УДК 621.3 DOI: https://doi.org/10.15407/techned2024.05.024

МОДЕЛЮВАННЯ АСИНХРОННИХ МАШИН У СКЛАДІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ З УРАХУВАННЯМ ВТРАТ У СТАЛІ СТАТОРА

О.М. Попович*, докт. техн. наук, **І.В. Головань****, канд. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна.
E-mail: popovich1955@ukr.net; golovan_77@ukr.net.

Виконано порівняльне дослідження способів врахування впливу процесів втрат у сталі статора асинхронної машини з короткозамкненим ротором на величину параметрів робочого режиму. Здійснено порівняння з довідниковими даними результатів розрахунку параметрів номінального режиму асинхронного двигуна без урахування втрат у сталі та з їх урахуванням за допомогою еквівалентних опорів, підключених паралельно до двигуна, а також еквівалентних контурів втрат у сталі. Досліджено вплив співвідношення активної та індуктивної складових навантаження еквівалентних контурів втрат у сталі на результати математичного моделювання. Дослідження виконано на базі універсальної математичної моделі асинхронного двигуна електромеханотронних систем з довільною схемою обмотки статора. Розроблено алгоритм визначення і коригування величини параметрів контурів втрат у сталі під час розрахунку перехідних процесів асинхронної машини до усталеного режиму роботи, за величинами втрат у сталі (у залежності від величин індукції і частоти) і діючого значення струму еквівалентного контуру. Задля забезпечення стійкості розв'язку обґрунтовано застосування ітераційного коефіцієнту і дискретності коригування величини опору. Обґрунтовано застосування контурів втрат у сталі статора у математичній моделі асинхронної машини у режимі генератора, коли використання паралельно підключених еквівалентних опорів вступає у протиріччя з енергетичною діаграмою машини. Бібл. 10, табл.1, рис. 1.
***Ключові слова*:** асинхронний двигун, робочий режим, втрати у сталі статора, еквівалентні контури.

Асинхронні машини (АМ) є найбільш поширеним типом електромеханічних перетворювачів завдяки сукупності показників енергетичної та ресурсної ефективності. Максимізація показників ефективності АМ, частіше двигунів, які виготовляються крупними серіями, досягається за їх оптимального проектування. Оптимальне проектування серійних асинхронних двигунів (АД) у переважній більшості випадків здійснюється для номінальних режимів роботи. Головним чином це стосується нерегульованого електроприводу. Підвищення ефективності процесів електромеханічного перетворення енергії пов'язано із застосуванням регульованого електроприводу, роботою АМ як елемента комплексу електротехнічного обладнання. Це принципово збільшує розмаїття експлуатаційних режимів АМ і обґрунтовує розвиток підходів до їхнього оптимального проектування. Ефективний проектний синтез АМ як елемента електромеханічної системи (ЕМС) досягається за комплексного проектування [1], коли визначення оптимальної величини конструктивних і режимних параметрів АМ здійснюється у процесі оптимізаційного дослідження комплексної математичної моделі всієї системи із використанням комплексних критеріїв її ефективності. Такі моделі забезпечують дослідження дійсних експлуатаційних режимів, враховують взаємний вплив складових системи і забезпечують кількісну оцінку комплексного критерію ефективності як відношення величини корисної дії системи за кінцевим результатом до обсягу спожитих ресурсів.

Якість проектування залежить від достовірності результатів математичного моделювання, яке у випадку АМ пов'язано із точністю врахування втрат у ній і, зокрема, втрат у сталі. Величина втрат у сталі АМ залежить від властивостей магнітопроводу, рівня його насичення, частотного режиму [2, 3]. За поширеними методиками проектування АД визначена величина втрат у сталі враховується підключенням на напругу мережі паралельно до входу АД [4] еквівалентних опорів втрат у сталі,

© Попович О.М., Головань І.В., 2024
ORCID: * https://orcid.org/0000-0002-9238-5782; ** https://orcid.org/0000-0002-5250-6981
© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2024
Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk

