

UDC 004.942

ОЦІНЮВАННЯ АДЕКВАТНОСТІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА В УМОВАХ НЕЯКІСНОГО ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

Кузнецов В.В., канд. техн. наук,

witjane20002014@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8169-4598

Український державний університет науки і технологій (м. Дніпро,
Україна)

Спірінцев Д.В., канд. техн. наук,

spiritsev@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5728-6626

Шликов С.Ю., аспірант*,

shlukov.servgik@ukr.net, ORCID:0009-0006-5437-6849

Кривда В.В., аспірант*,

gelios.pls@gmail.com, ORCID: 0009-0003-8526-8064

Кривда О.В., аспірант*,

alexander.kryvda@swyft.com

Мелітопольський державний педагогічний університет імені Богдана
Хмельницького (м. Запоріжжя, Україна)

У статті розглянуто підхід до математичного моделювання асинхронного електродвигуна, який працює в умовах неякісного або нестабільного електроживлення. Запропонована модель є універсальною і побудована на основі аналізу миттєвих значень напруги та струму за допомогою просторово-часових векторних комплексів (ПВК), що дозволяє уникнути необхідності перетворення сигналів у гармонічні складові чи симетричні компоненти. Такий підхід забезпечує більш гнучке та точне моделювання електромагнітних і енергетичних процесів у двигуні навіть у складних умовах роботи.

Метою дослідження є експериментальна перевірка адекватності розробленої моделі шляхом порівняння розрахованих та фактичних значень основних техніко-економічних показників двигуна — таких як коефіцієнт корисної дії (ККД), коефіцієнт потужності ($\cos \varphi$), а також сумарні втрати потужності. Для цього було проведено натурний експеримент у цеху, де умови живлення характеризувалися спотворенням синусоїдальності, асиметрією фаз і значними коливаннями навантаження.

Дослідження проводилося на асинхронному двигуні потужністю 11 кВт із короткозамкненим ротором, при навантаженнях у діапазоні від 2,3 до 12,8 кВт. Експериментальні дані збиралися за допомогою спеціалізованого вимірювального комплексу із високоточними датчиками

* Науковий керівник — канд. техн. наук, доцент Спірінцев Д.В.

струму та напруги (на основі ефекту Холла), а також тахогенератора. Верифікація моделі здійснювалася з використанням регресійного аналізу та оцінки середньоквадратичної похибки.

Отримані результати свідчать про високу точність прогнозування моделювальних параметрів: середньоквадратична відносна похибка склала 2,72 % для ККД, 3,0 % для коефіцієнта потужності та 3,99 % для сумарних втрат. Коефіцієнт кореляції між змодельованими та експериментальними даними становив 0,99, що підтверджує адекватність обраного математичного підходу.

Модель є не лише теоретично обґрунтованою, а й практично придатною до впровадження у цифрові системи моніторингу та керування електроприводами в промислових умовах. Її застосування дозволяє підвищити ефективність експлуатації обладнання, виявляти аномалії у роботі двигуна та оптимізувати енергоспоживання в умовах спотвореного або несиметричного живлення.

Ключові слова: асинхронний двигун, математична модель, неякісне електроживлення, просторово-часові вектори, енергетичні показники, ККД, коефіцієнт потужності, сумарні втрати, експериментальна верифікація, цифрова діагностика

Постановка проблеми. Одним із ключових етапів побудови будь-якої математичної моделі є не лише її формальне описання та алгоритмічна реалізація, але й обов'язкова перевірка адекватності — тобто визначення ступеня відповідності між результатами моделювання та реальними фізичними процесами. У науково-технічній практиці найбільш достовірним і загальновизнаним методом такої перевірки є експериментальна верифікація [5; 6]. Вона дозволяє на основі об'єктивно отриманих вимірювальних даних визначити, наскільки точно модель відображає поведінку об'єкта або системи в умовах, максимально наближених до реальних.

Сутність експериментальної перевірки полягає в тому, що результати, отримані шляхом чисельного моделювання, порівнюються з фактичними значеннями тих самих фізичних або технічних параметрів, виміряних у ході лабораторного або натурного експерименту. Такий підхід дозволяє оцінити похибку обчислень, виявити сильні та слабкі сторони моделі, встановити межі її застосування та надалі вдосконалити структуру або параметри.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для складних технічних об'єктів, таких як електричні машини, системи автоматичного керування або електроенергетичні установки, експериментальна перевірка є необхідною умовою підтвердження достовірності побудованої моделі [3; 4]. Особливої актуальності вона набуває у випадку моделювання асинхронного електродвигуна, який працює в умовах неякісного електроживлення. Наявність спотворень форми напруги, асиметрії фаз,

гармонічних складових і нестабільних режимів роботи може суттєво впливати на електромагнітні процеси всередині машини [1; 2].

