

[0000-0003-3095-6743] **В. Д. Захарченко¹**, аспірант,

e-mail: vladyslav.zakharchenko1@gmail.com

[0000-0003-3647-3320] **М. В. Добролюбова²**, канд. техн. наук, доцент,

e-mail: m.dobroliubova@kpi.ua

[0000-0001-8730-2789] **О. В. Стаценко²**, канд. техн. наук, доцент,

e-mail: o.statsenko@kpi.ua

[0000-0002-7222-9352] **К. Л. Шевченко²**, д-р техн. наук, доцент

e-mail: k.shevchenko@kpi.ua

¹ТОВ «PEATISS»

вул. Казимира Малевича, 15, м. Київ, 02000, Україна

²Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна

ОЦІНКА ПОХИБОК ПРИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМУ ДОСЛІДЖЕННІ ПАРАМЕТРІВ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Статтю присвячено вирішенню задачі аналізу впливу похибок вимірювальних приладів, використовуваних під час виконання стандартизованих тестів асинхронних електричних двигунів, на точність оцінювання параметрів схем заміщення цих двигунів. У статті відповідно до міжнародних стандартів визначено методика та послідовність проведення тестових досліджень асинхронного двигуна, необхідних для оцінювання параметрів його схем заміщення в номінальному режимі роботи. Також розроблено алгоритм розрахунку параметрів двигуна, отримано аналітичні вирази для розрахунку значень абсолютних похибок їх оцінювання та проаналізовано вплив похибок вимірювальних приладів на точність визначення цих параметрів. Використання отриманих у роботі результатів дає змогу оцінити очікувану точність визначення параметрів асинхронних двигунів на етапі, який передуює безпосередньо дослідженням, що, в свою чергу, дозволяє сформулювати вимоги до вимірювальних приладів.

Ключові слова: похибки вимірювань, асинхронний електричний двигун, прямі та непрямі вимірювання.

Вступ. На сьогоднішній день трифазні асинхронні двигуни широко розповсюджені в різних галузях промисловості, де використовуються в електроприводах різних технологічних комплексів [1, 2]. Це обумовлено їх простотою, хорошими масо-габаритними показниками, невеликою вартістю та простотою їх обслуговування [3, 4]. Для забезпечення ефективного використання асинхронних двигунів у складі регульованих електроприводів необхідним є отримання інформації про параметри їх схем заміщення [5-7]. Специфічною особливістю, пов'язаною з визначенням параметрів, є те, що схема заміщення асинхронного двигуна сама по собі є певною ідеалізацією, що призводить до неточності у визначенні величин параметрів [8, 9]. Існують різні методи визначення параметрів асинхронних машин, застосування яких передбачає створення заданих умов та використання відповідного обладнання [10-13]. В Україні цими пита-

нями займалися такі вчені, як С. М. Пересада, С. М. Ковбаса, Д. Й. Родькін, О. П. Чорний та інші [14, 15]. Варто відзначити, що основну увагу в їх дослідженнях було приділено питанням отримання значень параметрів для керування електричними двигунами та моніторингу їх стану.

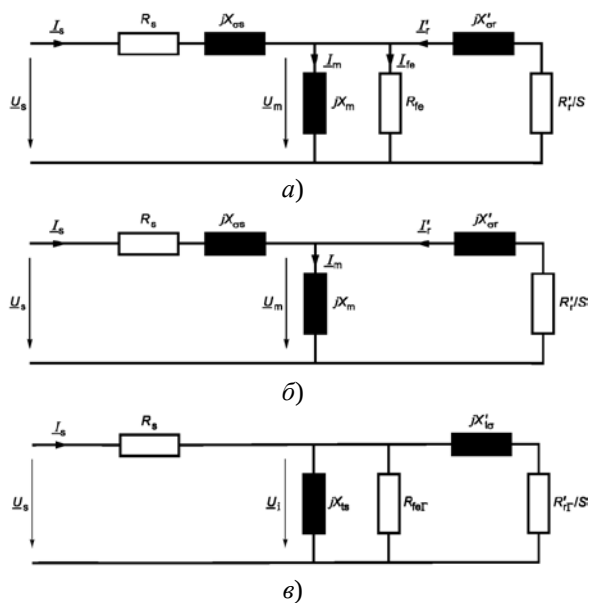
Базовим підходом до визначення параметрів є використання методик, наведених у міжнародному стандарті ІЕС 60034-28:2013 [16]. Цей стандарт визначає вимоги до проведення дослідів та процедури математичної обробки їх результатів для розрахунку параметрів схем заміщення асинхронного двигуна. Одночасно з цим основним недоліком застосування визначених стандартом методик є відсутність урахування впливу метрологічних характеристик вимірювального обладнання на точність визначення параметрів.

