

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-271-1-18-23>

УДК 621.313.333

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ДІАГНОСТИЧНИХ СИСТЕМ

Губаревич О.В., Мелконова І.В.

IMITATION MODELING OF INDUCTION MOTOR FOR INCREASING THE LEVEL OF DIAGNOSTIC SYSTEMS

Gubarevych O.V., Melkonova I.V.

Враховуючи досить широку сферу застосування асинхронних двигунів та складні умови їх експлуатації з постійно зростаючою ціною відмови, стрімко зростають і вимоги до їх надійності, своєчасного визначення стану та часу безвідмовної роботи, що забезпечує надійну і неперервну роботу асинхронних двигунів. Для підвищення рівня надійності та неперервної роботи асинхронних електродвигунів необхідно проводити удосконалення вже існуючих та розробку нових методів їх діагностування, що відбувається шляхом проведення досліджень процесів при різних дефектах двигунів з використанням сучасних засобів, зокрема імітаційного моделювання, за допомогою якого є можливість побудови моделі, що описують процеси так, як вони проходили б у дійсності. У роботі проведено аналіз принципу запропонованої імітаційної моделі асинхронного електродвигуна та проведено порівняння одержаних результатів моделювання з розрахунковими даними за класичною методикою, яка приведена в роботі. Максимальна похибка при порівнянні параметрів знаходиться у межах 0,045–6,365 %, що підтверджує адекватність моделі та великий рівень точності імітаційної моделі для якої були проведені розрахунки. Крім того, модель що розглядається у роботі, дає можливість створювати несиметричне обертове поле статора для проведення подальших досліджень пошкоджень обмотки при міжвиткових замиканнях, що є дуже актуальним питанням при визначенні технічного стану двигуна. У використованій досліджуваній математичній моделі асинхронного двигуна передбачений алгоритм врахування зміни взаємної індуктивності обмоток від зміни комплексного опору однієї або декількох обмоток, таке удосконалення моделі дозволить суттєво збільшити явчу про динамічні процеси, які реально відбуваються у двигуні з несиметричними обмотками, а також забезпечити подальший розвиток проведення діагностичних заходів з виявленням ступеню пошкодження обмотки статора. Для проведення досліджень з більш широким колом можливих дефектів, що впливають на режими роботи двигунів слід використовувати математичну модель асинхронного двигуна з можливістю створення несиметричного обертаючого поля виконану в «загальмованих координатах» з врахуванням втрат в сталі та механічних втрат.

Ключові слова: імітаційне моделювання, асинхронний двигун, несиметрія обмоток, діагностика, обмотки статора

Вступ. Трифазні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором є одними з найбільш поширених електричних машин, що використовуються для приводів різноманітних механізмів у всіх сучасних галузях. Найбільш ефективно використовання асинхронних електродвигунів стримує їх висока пошкоджуваність. Щорічно виходять з ладу 20–25% від загальної кількості встановлених електродвигунів [1–3]. Враховуючи досить широку сферу застосування цих двигунів й, найчастіше, складність умов їх експлуатації з зростаючою ціною відмови, стрімко зростають і вимоги до їх надійності, своєчасного визначення стану та часу безвідмовної роботи. Багато несправностей і дефектів в складних умовах роботи швидко прогресують і виводять з ладу електродвигуни навіть з невеликим терміном експлуатації приводячи їх до аварійної зупинки. Своєчасне та достовірне визначення несправностей не тільки підвищує надійність двигунів, а й значно скорочує терміни ремонту та зменшує непередбачені витрати. Вітчизняний та зарубіжний досвід показує, що розробка та впровадження сучасних засобів діагностування є одним із найважливіших та ефективних факторів підвищення економічної ефективності використання електромеханічного обладнання в промисловості [1, 2].

Розробка нових та удосконалення існуючих методів діагностування асинхронних електричних двигунів відбувається шляхом проведення досліджень процесів при різних дефектах двигунів з використанням сучасних засобів зокрема імітаційного моделювання.