Щоб оцінити здатність математичної моделі адекватно відображати динамічні й енергетичні характеристики двигуна, необхідно провести серію вимірювань за реальних умов експлуатації. Порівняння отриманих експериментальних даних зі змодельованими результатами дозволяє дати об'єктивну оцінку точності моделі та зробити обґрунтовані висновки щодо її практичної придатності [2].

Таким чином, експериментальна верифікація є не просто допоміжним етапом, а необхідним компонентом процесу математичного моделювання складних електротехнічних систем. Вона забезпечує наукову обґрунтованість, підвищує достовірність результатів та формує основу для впровадження моделі у практичні інженерні рішення.

Основна частина. *Перевірка адекватності синтезованої моделі асинхронного двигуна.* У галузі моделювання електричних машин, зокрема асинхронних двигунів, традиційно прийнято розділяти задачі на дві великі категорії: моделювання перехідних процесів та аналіз енергетичного стану машини. Перехідні процеси дозволяють вивчати динамічну поведінку двигуна при зміні навантаження, запуску, зупинці, а також при виникненні короткочасних збурень у мережі. Водночас аналіз енергетичних показників передбачає розрахунок таких параметрів, як коефіцієнт корисної дії (ККД), коефіцієнт потужності ($\cos\phi$), втрати енергії у статорі та роторі, реактивна складова струму тощо. У більшості випадків для розв'язання задач другого типу використовується класична еквівалентна схема заміщення асинхронного двигуна, побудована на основі припущення про ідеальну трифазну симетричну синусоїдальну систему напруг живлення [1].

Однак у сучасних умовах експлуатації електроприводів, особливо в промисловості, такі припущення рідко відповідають дійсності. Реальна напруга в мережі часто має спотворення синусоїдальності через наявність вищих гармонік, а також може бути асиметричною за амплітудою та/або фазою через нерівномірність навантаження. Ці фактори істотно впливають як на динаміку електромагнітних процесів у двигуні, так і на його енергетичну ефективність. Для адекватного аналізу таких ситуацій застосування лише методу симетричних складових або гармонічного спектрального аналізу є недостатнім, оскільки вони не дозволяють водночас враховувати складні комбіновані ефекти у часовій та частотній областях.

У зв'язку з цим у даному дослідженні запропоновано універсальну модель асинхронного двигуна [2], що дозволяє аналізувати як перехідні, так і усталені режими роботи за умови реального (неспотвореного чи спотвореного) живлення. Основою цієї моделі є аналіз миттєвих значень напруги живлення із використанням просторово-часових комплексів (ПВК). Такий підхід не потребує попереднього перетворення напруг і струмів у симетричні складові або гармоніки, що значно спрощує

реалізацію обчислювального алгоритму та робить його більш універсальним.

Модель дозволяє одночасно описувати два класи параметрів: з одного боку - динамічні змінні, зокрема миттєві значення струму статора, електромагнітного моменту, кутової швидкості, а також їх спектральні характеристики, включаючи частотні пульсації та гармонічні складові; з іншого боку - основні енергетичні показники, такі як ККД, коефіцієнт потужності, активні та реактивні втрати у статорі та роторі, а також сумарні втрати потужності. Завдяки такій інтеграції модель дозволяє проводити повноцінний аналіз режимів роботи двигуна при неідеальному електроживленні, що є вкрай актуальним у контексті сучасних вимог до енергоефективності, надійності та цифрової діагностики електроприводів.

В якості експериментального об'єкта було обрано цех ТОВ «Укрспецсервіс», де встановлено потужний напівпровідниковий перетворювач, під час роботи якого в напрузі цехової мережі спостерігаються спотворення — як несиметрія, так і відхилення від синусоїдальної форми.

У ході експерименту було отримано осцилограми струмів, споживаних асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором потужністю 11 кВт, номінальні параметри якого наведено в табл. 1, при його живленні від зазначеної мережі. Під час дослідження було організовано доступ до нейтральної точки обмотки двигуна, що дало змогу зняти осцилограми фазних струмів і напруг. Вимірювання активних опорів обмоток засвідчило їх симетричність і відповідність паспортним значенням.

Навантаження на валу асинхронного двигуна мало випадковий характер і змінювалося в широкому діапазоні - від 2,3 до 12,8 кВт, що відповідає інтервалу $(0,21-1,16)P_{ном}$. За еталонні значення енергетичних параметрів були прийняті дані згідно з вимогами стандарту ГОСТ 7217-87 «Машини електричні обертові. Двигуни асинхронні. Методи випробувань».