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є визначення методики оцінки парамет-

рів схем заміщення асинхронних двигунів та аналіз впливу похибок вимірювальних приладів на точність визначення параметрів. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі: визначити процедуру експериментальних випробувань та алгоритм математичної обробки вимірних даних, вивести аналітичні залежності похибок визначення параметрів та проаналізувати вплив метрологічних характеристик вимірювальних приладів на точність оцінки параметрів.

Основний матеріал

Експериментальні випробування асинхронних двигунів. Стандарт ІЕС 60034-28:2013 визначає експериментальні методи оцінки параметрів однофазних схем заміщення асинхронної машини. Нормативною є Т-подібна схема (рисунк 1, а). До її складу входять такі параметри: опори статора та ротора, індуктивність кола намагнічування, індуктивності розсіювання статора та ротора, еквівалентний опір втрат у сталі. Спрощена схема заміщення, в якій не враховуються втрати енергії в сталі (рисунк 1, б), використовується для визначення індуктивностей. Математично Т-подібна схема заміщення може бути перетворена на Г-подібну схему (рисунк 1, в). Використання різних схем заміщення дозволяє спростити визначення тих чи інших параметрів залежно від того, які досліді були проведені.



а) Т-подібна схема, б) спрощена Т-подібна схема, в) Г-подібна схема

Рисунок 1 – Схеми заміщення фази асинхронної електричної машини

Загалом стандарт визначає такі види експериментальних дослідів електричних машин: безпосереднє вимірювання опору статора на постійному струмі, дослідження на холостому ході, дослідження при навантаженні, дослідження при реверсі та дослідження при загальмованому роторі. Однак виконання всіх цих дослідів для оцінювання параметрів двигуна не є обов'язковим. Існують два підходи до розрахунку значень параметрів: перший ґрунтується на дослідженнях при холостому ході та при навантаженні, а другий – на дослідженнях при холостому ході, реверсі та загальмованому роторі. В зв'язку з тим, що перший підхід дає кращі результати, обмежимося розглядом саме цього підходу.

Для проведення зазначених експериментальних випробувань як навантаження для досліджуваного асинхронного двигуна доцільно використати іншу електричну машину з незалежним керуванням (наприклад постійного струму), яка працюватиме в генераторному режимі. Це дозволяє при дослідженні на холостому ході компенсувати механічні втрати тертя та вентиляційні втрати, що забезпечує майже ідеальний холостий хід, а при дослідженні з навантаженням легко задавати будь-яке значення навантаження. Для живлення досліджуваного двигуна варто використати перетворювач частоти, що дозволить проводити дослідження при різних значеннях напруги та різних частотах, що необхідно для отримання частотних залежностей оцінюваних параметрів.

Стандарт визначає вимоги до класу точності засобів вимірювання та процедури проведення досліджень. Відповідно до цих вимог значення опорів, струмів та напруг має розраховуватись як середнє арифметичне трьох фазних або міжфазних вимірюваних значень. Крім того, вимірювання струмів, напруг, потужності та частоти обертання необхідно проводити в усталених режимах, а для уникнення впливу можливих коливань навантаження як остаточні значення необхідно взяти середні значення декількох вимірів, зроблених через невеликий інтервал часу.

Дослідження можуть проводитись у будь-якому порядку, але при цьому має бути забезпечений температурний режим роботи відповідно до стандарту ІЕС 60034-1:2010.