Метою роботи є проведення дослідження та аналіз результатів достовірності при використанні

імітаційної моделі асинхронного двигуна. Застосування достовірної математичної моделі при проведенні досліджень дасть можливість більш коректно враховувати вплив дефектів в роботі асинхронних двигунів для визначення методу їх діагностики та оцінювання ступеню пошкодження.

Для досягнення мети були виконані завдання:

- розраховані параметри базового двигуна за класичною методикою;
- проведено імітаційне моделювання в програмному середовищі MATLAB роботи асинхронного двигуна з використанням обраної математичної моделі;
- порівняння параметрів двигуна, отриманими при моделюванні, з результатами класичного розрахунку.

Постановка проблеми. Підвищення надійності асинхронних електричних двигунів у процесі експлуатації відбувається за рахунок постійного вдосконалення існуючих та розробки нових діагностичних методів, що можливе на підставі результатів досліджень процесів, що відбуваються при різних дефектах двигунів. В даний час існує значна кількість методів діагностики асинхронних двигунів, однак питання підвищення рівня діагностики електродвигунів, що відповідає сучасним експлуатаційним вимогам, продовжує залишатися невирішеним. Наявні методи в своїй більшості, враховують тільки граничний або допустимий стани параметрів обмотки, що не дозволяє оцінювати дефекти на ранній стадії їх розвитку [4]. Для забезпечення зростаючого рівня потреб діагностики та вибору відповідної методології необхідно проводити ретельні дослідження процесів прояву різних дефектів, які викликають відмови асинхронних електродвигунів [3]. Для цих завдань необхідно використання математичної моделі асинхронного двигуна високого ступеня достовірності з можливістю дослідження в тому числі і при несиметричних режимах, що виникають в процесі експлуатації при різного виду пошкодженнях статора. Можливість створення в імітаційній моделі несиметричного режиму роботи двигуна дозволяє проводити дослідження більшого колу дефектів, що виникають.

Результати дослідження. Математичному моделюванню асинхронних електродвигунів присвячені роботи багатьох авторів з різними методичними підходами. Ряд авторів в своїх моделях використовують припущення, що система напруг живлення асинхронного двигуна є симетричною і синусоїдальною, обмотки статора та ротора є симетричними, а статор та ротор машини є гладкими. Такому підходу до моделювання асинхронних машин присвячена значна кількість робіт, але кожна з пропонує моделей призначена для вирішення однієї практичної задачі. Так, в роботі [5] вирішується задача побудови моделі для точного визначення частоти обертання валу двигуна, що працює з навантаженням за рахунок втрат електричної потужності в сталі двигуна. Робота [6] присвячена визначенню розробці асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором,

що працює зі змінним навантаженням. Для вирішення задачі багатокритеріального керування приводом з асинхронним двигуном в роботі [7] запропоновано відповідну модель. Модель для точного вимірювання механічної координати асинхронного двигуна розглянута в дослідженні [8], а метод ідентифікації механічних параметрів – в дослідженні [9].

Отримані за допомогою цих методів математичні моделі дозволяють досліджувати динамічні процеси в електроприводах з асинхронними двигунами, але при умові симетрії обмоток статора і ротора та при якій системі живлення електричної машини.

Однак, не зважаючи на припущення, що система напруг живлення є симетричною і синусоїдальною при аналізі роботи асинхронних двигунів з дефектами, слід враховувати той факт, що більшість дефектів призводять саме до несиметричних режимів в асинхронному двигуні. При несиметрії фаз статора змінюються комплексні опори фаз, що в свою чергу призводить до зміни індуктивності фаз. Зміна індуктивності фаз призводить до зміни індуктивності магнітного ланцюга двигуна. Врахування зміни індуктивності магнітного ланцюга двигуна при реалізації математичної моделі приведені в дослідженні [10], де авторами запропоновано визначення індуктивності асинхронного двигуна за кривою намагнічування.