Таблиця 1

Паспортні дані досліджуваного двигуна

Параметр	Одиниця вимірювання	Значення
Номінальна потужність	кВт	11
Струм статора	А	22
Частота обертання	об/хв	1450
Коефіцієнт корисної дії (ККД)	%	91
$\cos\phi$ (коефіцієнт потужності)	в.о.	0,85

Електродвигун встановлено для приводу дробарки. Його навантаження змінювалося шляхом регулювання подачі матеріалу через завантажувальний бункер. Схему підключення обладнання під час проведення експерименту наведено на рис. 1.

У дослідженні використано вимірювальний комплекс «СКПЕП» (Система контролю параметрів електроприводів), розробки ТОВ НВП «ЦЕД». До складу комплексу входять датчики струму та напруги фірми LEM (Швейцарія), що працюють на основі ефекту Холла та мають динамічну похибку не більше 0,01%.

Вимірювання частоти обертання здійснювалося за допомогою тахогенератора типу ТМГ-30. Також використовувався модуль АЦП виробництва фірми L-Card. Характеристики вимірювальних каналів наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Характеристики вимірювальних каналів

Компонент	Характеристики
АЦП	
Тип	Е-440
Кількість каналів	16 диференційованих
Розрядність	12 біт
Час перетворення	1,7 мкс
Діапазон вхідного сигналу	$\pm 5,12$ В; $\pm 2,56$ В; $\pm 1,024$ В
Максимальна частота перетворення	200 кГц
Зсув нуля	$\pm 0,5$ МЗР; макс. 1 МЗР
Датчик напруги	
Тип	LV-400
Діапазон вхідного сигналу	0 – 500 В
Діапазон вихідного сигналу	0 – 10 В
Максимальна статична похибка	0,015%
Датчик струму	
Тип	LA-100C
Діапазон вхідного сигналу	0 – 250 А
Діапазон вихідного сигналу	0 – 10 В
Максимальна статична похибка	0,03%
Максимальна динамічна похибка	0,08%
Тахогенератор	
Тип	ТМГ-30
Коефіцієнт передачі	1,12 В/об/хв

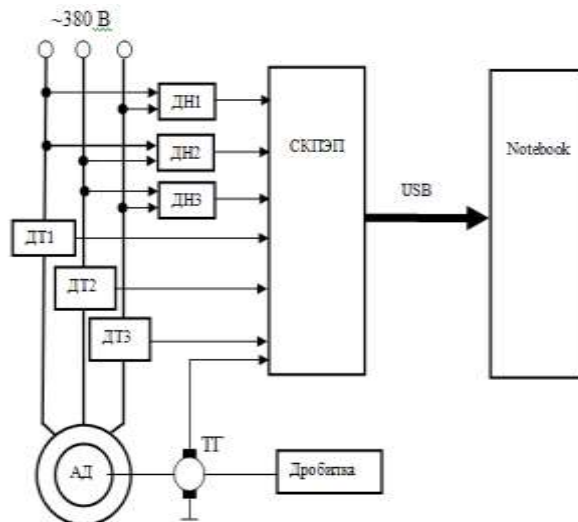


Рис. 2. Схема підключення обладнання для перевірки адекватності моделі асинхронного двигуна:

Умовні позначення: ДН – датчик напруги; ДТ – датчик струму; ТГ – тахогенератор.

На рис. 3 показано вікно програми CED Expert під час осцилографування сигналів у процесі роботи досліджуваного електродвигуна під навантаженням.