розрахунком їхніх струмів, корегуванням параметрів робочих режимів [5]. За комплексного проектування АМ як елемента ЕМС можливі режими двох напрямків енергообміну: у режимах двигуна і генератора [6]. Живлення опорів втрат у сталі, які підключено паралельно до клем АМ, здійснюється від джерела електричної енергії. У режимі двигуна це відповідає енергетичній діаграмі, у режимі генератора – ні. Крім того, можливими є складні структури схем з'єднання віток обмотки статора між собою і з зовнішньою мережею, наприклад, [7]. У вказаних випадках врахування втрат у сталі, паралельними до двигуна опорами, може не відповідати дійсним напрямам енергоперетоків, порушувати коректність врахування взаємного впливу АМ із іншими елементами системи та може призводити до похибок. У даних режимах доцільно розглянути інший спосіб врахування втрат у сталі, наприклад, за допомогою еквівалентних контурів [8]. Це пов'язано із потребою розробки відповідної математичної моделі АМ і побудовою алгоритмів визначення параметрів даних контурів.

Задля дослідження АМ з короткозамкненим ротором і обмоткою статора із довільною схемою з'єднання її віток призначено математичну модель АД електромеханотронних систем (ЕМТС) [9]. Вона враховує спектр просторових гармонік МРС, несиметрію та нелінійність електромагнітних параметрів, довільність схеми з'єднання віток обмотки статора за допомогою матриць включення за першим і другим законами Кирхгофа. Модель АД ЕМТС є моделлю динамічних режимів, вона реалізована у програмному середовищі MATLAB, представлена у комплексній моделі імітаційного моделювання електротехнічної системи вхідними і вихідними клемами віток обмотки статора [9]. Властивості моделі АД ЕМТС щодо врахування процесів у складних структурах обмоток статора доцільно використати задля отримання із мінімальними переробками моделі АМ з еквівалентними контурами втрат у сталі.

Метою даної роботи є розробка математичних і програмних засобів адаптації імітаційної моделі АД ЕМТС до умов врахування втрат у сталі за використання їхніх еквівалентних контурів та дослідження впливу величини параметрів даних еквівалентних контурів на адекватність математичної моделі.

Розробку математичної моделі АМ з еквівалентними контурами втрат у сталі виконано на основі моделі АД ЕМТС за врахування основної просторової гармоніки МРС, використання параметрів фазних обмоток статора задля створення трьох додаткових короткозамкнених еквівалентних контурів із властивостями взаємної індуктивності лише за основним магнітним полем.

Початковою інформацією для формування матриць параметрів контурів АД ЕМТС є обмоткові дані [10], електромагнітні характеристики електротехнічних матеріалів, особливості схеми обмотки статора щодо взаємної індуктивності її віток за шляхами потоків розсіювання, залежності електромагнітних параметрів. Нелінійність даних залежностей випливає з врахування або за заздалегідь розрахованої залежності зміни коефіцієнту насичення магнітного поля у функції величини сумарної МРС машини, або із використанням залежностей електромагнітних параметрів за результатами польового аналізу. Електромагнітний момент визначається за величинами електромагнітних параметрів і струмів контурів статора і ротора. Механічні та додаткові втрати враховано відповідними гальмівними моментами.

Сформуємо математичну модель АД ЕМТС з еквівалентними контурами втрат в сталі із з'єднанням фазних обмоток за схемою «зірка». З метою отримання такої моделі сформуємо матрицю параметрів обмотки для рівнянь електричної рівноваги відносно струмів віток трьох фаз. Початкова інформація для формування даних матриць (визначена за результатами обробки обмоткових даних) представлена у вигляді матриць: просторових комплексів одиничних МРС віток $\left[\overline{F}_v\right]$; статорних активних опорів і індуктивностей за шляхами потоків розсіювання $\left[r_s\right]$ і $\left[m_{ss}\right]$ [6]

$$\left[\overline{F}_v\right]=\left[f_A e^{j\alpha_A}, f_B e^{j\alpha_B}, f_C e^{j\alpha_C}\right];\quad \left[r_s\right]=\begin{bmatrix} r_A & 0 & 0 \\ 0 & r_B & 0 \\ 0 & 0 & r_C \end{bmatrix};\quad \left[m_{ss}\right]=\begin{bmatrix} m_{AA} & m_{AB} & m_{AC} \\ m_{BA} & m_{BB} & m_{BC} \\ m_{CA} & m_{CB} & m_{CC} \end{bmatrix}, \tag{1}$$