Спочатку вимірюється міжфазний опір статора ($R_{||m}$) на постійному струмі, за допомогою омметра з класом точності, не нижчим

за 0,1. При вимірюванні температура обмотки не повинна відрізнятися від температури навколишнього середовища більш ніж на 2 °С. Паралельно з цим необхідним є вимірювання температури за допомогою вимірювачів, похибка яких не повинна перевищувати 1 °С. Інформація про вимірювану температуру використовується надалі для уточнення значень активних опорів, які можуть змінюватися при роботі електродвигуна.

Після цього проводяться дослідження при навантаженні та на холостому ході. Послідовність цих дослідів є довільною, але зазвичай спочатку проводять досліді при навантаженні. В загальному випадку для аналізу зміни величин параметрів ці досліді проводять при навантаженні, що змінюється в діапазоні від 25 % до 125 % від номінального навантаження, але найчастіше використовуються значення параметрів електричних машин при номінальному навантаженні. Враховуючи те, що обробка результатів вимірювань не залежить від величини навантаження, в цій роботі обмежимося розглядом лише номінального режиму роботи. В цьому досліді здійснюється вимірювання напруги на клеммах статора (U_N) та лінійного струму статора (I_N) за допомогою вимірювальних трансформаторів, клас точності яких повинен бути не нижчим 0,2, а вимірювання електричної потужності на вході (P_N) та частоти обертання (n) за допомогою ватметра і тахометра відповідно, клас точності яких повинен бути не нижчим 0,5. Паралельно здійснюється вимірювання температури.

Дослідження на холостому ході здійснюється при підтримуванні навантажувальною електричною машиною синхронної швидкості обертання. При цьому напруга статора може змінюватися в діапазоні від 20 % до 110 % від номінального значення. Кількість точок і конкретний діапазон вимірювання залежать від того, чи є необхідність визначати параметри в усьому діапазоні навантажень, чи лише в деякому. При визначенні параметрів лише для номінального режиму необхідно зробити декілька вимірів таким чином, щоб напруга кола намагнічування відповідала значенням, характерним для номінального режиму. Під час досліджень вимірюються напруга, струм статора, споживана двигуном потужність і температура обмотки. Вимоги щодо класу точності вимірювальних приладів є

такими самими, як і при дослідженні під навантаженням.

Частота напруги статора під час випробувань підтримується сталою і рівною номінальній частоті (f_N) з точністю $\pm 0,3$ %. При необхідності визначення частотних залежностей параметрів частота напруги статора може змінюватись, і для кожного значення частоти досліді під навантаженням та при холостому ході проводяться так само.

Математична обробка результатів вимірювання. Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна проводиться в наступному порядку (наведені формули для розрахунку параметрів еквівалентної схеми заміщення двигунів, обмотки яких з'єднані по типу «зірка»):

1. Розрахунок опору обмотки статора, приведеного до температури 25 °С:

$$R_{S,25^\circ\text{C}} = \frac{1}{2} \cdot R_{\parallel m} \cdot \frac{k_s + 25}{k_s + \theta_0}, \quad (1)$$

де $R_{\parallel m}$ – виміряна величина міжфазового опору статора;

k_s – температурний коефіцієнт статора, який визначається залежно від матеріалу обмотки статора;

θ_0 – виміряна температура холодної обмотки.

2. Розрахунок повного лінійного опору при холостому ході:

$$Z_{NL} = \frac{U_{NL}}{I_{NL} \cdot \sqrt{3}}, \quad (2)$$

де U_{NL} – виміряна напруга на клеммах статора при холостому ході;

I_{NL} – виміряний лінійний струм статора при холостому ході.

3. Розрахунок коефіцієнта потужності при холостому ході:

$$\cos \varphi_{NL} = \frac{P_{NL}}{U_{NL} \cdot I_{NL} \cdot \sqrt{3}}, \quad (3)$$

де P_{NL} – виміряна електрична потужність на вході при холостому ході.

4. Розрахунок активного опору статора при холостому ході:

$$R_{NL} = Z_{NL} \cdot \cos \varphi_{NL}. \quad (4)$$

5. Розрахунок сумарного реактивного опору статора:

$$X_{tS} = \sqrt{Z_{NL}^2 - R_{NL}^2}. \quad (5)$$

6. Розрахунок сумарної індуктивності статора:

$$L_{tS} = \frac{X_{tS}}{2 \cdot \pi \cdot f_N}, \quad (6)$$

де f_N – виміряна частота статора, яка має дорівнювати номінальній.

