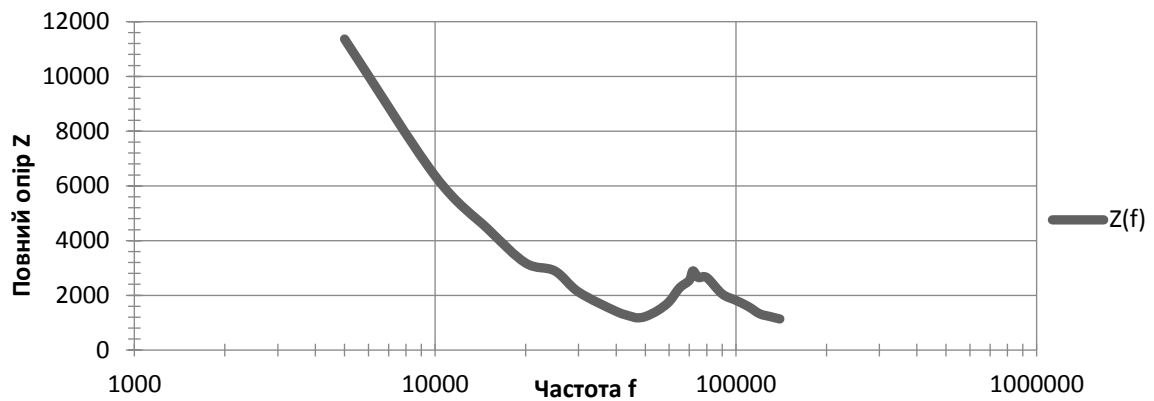


Рисунок 4 – Експериментальні результати по частотній характеристиці імпедансу Z_{wg}

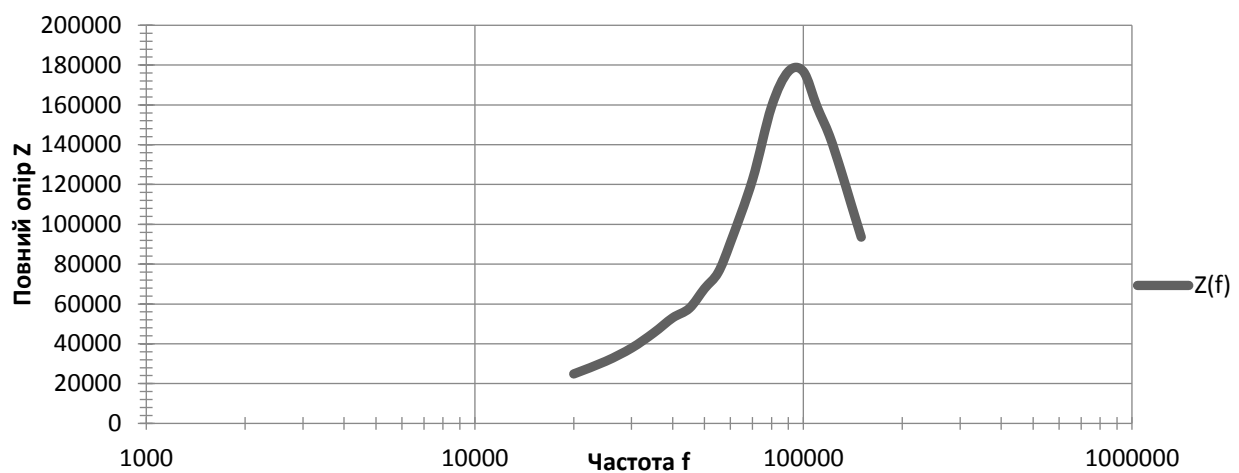


Рисунок 5 – Експериментальні результати по частотній характеристиці імпедансу Z_{wn}