де f_i, α_i – модуль та аргумент просторового комплексу одиничної МРС вітки (фази) *i=A, B, C*.

Наведені матриці відповідають системі рівнянь з трьома незалежним фазними струмами. Але для схеми «зірка» струм фази *C* залежить від незалежних струмів фаз *A* і *B* за першим законом Кірхгофа. Розв'язок системи рівнянь електричної рівноваги АД потребує наявності двох рівнянь електричної рівноваги відносно незалежних струмів статора. Задля їхнього отримання використо-

вуються матриця перетворення незалежних струмів в струми віток $[k_{inv}]$ і матриця визначення відомих лінійних напруг мережі через фазні напруги віток за другим законом Кірхгофа $[k_u]$ [9]

$$[k_{inv}]=\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\\ -1 & -1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}i_A\\ i_B\\ i_C\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}i_A\\ i_B\end{bmatrix}^{-1};\qquad [k_u]=\begin{bmatrix}1 & -1 & 0\\ 0 & 1 & -1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}u_{AB}\\ u_{BC}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}u_A\\ u_B\\ u_C\end{bmatrix}^{-1}.$$

Трансформуємо наведені матриці на випадок врахування трьох додаткових контурів втрат у сталі статора. Оскільки ці контури короткозамкнені, їхні струми є незалежними. Трансформована для додаткового урахування цих струмів контурів сталі i_{kA},i_{kB},i_{kC} система рівнянь електричної рівноваги АД повинна бути розширеною і сформованою відносно матриці п’яти незалежних струмів статора $[i_{kA},i_{kB},i_{kC},i_A,i_B]_t$ для матриці п’яти відомих напруг $[0,0,0,u_{AB},u_{BC}]_t$. У даному випадку матриці включення наступні:

$$[k_{inv}]_k=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1\\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1\end{bmatrix};\qquad [k_u]_k=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1\end{bmatrix}.$$

У такому випадку початкова інформація (1) повинна бути трансформована. Розмірність матриць повинна відповідати кількості контурів і дорівнювати шести. Для формування матриць параметрів обмотки статора і контурів сталі статора замість матриць (1) отримуються матриці у наступному вигляді:

$$[\overline{F_v}]_k=[[\overline{F_v}],[\overline{F_v}]];\quad [r_s]_k=[diag\{r_k,r_k,r_k\},[r_s]];\quad [m_{ss}]_k=[diag\{l_k,l_k,l_k\},[m_{ss}]],$$

де r_k,l_k – активний опір і індуктивність навантаження для еквівалентних контурів втрат сталі.

Таким чином, отримано математичну модель АД ЕМТС з додатковими еквівалентними контурами втрат у сталі, яку можна інтегрувати до системи імітаційного моделювання. Параметри r_k,l_k визначаються і змінюються в процесі розрахунку з урахуванням поточного значення величини втрат у сталі P_{st} (визначено за поточними величинами індукції і частоти) і діючого значення струму контуру сталі I_{st}.

Складність визначення параметрів еквівалентних контурів сталі АД випливає з наявної нелінійності електромагнітних параметрів матеріалу, які змінюються в залежності від зміни режиму роботи машини. Задля дослідження квазіусталеного режиму роботи АД за математичною моделлю з еквівалентними контурами втрат сталі необхідно формалізувати зв'язок параметрів еквівалентних контурів втрат в сталі з параметрами режиму роботи машини. Формалізація такого зв'язку загально відомими методами (аналітичним, графічним і т.п.) потребуватиме об’ємних досліджень з врахуванням багатьох змінних.