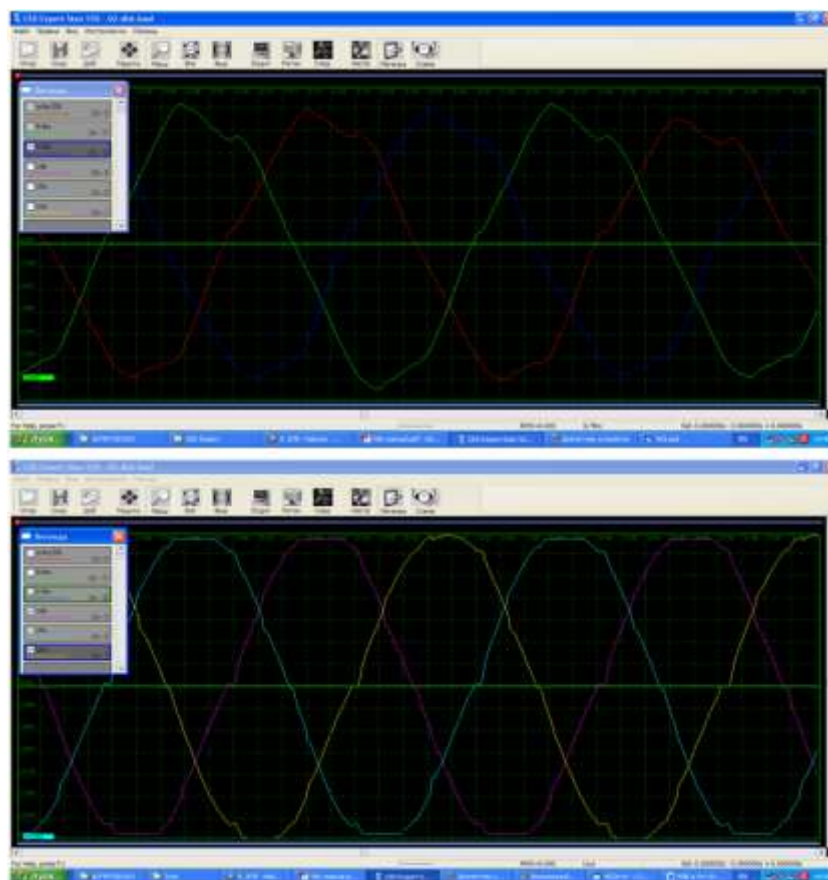


Рис. 3. Осцилограми струмів (угорі) та напруг (унизу) в досліджуваному електродвигуні під час роботи під навантаженням

Для порівняння точності відтворення моделлю шуканих струмів одночасно по всіх трьох фазах використано показник, що визначає різницю добутків проєкцій струму статора на осях α - β [3]:

$$\varepsilon_i = I_{\alpha i} \cdot \hat{I}_{\beta i} - I_{\beta i} \cdot \hat{I}_{\alpha i}, \quad (1)$$

де $I_{\alpha i}, I_{\beta i}$ - проєкції ПВК струму статора, вимірюваного на i -му кроці;
 $\hat{I}_{\alpha i}, \hat{I}_{\beta i}$ - аналогічні величини, розраховані за допомогою моделі.

Прямий і зворотний перехід від миттєвих значень фазних величин до їх комплексного представлення та проєкцій, використаний у моделі, детально розглянуто в [4]. Як критерій її адекватності використано відносне середньоквадратичне значення відповідного показника за період:

$$\delta I = \frac{1}{I_{\text{действ}}} \sqrt{\frac{\varepsilon_i^2}{N}}, \quad (2)$$

де N - кількість вимірювань за період; $I_{\text{действ}}$ - ефективне значення струму.

Крім того, оцінювалася точність відновлення швидкості, для чого було використано величину середньоквадратичного відхилення між відновленим і вимірним сигналом:

$$\delta \omega = \frac{1}{\omega_{cp}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (\omega_i - \hat{\omega}_i)^2}, \quad (3)$$

де ω_i - вимірне значення швидкості в i -й момент часу, $\hat{\omega}_i$ - відновлене значення швидкості, ω_{cp} - середнє значення швидкості на розглянутому інтервалі.

Масиви фазних напруг, отриманих експериментальним шляхом, були використані як вхідний вплив для досліджуваної моделі, при цьому її вихідними параметрами виступали фазні струми. Порівняння останніх (рис. 4) свідчить про те, що модель досить точно відображає реальні процеси в асинхронному двигуні. Відносна похибка не перевищила 2,4%.

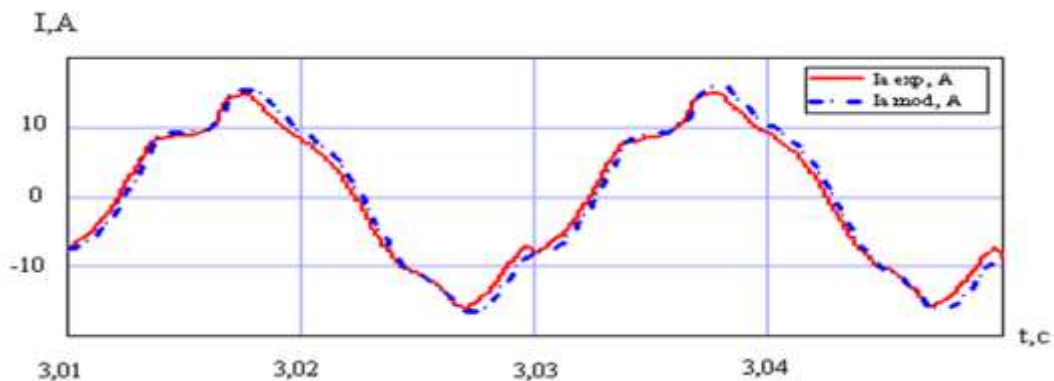


Рис. 4. Струм фази «А», отриманий експериментально (суцільна лінія) та розрахований за моделлю (штрих-пунктирна лінія)