Для проведення досліджень електромагнітних процесів при імітаційному моделюванні асинхронних двигунів необхідний також коректний вибір системи координат, в яких складені диференціальні рівняння, що описують роботу асинхронного двигуна. При моделюванні асинхронних двигунів з несиметричними обмотками для отримання найбільш достовірних результатів слід використовувати систему диференціальних рівнянь в «загальмованих координатах» [11].

Таким чином, для проведення подальших досліджень з більш широким колом можливих дефектів, що впливають на режими роботи двигунів слід використовувати математичну модель асинхронного двигуна з можливістю створення несиметричного обертаючого поля виконану в «загальмованих координатах» з врахуванням втрат в сталі та механічних втрат. Крім того, для реалізації вказаного принципу моделювання слід враховувати взаємну індуктивність обмоток при зміні комплексного опору однієї або декількох фаз статорної обмотки, що імітує її пошкодження.

Запропонована та використана в роботі імітаційна модель асинхронного двигуна, для якої встановлюється достовірність реальним процесам, виконана в «загальмованих координатах», наведена та докладно розглянута в роботах [12-14]. Загальний вид моделі наведено у роботі [12], у роботі [13] розглянуто її реалізацію у програмному середовищі MATLAB та у роботі [14] – реалізація математичної моделі [12] з урахуванням зміни взаємної індуктивності при зміні комплексного опору однієї чи кількох фаз двигуна. Вказана модель може бути адапто-

вана для дослідження роботи асинхронного двигуна при виникненні в ньому такого дефекту як міжвиткове замикання обмоток статора, що визиває несиметричне поле обертання, а також для визначення пускових та робочих характеристик двигуна, розрахунку енергетичних показників при роботі асинхронного двигуна із зазначеним дефектом. Таким чином, імітаційне моделювання асинхронного електродвигуна проводилося з використанням математичної моделі, приведеної в роботі [14].

В якості базового двигуна для проведення досліджень обраний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором серії АІР132М4, потужністю 11кВт з синхронною частотою обертання поля статора 1500об/хв, напругою живлення 220/380 В. Паспортні характеристики двигуна приведені в табл.1.

Таблиця 1

Паспортні дані асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором АІР132М4

Параметр	Значення
Номінальна потужність $P_{ном}$, кВт	11,0
Номінальна фазна напруга $U_{ном}$, В	220
Частота мережі f , Гц	50
Частота обертання в режимі холостого ходу (близько) n_0 , об/хв	1498
Частота обертання при номінальному навантаженні $n_{ном}$, об/хв	1450
Момент холостого ходу M_0 , Нм	0,38
Момент при номінальному режимі $M_{ном}$, Нм	72,671
Число витків фази обмотки статора w_1	96
Струм холостого ходу I_0 , А	9,44
Амплітуда струму холостого ходу I_m , А	13,35
Активний опір обмотки статора r_1 , Ом	0,5
Реактивний опір обмотки статора x_1 , Ом	0,56
Активний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора r'_2 , Ом	0,36
Реактивний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора x'_2 , Ом	0,938

Для номінального режиму вказаного базового двигуна за класичною методикою, наведеною в роботі [15], розраховані основні параметри для проведення порівняння, які приведені в табл.2.

Після задання на моделі симетричної трифазної напруги статору, часова характеристика якої приведена на рис. 1, в результаті моделювання отримані часові діаграми фазних струмів статору (рис. 2) для номінального режиму. Значення фазних напруг статору та фазних струмів статору задані миттєвими значеннями цих параметрів.

Отримані та розраховані по результатам моделювання основні параметри двигуна для номінального режиму, які в порівнянні з даними розрахунків, виконаних раніше за класичною методикою [15], наведені в табл. 2.

Як видно з табл. 2, похибка моделювання є досить низькою та знаходиться у межах 0,045 – 6,365 %. Це свідчить про високу точність моделювання і імітації процесів, що відбуваються в асинхронному двигуні із симетричними обмотками. Тоб-

то, можна вважати імітаційну модель асинхронного двигуна адекватною з високим ступенем достовірності.