В даній роботі пропонується отримання відповідного зв’язку тільки на поточному етапі розв’язку системи рівнянь електричної та механічної рівноваги АД. Важливою вимогою до даного підходу з визначення параметрів контурів сталі є забезпечення стійкості розв’язку. Для цього корегування величини параметрів здійснюється за поточними значеннями параметрів робочих режимів з певним кроком у часі. Часова затримка наступного корегування параметрів забезпечує затухання перехідного процесу зміни струмів внаслідок зміни параметру. На початку розрахунку задається величина опору r_{k0}, яка у подальшому корегується змінним коефіцієнтом k_{st}

$$r_k=r_{k0}k_{st}.$$

Зміна цього коефіцієнту повинна забезпечити плавне і швидке наближення значення r_k до величини P_{st}/I_{st}^2. Для цього враховується значення на попередньому кроці зміни опору $r_{k-} = r_{k0}k_{st-}$. Розбіжність $\Delta = r_{k-} - P_{st}/I_{st}^2$ використовується для знаходження нової величини k_{st}

$$k_{st} = \frac{r_{k-} - \delta\Delta}{r_{k0}} = (1+\delta)k_{st-} - \frac{\delta}{r_{k0}}\frac{P_{st}}{I_{st}^2},$$

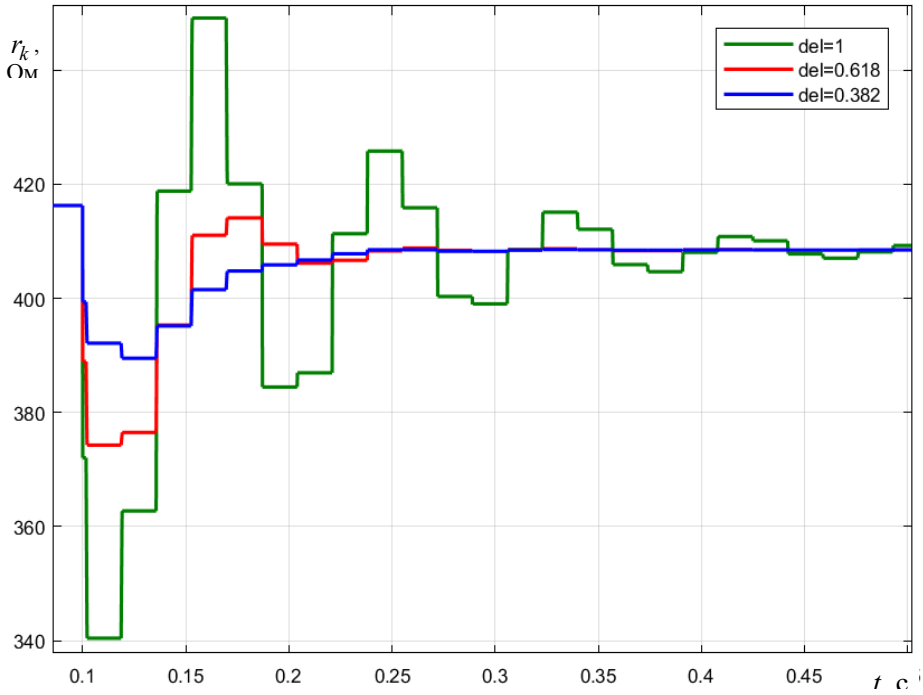
де δ – ітераційний коефіцієнт, $0 < \delta < 1$. Під час розрахунків було прийнято $\delta = 0{,}382$.

Індуктивність навантаження контуру сталі визначається за заданою величиною tgφ контуру

$$l_k = r_k \operatorname{tg}\varphi / (2\pi f),$$

де f – частота перемагнічування магнітопроводу.