На рис. 5 наведено експериментальні та модельні осцилограми швидкості двигуна під час пуску приводу без навантаження. Як видно, низька якість електроенергії проявляється не лише у пульсаціях струму, але й у пульсаціях швидкості досліджуваного двигуна. Похибка непрямого визначення останньої не перевищує 4,5%.

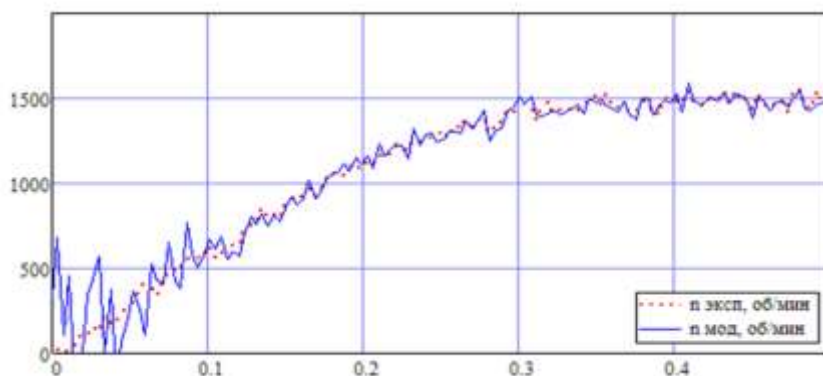


Рис. 5. Швидкість двигуна під час пуску без навантаження, отримана експериментально та шляхом моделювання (суцільна лінія)

Основним питанням проведених досліджень було порівняння зазначених вище енергетичних величин АД. Ступінь відповідності їх прогнозу фактичним значенням визначалась на основі регресійного аналізу відповідно до [5,6]. Результати останнього наведені на рис. 6. Тут діапазон зміни сумарних втрат становив 0,98–1,62 від їх номінального значення внаслідок короточасних перевантажень АД, проведених під час експерименту.

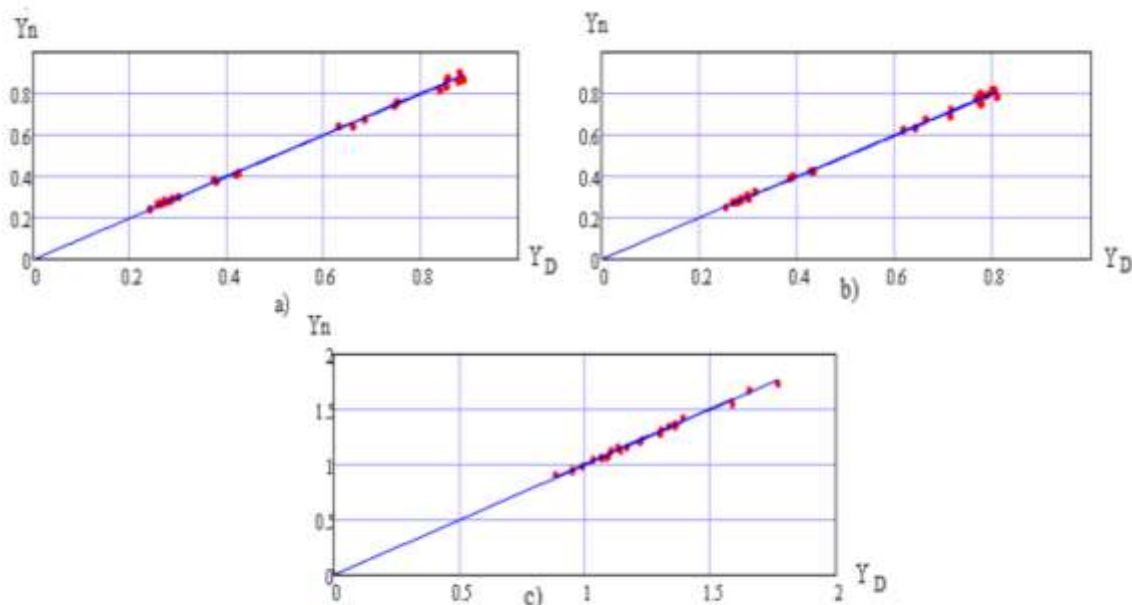


Рис. 6. Відповідність експериментальних даних результатам моделювання:
а) ККД двигуна; б) коефіцієнт потужності; в) сумарні втрати (в умовних одиницях).