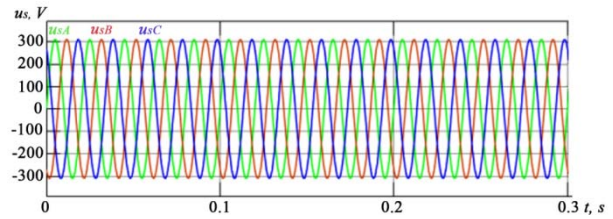


Рис. 1. Часові діаграми фазних напруг статору для номінального режиму

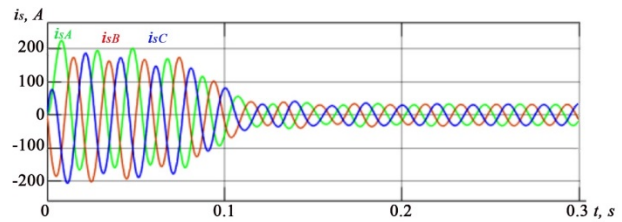


Рис. 2. Часові діаграми фазних струмів статору для номінального режиму

Таблиця 2

Результати моделювання і розрахунків параметрів двигуна

Параметр	Розрахунок	Модель	Відносна похибка, %
Момент на валу двигуна M , Н·м	72,671	72,443	0,314
Частота обертання валу двигуна n , об/хв	1450	1450	0
Корисна потужність P_{a2} , кВт	11,005	11,0	0,045
Активна потужність, що споживається з мережі P_{a2} , кВт	12,491	12,29	1,609
Реактивна потужність, що споживається мережі Q_{a1} , кВ·Ар	7,84	7,479	4,604
Повна потужність, що споживається з мережі S , кВ·А	14,748	14,39	2,427
Діюче значення струму фази статора I_1 , А	22,343	21,80	2,43
Втрати в сталі ΔP_s , Вт	215,16	211,798	1,563
Втрати в міді статора ΔP_{e1} , Вт	748,8	701,137	6,365
Втрати в міді ротора ΔP_{e2} , Вт	390,4	378,14	-3,14
Механічні втрати $\Delta P_{мех}$, Вт	59,743	59,743	0
ККД, η , %	88,1	89,5	-1,593
Коефіцієнт потужності $\cos\phi_1$	0,847	0,854	-0,834

Характеристики асинхронного двигуна (рис. 1, 2), отримані в результаті імітаційного моделювання, свідчать про високу стійкість алгоритму реалізації математичної моделі двигуна в програмному середовищі *MATlab*.

Висока збіжність результатів пояснюється тим, що у застосованій математичній моделі асинхронного двигуна «в загальмованих координатах» використовується такий параметр, як взаємна індуктивність, що залежить від індуктивності магнітного ланцюга двигуна. Індуктивність магнітного ланцюга є сумою частинних взаємних індуктивностей кожної фази обмоток статора і ротора. Частинні взаємні індуктивності, як і індуктивності розсіювання фази, в першу чергу залежать від геометричних розмірів обмоток, зокрема від кількості витків. Зміна кількості витків однієї з фаз обмотки статора призводить до зміни індуктивності розсіювання цієї фази обмотки статора і до зміни частинних взаємних індуктивностей, пов'язаних з цією фазою. Врахування зміни повної взаємної індуктивності обмоток двигуна в моделі й забезпечило високий рівень збіжності результатів моделювання і розрахункових даних.

Перевагами використання даної імітаційної моделі є можливість дослідження динамічних процесів в асинхронному двигуні з короткозамкненим ротором, що має несиметричні обмотки статора з високою достовірністю результатів.

Висока достовірність визначення параметрів двигуна досягається за рахунок:

– введення додаткового статичного моменту, що враховує механічні втрати та втрати в сталі двигуна;

– врахування зміни величини взаємної індуктивності при зміні комплексного опору обмоток двигуна.