Чисельний експеримент виконано для порівняння результатів розрахунку параметрів режиму роботи АД 4А160S6У3 із моментом навантаження, який дорівнює номінальному моменту АД під час розрахунків перехідних процесів асинхронної машини до усталеного режиму роботи із живленням від промислової мережі. Порівнюються результати розрахунку без урахування втрат у сталі з розрахунками із урахуванням цих втрат у паралельних до АД опорах та в еквівалентних контурах із зміною tgφ їхнього навантаження. Величину електромагнітних параметрів АД визначено відповідно до даних довідника за відомими методиками із урахуванням нелінійності коефіцієнту насичення магнітного поля. Характер впливу величини δ на динаміку зміни опору r_k у процесі визначення параметрів усталеного режиму можна оцінити за порівнянням залежностей на рисунку для трьох значень: δ =1; δ =0,618; δ =0,382. Початкова величина $r_{k0} = 416$ Ом починає коригуватися з модельного часу $t = 0{,}1$ с.



Результати розрахунків зведено до таблиці, де наведено: параметри контурів сталі, робочого режиму АД (струм фази, ККД, $\cos\varphi$, кутова швидкість), потужність втрат у сталі статора за інформацією про індукцію і частоту. У першому рядку наведено довідникову інформацію про параметри номінального режиму АД для оцінки достовірності результатів математичного моделювання. Третій рядок відповідає розрахунку за моделлю з трифазними опорами втрат сталі, підключеними на лінійну напругу у паралель до АД, які забезпечують потрібну величину втрат (наведено величину опорів і струми до і після підключення цих опорів).

Порівняльний аналіз довідникових даних і результатів розрахунків з еквівалентними контурами втрат у сталі дає змогу зробити висновки щодо потрібного співвідношення активної і індуктивної складових навантаження еквівалентних контурів. Видно, що найкращий збіг із даними довідника забезпечує мінімальний індуктивний опір. Збільшення частки індуктивного опору дещо збільшує розмагнічування магнітного кола струмами втрат у сталі, про що свідчить тенденція зниження втрат у сталі.

Джерело інформації		$tg\varphi_{st}$	r_k, Ом	l_k, Гн	I_s, А	η	$\cos\varphi$	ω_r, с$^{-1}$	P_{st}, Вт
Довідник		-	-	-	22,535	0,86	0,86	101,89	-
розрахунок	Без опорів втрат сталі	-	-	-	22,1	0,8659	0,871	101,9	283,7
	паралельні опори	-	1535	-	$\frac{22,11}{22,48}$	0,8636	0,8588	101,9	283,7
	з еквівалентними контурами	0,005	408,6	0,0065	22,56	0,863	0,856	101,89	282,7
		0,01	408,5	0,013	22,56	0,863	0,856	101,89	282,7
		0,05	405,5	0,065	22,58	0,863	0,8554	101,89	282,6
		0,1	396,4	0,126	22,6	0,8628	0,855	101,89	282,5
		0,15	382,2	0,183	22,62	0,8627	0,8542	101,89	282,4
		0,25	342,9	0,273	22,66	0,8624	0,8527	101,89	282,1
		0,35	297	0,331	22,71	0,8621	0,8513	101,89	281,9
		0,45	252,1	0,361	22,76	0,8618	0,8498	101,88	281,6
		0,75	149,9	0,358	22,89	0,861	0,8456	101,87	280,9
		1,05	93,26	0,312	23,03	0,8601	0,8413	101,87	280,2
		1,65	43,7	0,23	23,31	0,8583	0,8328	101,85	278,7

Результати розрахунку режиму двигуна з урахуванням втрат у сталі еквівалентними контурами (за мінімальної індуктивної складової їхнього навантаження) і паралельними опорами практично збігаються, що свідчить про однакову адекватність цих моделей у даних умовах. Але у генераторному режимі слід застосовувати модель з еквівалентними контурами (з мінімальною часткою індуктивності), оскільки для втрат у паралельних опорах енергія буде споживатися не з валу генератора, а з електричного виходу генератора, що не відповідає фізиці процесів, яка відображається енергетичною діаграмою генератора. Крім того, модель з еквівалентними контурами є більш фізичною в умовах складних схем обмотки статора з кількома електричними з'єднаннями із зовнішньою мережею.