Адекватність моделювалася після оцінки кожного критерію. Статистичні методи, систематична регресія [6]:

$$Y_n^* = a_0 + a_1 Y_\partial, \quad (4)$$

де $a_0 = \bar{Y}_n - r_{Y_\partial Y_n} \sigma_{Y_n} / \sigma_{Y_\partial} \bar{Y}_\partial$; $a_1 = r_{Y_\partial Y_n} \sigma_{Y_n} / \sigma_{Y_\partial}$.

Тут $\bar{Y}_n, \bar{Y}_\partial$ – середні значення прогнозованих та дійсних значень; $r_{Y_\partial Y_n}$ – коефіцієнт кореляції між цими величинами; $\sigma_{Y_n}, \sigma_{Y_\partial}$ – середньоквадратичні відхилення. Зазначені величини обчислювалися за формулами:

$$r_{Y_\partial Y_n} = \frac{\sum_1^L (Y_\partial - \bar{Y}_\partial)(Y_n - \bar{Y}_n)}{L \sigma_{Y_\partial} \sigma_{Y_n}}, \quad (5)$$

$$\sigma_{Y_\partial} = \sqrt{\sum_1^L (Y_\partial - \bar{Y}_\partial)^2 / (L - 1)}, \quad (6)$$

$$\sigma_{Y_n} = \sqrt{\sum_1^L (Y_n - \bar{Y}_n)^2 / (L - 1)}, \quad (7)$$

де $L = 27$ – обсяг статистичної вибірки (кількість проведених вимірів).

Середньоквадратична абсолютна помилка вимірювань визначалася як:

$$\Delta Y_n = t_p \sigma_{Y_n}^*, \quad (8)$$

де t_p – коефіцієнт Стюдента для заданих числа ступенів свободи $k = L - 1$ та надійності. У цьому випадку остання приймалася $p = 0,05$. Тут $\sigma_{Y_n}^*$ – залишкове середньоквадратичне відхилення, що обчислюється за формулою:

$$\sigma_{Y_n}^* = \sqrt{\sum_1^L (Y_n - Y_n^*)^2 / (L - 1)}. \quad (9)$$

Середньоквадратична відносна помилка прогнозу визначалася так:

$$\delta_{Y_n} = |\Delta Y_n| / Y_{n\max} 100\%, \quad (10)$$

де $Y_{n\max}$ – найбільше з одержаних значень прогнозованої величини.

Результати порівняння прогнозованих та реальних значень техніко-економічних параметрів АД при проведенні вимірювань представлені у табл. 3.

Таблиця 3

Результати порівняння прогнозованих та реальних значень техніко-економічних параметрів АТ