7. Розрахунок внутрішньої напруги машини (контуру намагнічування):

$$U_{i,NL} = \sqrt{\left(\frac{U_{NL}}{\sqrt{3}} - R_{NL} \cdot I_{NL} \cdot \cos \varphi_{NL}\right)^2 + \left(\sqrt{1 - (\cos \varphi_{NL})^2} \cdot R_{NL} \cdot I_{NL}\right)^2}. \quad (7)$$

8. Розрахунок потужності постійних втрат:

$$P_k = P_{NL} - 3 \cdot I_{NL}^2 \cdot R_{S,25^\circ C} \cdot \frac{k_s + \theta_{NL}}{k_s + 25}, \quad (8)$$

де θ_{NL} – виміряна температура обмотки.

9. Розрахунок потужності втрат у сталі має враховувати втрати тертя та вентиляційні втрати, але завдяки використанню як навантаження додаткової електричної машини цими втратами можна знехтувати і тоді отримаємо:

$$P_{fe} = P_k. \quad (9)$$

10. Розрахунок еквівалентного опору втрат у сталі для Г-подібної схеми заміщення:

$$R_{fe\Gamma} = \frac{3 \cdot U_{i,NL}^2}{P_{fe}}. \quad (10)$$

11. Розрахунок коефіцієнта потужності у випробуванні під номінальним навантаженням:

$$\cos \varphi_N = \frac{P_N}{U_N \cdot I_N \cdot \sqrt{3}}, \quad (11)$$

де U_N – виміряна напруга на клеммах статора при номінальному навантаженні;

I_N – виміряний лінійний струм статора при номінальному навантаженні;

P_N – виміряна електрична потужність на вході при номінальному навантаженні.

12. Розрахунок номінальної синхронної частоти обертання:

$$n_{syn} = \frac{60 \cdot f_N}{p}, \quad (12)$$

де p – кількість пар полюсів.

13. Розрахунок величини ковзання:

$$s = \frac{n_{syn} - n}{n_{syn}}, \quad (13)$$

де n – виміряна поточна частота обертання.

14. Розрахунок компонентів струму статора:

$$I_{Sa} = I_N \cdot \cos \varphi_N, \quad (14)$$

$$I_{Sb} = -I_N \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_N}. \quad (15)$$

15. Розрахунок міжфазового опору у випробуванні під навантаженням:

$$R_N = R_{lim} \cdot \frac{k_s + \theta_w}{k_s + \theta_0}, \quad (16)$$

де θ_w – виміряна температура обмотки при номінальному навантаженні.

16. Розрахунок внутрішньої напруги машини:

$$U_{ia} = \frac{U_N}{\sqrt{3}} - \frac{R_N}{2} \cdot I_{Sa}, \quad (17)$$

$$U_{ib} = -\frac{R_N}{2} \cdot I_{Sb}, \quad (18)$$

$$U_i = \sqrt{U_{ia}^2 + U_{ib}^2}. \quad (19)$$

17. Для подальшого розрахунку з досліду холостого ходу необхідно визначити значення сумарної індуктивності статора (L_{tSN}), що відповідає номінальному режиму. У випадку, якщо значення U_i не дорівнює значенню $U_{i,NL}$, яке було отримано з досліду холостого ходу, значення L_{tSN} може бути розраховано шляхом лінійної інтерполяції між двома сусідніми точками на характеристиці отриманої з досліду холостого ходу.

18. Розрахунок сумарного реактивного опору статора:

$$X_{tS} = 2 \cdot \pi \cdot f_N \cdot L_{tSN}. \quad (20)$$

19. Розрахунок приведенного опору втрат у сталі:

$$R'_{fe\Gamma} = R_{fe\Gamma} \cdot \frac{U_i^2}{U_{i,NL}^2}. \quad (21)$$

20. Розрахунок компонентів струму намагнічування:

$$I_{ma} = U_{ia} \cdot \frac{1}{R'_{fe\Gamma}} + U_{ib} \cdot \frac{1}{X_{ts}}, \quad (22)$$

$$I_{mb} = U_{ib} \cdot \frac{1}{R'_{fe\Gamma}} - U_{ia} \cdot \frac{1}{X_{ts}}. \quad (23)$$