Використовуючи дану модель з встановленою високою адекватністю реальній системі асинхронного електродвигуна доцільно проводити дослідження процесів, що відбуваються в двигуні при міжвитковому замиканні в одній або декількох фазах, діагностики ступеню міжвиткового замикання в обмотці статора, а також дослідження роботи асинхронного двигуна з несиметричними обмотками, при неякісній системі живлення. Результати наведених досліджень корисні при подальшому удосконаленні рівня діагностики асинхронних електродвигунів.

Висновки. Проведені дослідження щодо використання імітаційного моделювання при вивченні процесів та розробках діагностичних систем асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором показали доцільність використання математичної моделі в програмному середовищі *MATLab* у якій диференціальні рівняння записані у «загальмованих координатах» та передбачена можливість створення несиметричного обертального поля статора.

З метою встановлення ступеня адекватності запропонованої математичної моделі, в роботі здійснено порівняння отриманих результатів імітаційного моделювання з результатами розрахунків згідно класичної методики. Максимальна похибка при визначенні параметрів знаходиться у межах 0,045–6,365, %, що підтверджує адекватність та великий рівень точності імітаційної моделі. Отримані в результаті імітаційного моделювання часові діаграми фазних напруг та фазних струмів свідчать про високу стійкість алгоритму реалізації математичної моделі двигуна в програмному середовищі *MATlab*.

У використованій математичній моделі асинхронного двигуна передбачений алгоритм врахування зміни взаємної індуктивності обмоток від зміни комплексного опору однієї або декількох обмоток, що дозволить значно збільшити уяву про динамічні процеси, які реально відбуваються у двигуні з несиметричними обмотками, та забезпечити подальший розвиток проведення діагностичних заходів з виявленням ступеню пошкодження обмотки статора.

Л і т е р а т у р а

1. Ciprian H. Wavelet Analysis and Park's Vector Based Condition Monitoring of Induction Machines. / H. Ciprian, L. Szabó // *Journal of Computer Science and Control Systems*, Vol.4, No 2, 2011, pp 35 -38.
2. Губаревич О.В., Гулак С.О., Голубева С.М. Комплексний підхід до діагностування асинхронних електродвигунів водного транспорту: Новітні технології. Збірник наукових праць Приватного вищого навчального закладу «Університет новітніх технологій». К.: ПВНЗ «Університет новітніх технологій», 2019. Випуск 2(9). С.48-61.
3. Губаревич О.В. Надійність і діагностика електрообладнання: Підручник / О.В. Губаревич. Северодонецьк: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2016. 248 с.
4. Губаревич О.В., Голубева С.М. Аналіз методів діагностики технічного стану ізоляції асинхронних двигунів: Всеукраїнський науковий збірник «Наукові праці Донецького національного технічного університету». Серія «Електротехніка і енергетика» – Покровськ: Вид.: Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», №1(21), 2019. С. 55-63.
5. Chioncel, C. P., Tirian, G. O., Gillich N., Raducha E.. Vector Control Structure of an Asynchronous Motor at Maximum Torque [Text] /C. P. Chioncel, G. O. Tirian, N. Gillich, E. Raducha//International Conference on Applied Sciences – 2015. P. 012005 – 012010.
6. Pakkiraian, B., Sukumar, G.D. A New Modified Artificial Neural Network Based MPPT Controller for the Improved Performance of an Asynchronous Motor Drive [Text]/B. Pakkiraian, G.D. Sukumar//Indian Journal of Science and Technology. 2016 – Vol. 9, Issue 45. – P. 1 10.
7. Guo, Z., Zhang, Q.-Wei. The Study on Mathematical Model and Simulation of Asynchronous Motor Considering Iron Loss [Text]/Z. Guo, Q.-Wei Zhang//Journal of Physics: Conf. Series 1060. 2018. P. 012085 – 012090.
8. Dementyev Y.N., Umurzakova A.D. The Engine Mechanical Coordinates Measuring In The Asynchronous Motor