№ п/п	Споживана потужність, кВт	Потужність на валу, кВт	ККД			cos φ			Сумарні втрати		
			Реальн., в.о.	розрахунок., в.о.	Похибка, %	Реальн., в.о.	рознр., в.о.	Похибка, %	Реальн., кВт	рознр., кВт	Похибка, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	6,89	4,4	0,64	0,67	3,2	0,68	0,68	0,0	2,49	2,41	-3,1
2	5,30	1,76	0,33	0,29	-3,8	0,50	0,54	4,2	3,54	3,76	6,0
3	13,35	11,88	0,89	0,89	0,2	0,79	0,75	-4,7	1,47	1,36	-7,5
4	9,81	8,8	0,90	0,90	-0,1	0,81	0,75	-5,9	1,01	0,99	-2,1
5	5,63	2,2	0,39	0,41	1,5	0,54	0,52	-1,6	3,43	3,59	4,7
6	9,44	8,36	0,89	0,85	-3,9	0,81	0,76	-4,9	1,08	1,07	-0,9
7	4,90	1,32	0,27	0,29	1,8	0,47	0,52	5,8	3,58	3,84	7,5
8	14,84	12,76	0,86	0,86	0,0	0,77	0,79	1,6	2,08	1,92	-7,9
9	11,08	10,12	0,91	0,91	-0,8	0,82	0,79	-2,7	0,96	0,91	-5,3
10	11,58	10,56	0,91	0,93	2,0	0,81	0,76	-5,2	1,02	1,09	7,2
11	14,06	12,32	0,88	0,87	-0,5	0,78	0,81	2,8	1,74	1,86	6,9
12	6,41	3,52	0,55	0,53	-1,7	0,63	0,63	0,4	2,89	2,86	-1,0
13	8,77	7,48	0,85	0,86	0,7	0,79	0,84	4,3	1,29	1,23	-4,6
14	7,13	4,84	0,68	0,71	3,2	0,70	0,72	2,0	2,29	2,18	-4,6
15	10,20	9,24	0,91	0,89	-1,6	0,82	0,83	1,1	0,96	1,01	5,1
16	12,70	11,44	0,90	0,94	4,4	0,80	0,81	0,3	1,26	1,30	2,7
17	15,72	13,2	0,84	0,80	-4,4	0,76	0,74	-2,1	2,52	2,47	-2,2
18	5,91	2,64	0,45	0,44	-0,4	0,57	0,62	4,9	3,27	3,13	-4,4
19	12,11	11	0,91	0,91	0,6	0,81	0,84	3,1	1,11	1,05	-6,2
20	7,90	6,16	0,78	0,79	1,4	0,75	0,79	3,4	1,74	1,77	1,8
21	8,17	6,6	0,81	0,85	4,4	0,77	0,79	1,9	1,57	1,52	-3,5
22	6,65	3,96	0,60	0,65	5,0	0,65	0,62	-3,7	2,69	2,66	-1,2
23	10,63	9,68	0,91	0,91	-0,4	0,82	0,78	-3,6	0,95	0,88	-7,0
24	4,31	0,88	0,20	0,25	4,3	0,43	0,46	3,1	3,43	3,22	-6,2
25	6,17	3,08	0,50	0,55	4,7	0,60	0,61	1,7	3,09	3,06	-0,7
26	7,63	5,72	0,75	0,74	-0,9	0,74	0,68	-5,5	1,91	2,03	6,1
27	9,09	7,92	0,87	0,91	4,2	0,80	0,81	0,4	1,17	1,24	5,2

Результати розрахунків усіх змодельованих величин наведено в табл. 4. Отримані значення відносної середньоквадратичної похибки прогнозу свідчать про адекватність розробленої моделі.

Таблиця 4

Результати перевірки адекватності моделі

Критерій	ККД	Коефіцієнт потужності	Сумарні втрати
Коефіцієнти регресійних моделей			
a_0	-0,458	-0,493	0,656
a_1	0,97	1,13	0,98
Показники точності моделі			
Середньоквадратичне відхилення дійсного параметра	0,276	0,241	0,319
Середньоквадратичне відхилення прогнозованого параметра	0,273	0,241	0,317
Коефіцієнт кореляції	0,99	0,99	0,99
Залишкове середньоквадратичне відхилення	0,0212	0,031	0,017
Абсолютна середньоквадратична похибка	0,024	0,027	0,036
Відносна середньоквадратична похибка	2,72 %	3,0 %	3,99 %

Висновки. У результаті виконаних досліджень було здійснено всебічну оцінку адекватності математичної моделі асинхронного двигуна, що працює в умовах неякісного електроживлення. Зокрема, проаналізовано енергетичні характеристики, такі як коефіцієнт корисної дії (ККД), коефіцієнт потужності ($\cos \varphi$) та сумарні втрати потужності, з подальшим порівнянням розрахункових значень із результатами експериментальних вимірювань.

Середньоквадратичні відхилення дійсних і прогнозованих значень параметрів за основними критеріями показали надзвичайно високий рівень збігу. Так, середньоквадратичне відхилення дійсного ККД становило 0,276, тоді як прогнозованого — 0,273. Аналогічні показники для коефіцієнта потужності були 0,241 у обох випадках, а для сумарних втрат — 0,319 (дійсне) та 0,317 (прогнозоване).

Коефіцієнт кореляції, що відображає ступінь взаємозв'язку між розрахунковими та фактичними даними, становив 0,99 для всіх досліджуваних величин, що вказує на практично ідеальну відповідність моделі реальному процесу.

Відносна середньоквадратична похибка прогнозу не перевищила 4 %, а саме: 2,72 % для ККД, 3,0 % для коефіцієнта потужності та 3,99 % для сумарних втрат. Абсолютна похибка при цьому була в межах 0,024–0,036.

Проведені експерименти, зокрема на асинхронному двигуні потужністю 11 кВт, при навантаженні від 2,3 до 12,8 кВт, підтвердили, що модель точно відтворює не лише усталені, але й динамічні процеси,

включаючи запуск двигуна, зміну навантаження та роботу в умовах фазової асиметрії й гармонічних спотворень.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що запропонована математична модель є повністю адекватною, статистично достовірною та технічно придатною для застосування в системах аналізу, керування й діагностики асинхронних двигунів, особливо в умовах нестабільного або спотвореного електроживлення. Її застосування дозволяє значно підвищити ефективність оцінки технічного стану електроприводів, забезпечити енергоощадність та підвищити надійність промислових електромеханічних систем.