21. Розрахунок опору ротора:

$$X'_{t\sigma} = \frac{U_{ib} \cdot (I_{Sa} - I_{ma}) - U_{ia} \cdot (I_{Sb} - I_{mb})}{(I_{Sa} - I_{ma})^2 + (I_{Sb} - I_{mb})^2}. \quad (24)$$

22. Розрахунок індуктивності розсіювання ротора:

$$L'_{t\sigma} = \frac{X'_{t\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_N}. \quad (25)$$

23. Розрахунок значення сумарної індуктивності розсіювання, перетвореного до Г-подібної схеми заміщення:

$$L_{t\sigma} = L'_{t\sigma} \cdot \frac{L_{tSN}}{L_{tSN} + L'_{t\sigma}}. \quad (26)$$

24. Розрахунок індуктивності намагнічування, індуктивності статора, індуктивності ротора:

$$L_m = L_{tSN} - \frac{L_{t\sigma}}{1 + \frac{1}{k_\sigma}}, \quad (27)$$

$$L_{\sigma S} = L_{tSN} - L_m, \quad (28)$$

$$L'_{\sigma r} = L_{t\sigma} - L_{\sigma S}. \quad (29)$$

де k_σ – відношення індуктивності розсіювання статора до індуктивності розсіювання ротора, яке при відсутності проектних даних двигуна для спеціальних машин (з подвійною білячою кліткою або глибокопазовим ротором) приймається як $k_\sigma = 0,67$, або ж для звичайних машин приймається як $k_\sigma = 1$.

25. Розрахунок реактивних опорів:

$$X'_{\sigma r} = 2 \cdot \pi \cdot f_N \cdot L'_{\sigma r}, \quad (30)$$

$$X_{\sigma S} = 2 \cdot \pi \cdot f_N \cdot L_{\sigma S}, \quad (31)$$

$$X_m = 2 \cdot \pi \cdot f_N \cdot L_m. \quad (32)$$

26. Розрахунок повного лінійного опору:

$$Z = \frac{U_N}{I_N \cdot \sqrt{3}}. \quad (33)$$

27. Розрахунок лінійного реактивного опору:

$$X = Z \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_N}. \quad (34)$$

28. Розрахунок опору ротора при робочій температурі θ_L :

$$R'_{r,\theta_L} = s \cdot (X'_{\sigma r} + X_m) \times \sqrt{\frac{X_m \cdot X'_{\sigma r}}{X_m + X'_{\sigma r}} - (X - X_{\sigma S})^2} \cdot \frac{1}{X - X_{\sigma S} - X_m}. \quad (35)$$

29. Розрахунок опору ротора при температурі 25 °C:

$$R'_{r,25^\circ C} = R'_{r,\theta_L} \cdot \frac{k_r + 25}{k_r + \theta_L}. \quad (36)$$

30. Розрахунок еквівалентного опору втрат у сталі для Т-подібної схеми заміщення:

$$R_{fe} = R_{fe\Gamma} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{X_{\sigma S}}{X_m}\right)^2}. \quad (37)$$

Результати досліджень

Визначення похибок вимірювання параметрів двигуна. Для розрахунку похибок вимірювань скористаємось підходом, який наведено в [17]. Стандарт лише визначає вимоги до класу точності (γ) вимірювальних приладів, тому при проведенні досліджень необхідно спочатку визначити абсолютну похибку прямих вимірювань. Ця похибка залежатиме від класу точності та нормованого значення межі вимірювань ($X_{норм}$).

Після визначення похибок прямих вимірювань можна розрахувати похибки непрямих вимірювань згідно з (38). Розрахунок похибок непрямих вимірювань будемо здійснювати послідовно в порядку, що відповідає порядку розрахунку значень параметрів схеми заміщення електричної машини.

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{df}{dx_i} \right)^2} \cdot \Delta x_i^2, \quad (38)$$

де x_i – виміряна величина;

Δx_i – абсолютна похибка величини.