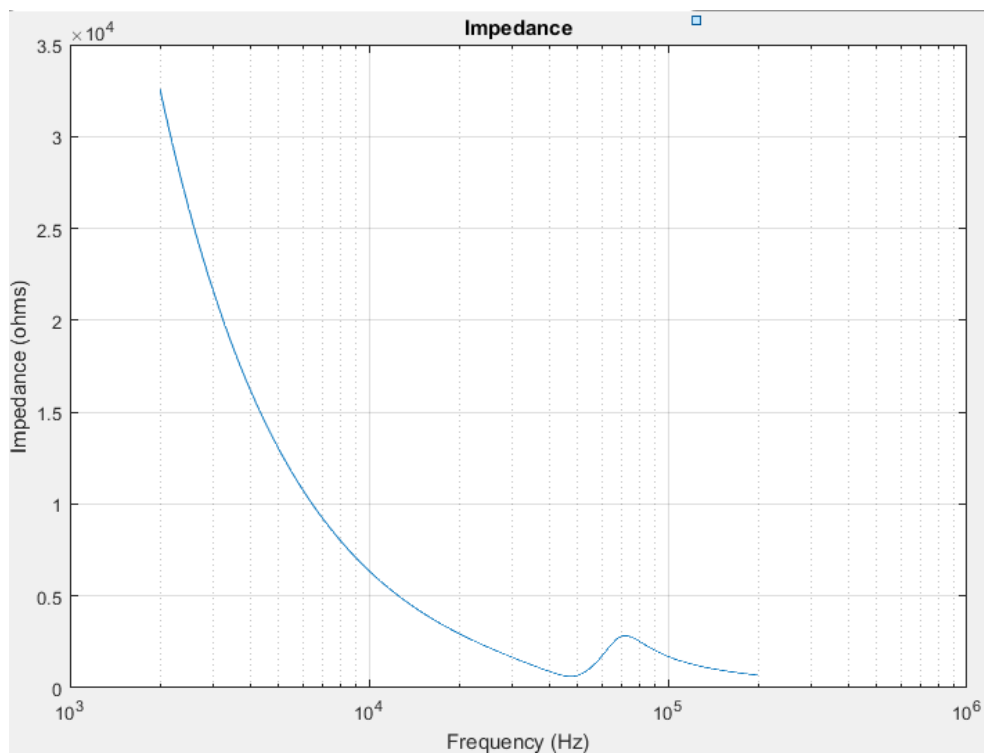


Рисунок 6 – Результати моделювання на частотній характеристиці імпедансу Z_{wg}

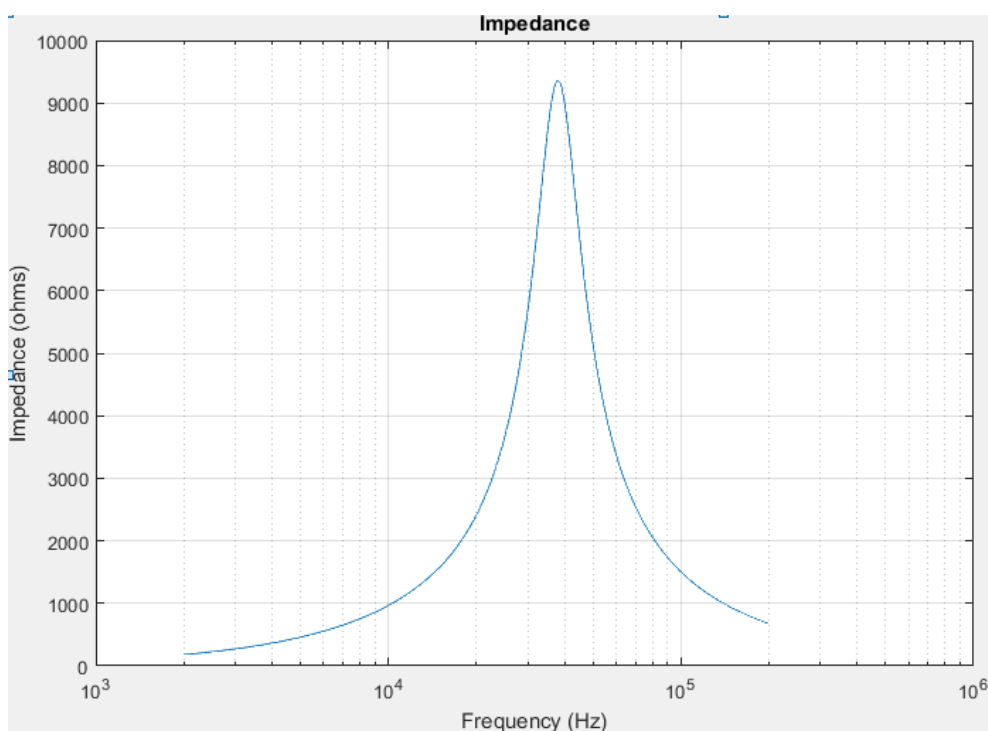


Рисунок 7 – Результати моделювання на частотній характеристиці імпедансу Z_{in}

Висновки. У статті запропоновано високочастотну модель для асинхронного двигуна на основі зосереджених параметрів. Результати експериментального та програмного моделювання на двигунах різного розміру добре узгоджуються як за частотою, так і за часом. Запропонована високочастотна модель може бути додана до відомої динамічної моделі. Можна отримати комплексну модель, яка дозволяє аналізувати високочастотні та низькочастотні явища зі стандартним програмним забезпеченням для моделювання.

Список використаної літератури

1. S. Ogasawara and H. Akagi, 1996, "Modeling and damping of high frequency leakage currents in PWM Inverter fed AC motor drive system," IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 32, No. 5, pp. 1105–1113.
2. Adjustable Speed Electrical Power Drive Systems—Part 3: EMC Product Standard Including Specific Test Methods, IEC 61800-3, 1996-09
3. Ю. К. Горбунов. Високочастотная диагностика изоляции обмоток электрических машин : автореферат - Новосибирск, 199. - С 21-25.
4. З. Г. Каганов. Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы. Москва энергоатомиздат 1990. - С 123-128.
5. A. Boglietti; Cavagnino A.; M. Lazzari (2007). Experimental High-Frequency Parameter Identification of AC Electrical Motors. Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Elettrica Industriale, C.so Duca degli Abruzzi, 24 10129 Torino, Italy.
6. З. Г. Электрические схемы с распределенными параметрами и цепные схемы. – Новосибирск, 1964. С 91-95.

V. Chumak, PhD Tech., associate professor, ORCID 0000-0001-8401-7931

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”

IMPROVED HIGH-FREQUENCY MODEL OF ASYNCHRON MOTOR

Wave processes in electric machines are one of the least studied modes of their operation, but these processes significantly affect the work of inter-circuit and especially case-isolation.