Висновки і рекомендації. Математичну модель АМ з еквівалентними контурами втрат сталі статора можна отримати на основі моделі АД ЕМТС з мінімальною трансформацією матриць параметрів і включення. Розроблений алгоритм ітераційного визначення параметрів еквівалентних контурів втрат у сталі у процесі розрахунку режиму роботи забезпечує високу точність і стійкість аналізу, про що свідчить практичний збіг результатів з даними довідника і стандартними методами проектування АД. Найбільшу точність розрахунків забезпечують еквівалентні контури втрат у сталі із мінімальною часткою їхнього індуктивного навантаження.

У режимі двигуна за схем обмотки статора з одним входом моделі врахування втрат у сталі за допомогою еквівалентних контурів і паралельних до двигуна опорів забезпечують однакову точність і можуть використовуватися на паритетній основі. За складних схем обмотки статора і у режимі генератора модель з еквівалентними контурами має переваги завдяки більш адекватному відображенню процесів перетворення енергії у АМ.

Практична цінність отриманих результатів полягає у підвищенні точності та ефективності комплексного моделювання АМ у складі ЕМС і, відповідно, проектного синтезу. Зокрема, модель використовується для дослідження систем відновлюваної енергетики, наприклад, [6].

1. Popovych O.M., Golovan I.V. Complex design tools for improvement of electromechanical systems with induction motors. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 2. С. 52-59. DOI: https://doi.org/10.15407/techned2022.02.052.

2. Diaz G., Gonzalez-Moran C., Arboleya P. and Gomez-Aleixandre J. Analytical Interpretation and Quantification of Rotational Losses in Stator Cores of Induction Motors. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2007. Vol. 43. No 10. Pp. 3861-3867. DOI: https://doi.org/10.1109/TMAG.2007.903382.

3. Ionel D. M., Popescu M., Dellinger S.J., Miller T.J.E., Heideman R.J., McGilp M.I. On the variation with flux and frequency of the core loss coefficients in electrical machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2006. Vol. 42. No 3. Pp. 658-667. DOI: https://doi.org/10.1109/TIA.2006.872941.

4. Bermúdez A., Gómez D., Salgado P. Eddy-Current Losses in Laminated Cores and the Computation of an Equivalent Conductivity. *IEEE Transactions on Agneics*. 2008. Vol. 44. No 12. Pp. 4730-4738. DOI: https://doi.org/10.1109/TMAG.2008.2005118.

5. Радин В.И., Лондин Й., Розенкноп В.Д. Унифицированная серия асинхронных двигателей Интерэлектро. М.: Энергоатомиздат, 1990. 416 с.

6. Popovych O., Golovan I., Shevchuk S. and Listovshchyk L. Means of Complex Design of the Electromechanical System of the Gravity Energy Storage of the WindPower Plant. IEEE 8th International Conference

on *Energy Smart Systems* (ESS), Kyiv, Ukraine, 12-14 October 2022. Pp. 149-152. DOI: https://doi.org/10.1109/ESS57819.2022.9969243.

7. Мішин В.І., Каплун В.В., Чуєнко Р.М. Компенсовані асинхронні машини. К.: КНУТД, 2012. 221 с.

8. Вейц В.Л., Вербовой П.Ф., Кочура Б.Н. Динамика управляемого электромеханического привода с асинхронными двигателями. К.: Наук. думка, 1988. 272 с.

9. Попович О.М. Математична модель асинхронної машини електромеханотронної системи для імітаційного та структурного моделювання. *Техн. електродинаміка*. 2010. № 4. С. 25-32.

10. Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А. Асинхронные двигатели серии 4А. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с.

MODELING OF INDUCTION MOTORS IN ELECTROMECHANICAL SYSTEMS CONSIDERING STATOR IRON LOSSES

O.M. Popovych, I.V. Golovan
Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
Beresteiskyi Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine. E-mail: popovich1955@ukr.net; golovan_77@ukr.net.