Література

1. Shaller D., Seidler E. Berechnung des Einflusses einer Zweiphasenlast auf die Strom – und Spannungsunsymmetrie in Energieversorgungsnetzen. *Mitt.Inst.Energ.* 1965. H.70. pp.586-596.
2. Y. Kuznetsova, V. Kuznetsov, M. Tryputen, A. Kuznetsova, M. Tryputen, and M. Babyak. Development and Verification of Dynamic Electromagnetic Model of Asynchronous Motor Operating in Terms of Poor-Quality Electric Power. *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 2019, pp. 287–290. DOI: 10.1109/MEES.2019.8896598.
3. Perelmuter, V.M. Direct Torque and Current Control of AC Motors. Kharkiv: Osnova, 2004. 210 p.
4. Ivanov-Smolensky, A.V. *Electric Machines*. M. Energiya, 1980. 927 p.
5. Adler, Yu.P., & Markova, E.V. The Design of Experiments to Find Optimal Conditions: A Programmed Introduction to the Design of Experiments. M.: Mir Publishers, 1975. 287 p.
6. Ivobotenko, B.A., Ilyinsky, N.F., & Kopylov, I.P. Planning of Experiment in Electromechanics. M.: Energiya, 1975. 184 p.

EVALUATION OF THE ADEQUACY OF A MATHEMATICAL MODEL OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR UNDER POOR POWER SUPPLY CONDITIONS

Vitaliy Kuznetsov, Dmytro Spirintsev, Serhiy Shlykov, Volodymyr Kryvda, Oleksandr Kryvda

The article presents a comprehensive approach to the mathematical modeling of an asynchronous electric motor operating under low-quality or unstable power supply conditions. The proposed model is based on analyzing the instantaneous values of voltage and current using space-time vector complexes (STVC), eliminating the need for signal transformation into harmonics or symmetrical components. This approach allows for more accurate

and flexible simulation of electromagnetic and energy processes in the motor under real-world industrial conditions.

The study's objective is to verify the adequacy of the developed model by comparing the calculated and experimental values of key performance parameters such as efficiency (η), power factor ($\cos \varphi$), and total power losses. Field experiments were conducted in an industrial workshop where the power supply was distorted, with phase asymmetry and load fluctuations.

An asynchronous motor with a squirrel-cage rotor rated at 11 kW was used for testing, with mechanical loading ranging from 2.3 kW to 12.8 kW. Data collection was performed using a precision measurement system including Hall-effect sensors and a tachogenerator. Verification of the model was carried out through regression analysis and evaluation of root mean square error metrics.

The results confirm high predictive accuracy of the model: relative root mean square error was 2.72% for efficiency, 3.0% for power factor, and 3.99% for total losses. The correlation coefficient between simulated and measured values reached 0.99, affirming the validity of the modeling approach.

This model is both scientifically sound and practically applicable, offering opportunities for implementation in intelligent monitoring and control systems for electric drives. It supports the detection of operational anomalies, enhances energy efficiency, and is particularly valuable in settings with distorted or unbalanced power supply.

Keywords : asynchronous motor, mathematical model, poor power quality, space-time vectors, energy indicators, efficiency, power factor, total losses, experimental verification, digital diagnostics

References

1. Shaller D., Seidler E. (1965). Berechnung des Einflusses einer Zweiphasenlast auf die Strom – und Spannungsunsymmetrie in Energieversorgungsnetzen. Mitt.Inst.Energ. H.70. 586-596.
2. Y. Kuznetsova, V. Kuznetsov, M. Tryputen, A. Kuznetsova, M. Tryputen, and M. Babyak (2019). Development and Verification of Dynamic Electromagnetic Model of Asynchronous Motor Operating in Terms of Poor-Quality Electric Power. 2019 *IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, pp. 287–290. DOI: 10.1109/MEES.2019.8896598.
3. Perelmuter, V.M. (2004). *Direct Torque and Current Control of AC Motors*. Kharkiv: Osnova.
4. Ivanov-Smolensky, A.V. (1980). *Electric Machines*. M. Energiya.
5. Adler, Yu.P., & Markova, E.V. (1975). *The Design of Experiments to Find Optimal Conditions: A Programmed Introduction to the Design of Experiments*. M.: Mir Publishers.
6. Ivobotenko, B.A., Ilyinsky, N.F., & Kopylov, I.P. (1975) *Planning of Experiment in Electromechanics*. M.: Energiya.