In this paper, the exact high-frequency model of the asynchronous motor is presented. The proposed model allows to analyze both phenomena, as high-frequency up to several megahertz, due to static nutrition, and low-frequency phenomena, which are usually analyzed with the help of quantitative characteristics of the engine. The high frequency model obtained with the help of time and frequency analysis can vary in a wide range of asynchronous motors from 4 to 55 kW.

The HF-motor parameters are evaluated through measurements of magnitude and phase of phase-to-ground and phase-to-neutral impedances performed in the frequency range from 1 kHz up to 1 MHz. The adopted parameter-identification procedure, based on a Kaganovs metod data fitting, is reported in detail together with the estimated parameters[4].

The proposed model represents a simple solution to the analysis of HF ac motor drive problems linked to conducted EMI, and its validity has been recognized by other researchers.

A comparison of experimental and modeled frequency characteristics for the 4A80A4 engine is presented.

Keywords: high-frequency phenomena, capacitive effect, inter-circuit capacitance, vortex currents, impedance, current resonance.

References

1. S. Ogasawara and H. Akagi, 1996, “Modeling and damping currents of AC motor drive system,” IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 32, No. 5, pp. 1105–1113.
2. Adjustable Speed Electrical Power Drive Systems — Part 3: EMC Product Standard Including Specific Test Methods, IEC 61800-3, 1996-09
3. Yu. K. Gorbunov. High-frequency diagnostics of the insulation of the windings of electrical machines: abstract - Novosibirsk, 199. - C 21-25.
4. Z. G. Kaganov. Distributed Electrical Circuits and Circuits. Moscow Energoatomizdat 1990. - C 123-128.
5. A. Boglietti; Cavagnino A. ; M. Lazzari (2007). Experimental High-Frequency Parameter Identification of AC Electrical Motors. Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Elettrica Industriale, C.so Duca degli Abruzzi, 24 10129 Torino, Italy.
6. Z. G. Electrical circuits with distributed parameters and chain circuits. - Novosibirsk, 1964. From 91-95

Надійшла 19.10.2018

Received 19.10.2018