A comparative study has been conducted on methods for accounting for the influence of losses in the stator iron of squirrel-cage induction motors on the operating parameters. A comparison was made between reference data and calculation results of the nominal mode parameters of an asynchronous motor without considering losses in the stator iron and with their consideration using equivalent resistances connected in parallel to the motor, as well as equivalent circuits of losses in the stator. The effect of the ratio of active and inductive components of the load of equivalent stator loss circuits on the results of mathematical modeling has been investigated. The study was carried out based on a universal mathematical model of an asynchronous motor of electromechanical systems with an arbitrary stator winding scheme. An algorithm for determining and adjusting the parameters of the stator loss circuits during the integration of the differential equations of electrical and mechanical balance of the asynchronous motor to a steady-state value has been developed, based on the values of losses in the stator iron (depending on the induction and frequency) and the effective value of the current of the equivalent circuit. To ensure solution stability, the use of an iteration coefficient and discretization of resistance adjustment has been justified. The application of stator iron loss circuits in the mathematical model of an asynchronous machine in generator mode has been justified, when the use of parallel connected equivalent resistances contradicts the machine's energy diagram. References 10, figure 1, table 1.
***Key words**:* induction motor, operating mode, losses in stator iron, equivalent circuits.

1. Popovych O.M., Golovan I.V. Complex design tools for improvement of electromechanical systems with induction motors. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. No 2. Pp. 52-59. DOI: https://doi.org/10.15407/techned2022.02.052.

2. Diaz G., Gonzalez-Moran C., Arboleya P. and Gomez-Aleixandre J. Analytical Interpretation and Quantification of Rotational Losses in Stator Cores of Induction Motors. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2007. Vol. 43. No 10. Pp. 3861-3867. DOI: https://doi.org/10.1109/TMAG.2007.903382.

3. Ionel D. M., Popescu M., Dellinger S.J., Miller T.J.E., Heideman R.J., McGilp M.I. On the variation with flux and frequency of the core loss coefficients in electrical machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2006. Vol. 42. No 3. Pp. 658-667. DOI: https://doi.org/10.1109/TIA.2006.872941.

4. Bermúdez A., Gómez D., Salgado P. Eddy-Current Losses in Laminated Cores and the Computation of an Equivalent Conductivity. *IEEE Transactions on Agneics*. 2008. Vol. 44. No 12. Pp. 4730-4738. DOI: https://doi.org/10.1109/TMAG.2008.2005118.

5. Radin V.I., Londin Y., Rozenknop V.D. Unified series of induction motors InterElectro. Moskva: Energoatomizdat, 1990. 416 p. (Rus)

6. Popovych O., Golovan I., Shevchuk S. and Listovshchyk L. Means of Complex Design of the Electromechanical System of the Gravity Energy Storage of the WindPower Plant. IEEE 8th International Conference on *Energy Smart Systems* (ESS), Kyiv, Ukraine, 12-14 October 2022. Pp. 149-152. DOI: https://doi.org/10.1109/ESS57819.2022.9969243.

7. Mishyn V.I., Kaplun V.V., Chuyenko R.M. Compensated asynchronous machines. Kyiv: Kyivskyi Natsionalnyi universytet tekhnologii ta dyzainu, 2012. 221 p. (Ukr)

8. Veits V.L., Verbovoy P.F., Kochura B.N. Dynamics of controlled electromechanical drive with asynchronous motors. Kyiv: Naukova Dumka, 1988. 272 p. (Rus)

9. Popovych O.M. Mathematical model of an asynchronous machine of an electromechanical system for simulation and structural modeling. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2010. No. 4. Pp. 25-32. (Ukr)

10. Kravchik A.E., Shlaf M.M., Afonin V.I., Sobolenskaya E.A. Induction motors of the 4A series. Moskva: Energoizdat, 1982. 504 p. (Rus)

Надійшла 25.04.2024