- [Text]/Y. N. Demytyev, A. D. Umurzakova// MATEC Web of Conferences. 2014. P. 01027-01032.
9. Balara, D., et al. Neural networks application for mechanical parameters identification of asynchronous motor [Text]/ D. Balara, J. Timko, J. Zilkov, A. M. Le So//Neural Network World. 2017 Vol. 27, Issue 3. P. 259-270.
 10. Ruan, J. Y., & Wang, S. M. (2015). Magnetizing curve estimation of induction motors in single-phase magnetization mode considering differential inductance effect. IEEE Transactions on Power Electronics, 31(1), 497-506.
 11. Singh, A., Grant, B., DeFour, R., Sharma, C., & Bahadoorsingh, S. (2016). A review of induction motor fault modeling. Electric Power Systems Research, 133, 191-197.
 12. Pustovetov, M. Yu. A mathematical model of the three-phase induction motor in three-phase stator reference frame describing electromagnetic and electromechanical processes. IEEE Conference 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. Omsk [online]. 2016, p. 1-5. Available from: <https://doi.org/10.1109/Dynamics.2016.7819069>.
 13. Pustovetov, M. Yu. Approach to Computer Implementation of Mathematical Model of 3-Phase Induction Motor//IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering [online]. 2018, 327(2), p. 022085. Available from: <https://10.1088/1757-899X/327/2/022085>.
 14. Goolak, S., Gubarevych, O., Yermolenko, E, Slobodyanyuk, M, Gorobchenko, O. Development of mathematical model of induction motor for vehicles. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020, 2/2 (104), pp.24-35. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.199559.
 15. Копылов И.П. Проектирование электрических машин: учебник для вузов. М.: Юрайт, 2019. 828 с.

References

1. Ciprian H. Wavelet Analysis and Park's Vector Based Condition Monitoring of Induction Machines. / H. Ciprian, L. Szabó // Journal of Computer Science and Control Systems, Vol.4, No 2, 2011, pp 35 -38.
2. Gubarevych O.V., Goolak S.O. and Golubyeva S.M. (2019), "Complex pidhid to the diagnosis of asynchronous electric motors for water transport", New technology: Collection of scientific works of the Private Higher Educational Institution "University of Advanced Technologies". Kyiv, PVNZ "University of new technologies", Vol.2 (9), pp. 48-61.
3. Gubarevych O.V. Nadiynist' i diahnostryka elektroobladnannya: Pidruchnyk / O.V. Hubarevych. Syevyeronets'k: vyd-vo SNU im. V. Dalya, 2016. 248 s.
4. Gubarevych, O.V. and Golubyeva, S.M. (2019), Analysis of methods for diagnosing a technical camp of asynchronous motors [in Ukrainian]. All-Ukrainian science zbirnik "Science and Technology of Donetsk National Technical University." Seriya "Electrotechnics and energy". Pokrovsk, Donetsk region: The sovereign supreme principal mortgage "Donetsk National Technical University". Vol. 1(21), pp. 55-63.
5. Chioncel, C. P., Tirian, G. O., Gillich N., Raducha E.. Vector Control Structure of an Asynchronous Motor at Maximum Torque [Text] /C. P. Chioncel, G. O. Tirian, N. Gillich, E. Raducha//International Conference on Applied Sciences – 2015. - P. 012005 – 012010.
6. Pakkiraian, B., Sukumar, G.D. A New Modified Artificial Neural Network Based MPPT Controller for the Improved Performance of an Asynchronous Motor Drive [Text]/B. Pakkiraian, G.D. Sukumar//Indian Journal of Science and Technology. - 2016 – Vol. 9, Issue 45. – P. 1-10.
7. Guo, Z., Zhang, Q.-Wei. The Study on Mathematical Model and Simulation of Asynchronous Motor Considering Iron Loss [Text]/Z. Guo, Q.-Wei Zhang//Journal of Physics: Conf. Series 1060. – 2018. – P. 012085 – 012090.
8. Demytyev Y.N., Umurzakova A.D. The Engine Mechanical Coordinates Measuring In The Asynchronous Motor [Text]/Y. N. Demytyev, A. D. Umurzakova// MATEC Web of Conferences. – 2014. – P. 01027-01032.
9. Balara, D., et al. Neural networks application for mechanical parameters identification of asynchronous motor [Text]/ D. BALARA, J. TIMKO, J. ZILKOV, A. M. LE SO//Neural Network World. – 2017 - Vol. 27, Issue 3. – P. 259-270.
10. Ruan, J.-Y., Wang, S.-M.. Magnetizing Curve Estimation of Induction Motors in Single-Phase Magnetization Mode Considering Differential Inductance Effect [Text]/J.-Y.Ruan, S.-M. Wang //IEEE Transactions On Power Electronics. 2016. Vol. 31, Issue 8. – C. 497-506.
11. Singh, A., et al. A review of induction motor fault modeling [Text]/A. Singh, B. Grant, R. DeFour, C. Sharma, S. Bahadoorsingh//Electric Power Systems Research. – 2016. - № 133 – C. 191-197.
12. Pustovetov, M. Yu. A mathematical model of the three-phase induction motor in three-phase stator reference frame describing electromagnetic and electromechanical processes. IEEE Conference 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. Omsk [online]. 2016, p. 1-5. Available from: <https://doi.org/10.1109/Dynamics.2016.7819069>.
13. Pustovetov, M. Yu. Approach to Computer Implementation of Mathematical Model of 3-Phase Induction Motor//IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering [online]. 2018, 327(2), p. 022085. Available from: <https://10.1088/1757-899X/327/2/022085>.
14. Goolak, S., Gubarevych, O., Yermolenko, E, Slobodyanyuk, M, Gorobchenko, O. Development of mathematical model of induction motor for vehicles. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020, 2/2 (104), pp.24-35. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.199559.
15. Kopylov I.P. Proyektirovaniye elektricheskikh mashin: uchebnik dlya vuzov. M.: Yurayt, 2019. 828 s.

Gubarevych O. V., Melkonova I.V. Imitation modeling of induction motor for increasing the level of diagnostic systems

Given the wide range of applications of induction motors and the difficult conditions of their operation with the ever-increasing cost of failure, the requirements for their reliability, timely determination of the state and time of trouble-free operation are growing rapidly. To increase the level of reliability of asynchronous electric motors, it is necessary to improve existing and develop new methods of diagnosing them, which is done by studying the processes of various motor defects using modern tools, including simulation. The analysis of the principle of the proposed simulation model of an induction motor and the comparison of the obtained simulation results with the calculated ones according to the classical method are carried out. In order to establish the degree of adequacy of the proposed mathematical model, the paper compares the results of simulation with the results of calculations according to the classical method. The maximum error when comparing the parameters is in the range of 0.045-6.365%, which confirms

the adequacy and high level of accuracy of the simulation model. Using this model with high adequacy of the real induction motor system, it is advisable to study the processes occurring in the motor during interturn short circuit in one or more phases, diagnose the degree of interturn short circuit in the stator winding, as well as study of asynchronous asynchronous motor nutrition. The advantages of using this simulation model are the ability to study dynamic processes in an induction motor with a short-circuited rotor having asymmetric stator windings with high reliability of results. In addition, the model considered in this paper makes it possible to create an asymmetric rotating stator field for further studies of winding damage in interturn short circuits, which is very important in determining the state of the motor. The mathematical model of an induction motor uses an algorithm to take into account changes in the mutual inductance of windings from changes in the complex resistance of one or more windings, which will significantly increase the idea of dynamic processes actually occur-

ring in a motor with asymmetric windings. damage to the stator winding.

Key words: *simulation, induction motor, winding asymmetry, diagnostics, stator windings.*

Губаревич Олег Володимирович – к.т.н., доцент, зав. кафедри судноводіння та експлуатації електротехнічних систем на водному транспорті Державного університету інфраструктури та технологій, oleg.gbr@ukr.net

Мелконова Інна Вікторівна – к.т.н., доцент кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, melkonova@snu.edu.ua

Стаття подана 29.12.2021.