Отримані аналітичні вирази для розрахунку похибок вимірювання наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Аналітичні вирази для розрахунку абсолютних похибок вимірювання параметрів схем заміщення асинхронного двигуна

Параметр	Абсолютна похибка
Похибки прямих вимірювань	
Міжфазовий опір статора	$\Delta R_{\parallel m} = \frac{\gamma \cdot R_{\text{норм}}}{100}$, де γ не менше ніж 0,1
Температура обмотки	$\Delta \theta = 1^\circ \text{C}$
Напруга на клеммах статора	$\Delta U = \frac{\gamma \cdot U_{\text{норм}}}{100}$, де γ не менше ніж 0,2
Лінійний струм статора	$\Delta I = \frac{\gamma \cdot I_{\text{норм}}}{100}$, де γ не менше ніж 0,2
Електрична потужність на вході	$\Delta P = \frac{\gamma \cdot P_{\text{норм}}}{100}$, де γ не менше ніж 0,5
Поточна частота обертання	$\Delta n = \frac{\gamma \cdot n_{\text{норм}}}{100}$, де γ не менше ніж 0,5
Номінальна частота	$\Delta f_N = \frac{0,3}{100} \cdot f_N$
Похибки непрямих вимірювань	
Опір обмотки статора, (1)	$\Delta R_{S, 25^\circ \text{C}} = \frac{k_s + 25}{2 \cdot (k_s + \theta_0)} \sqrt{\Delta R_{\parallel m}^2 + \left(\frac{R_{\parallel m}}{k_s + \theta_0} \right)^2 \cdot \Delta \theta^2}$
Повний лінійний опір, (2)	$\Delta Z_{NL} = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot I_{NL}} \sqrt{\Delta U^2 + \left(\frac{U_{NL}}{I_{NL}} \right)^2 \cdot \Delta I^2}$
Коефіцієнт потужності у випробуванні на холостому ході, (3)	$\Delta \cos \varphi_{NL} = \frac{\sqrt{3}}{3 \cdot U_{NL} \cdot I_{NL}} \sqrt{\Delta P^2 + \left(\frac{P_{NL}}{U_{NL}} \right)^2 \cdot \Delta U^2 + \left(\frac{P_{NL}}{I_{NL}} \right)^2 \cdot \Delta I^2}$
Активний опір статора, (4)	$\Delta R_{NL} = \sqrt{\cos^2 \varphi_{NL} \cdot \Delta Z_{NL}^2 + Z_{NL}^2 \cdot \Delta \cos^2 \varphi_{NL}}$
Сумарний реактивний опір статора, (5)	$\Delta X_{tS} = \frac{1}{\sqrt{Z_{NL}^2 - R_{NL}^2}} \sqrt{(Z_{NL})^2 \cdot \Delta Z_{NL}^2 + (R_{NL})^2 \cdot \Delta R_{NL}^2}$
Сумарна індуктивність статора, (6)	$\Delta L_{tS} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_N} \sqrt{\Delta X_{tS}^2 + \left(\frac{X_{tS}}{f_N} \right)^2 \cdot \Delta f_N^2}$
Внутрішня напруга машини (контуру намагнічування), (7)	$\Delta U_{i,NL} = \frac{\sqrt{\left(U_{NL} - \sqrt{3} \cdot I_{NL} \cdot R_{NL} \cdot \cos \varphi_{NL} \right)^2 \cdot \Delta U^2 + \left(3 \cdot I_{NL}^2 \cdot R_{NL} - \sqrt{3} \cdot I_{NL} \cdot U_{NL} \cdot \cos \varphi_{NL} \right)^2 \cdot \Delta R_{NL}^2 + \left(3 \cdot I_{NL} \cdot R_{NL}^2 - \sqrt{3} \cdot R_{NL} \cdot U_{NL} \cdot \cos \varphi_{NL} \right)^2 \cdot \Delta I^2 + \left(\sqrt{3} \cdot I_{NL} \cdot R_{NL} \cdot U_{NL} \right)^2 \cdot \Delta \cos^2 \varphi_{NL}}}{3 \cdot \sqrt{I_{NL}^2 \cdot R_{NL}^2 - 2 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot U_{NL} \cdot I_{NL} \cdot R_{NL} \cdot \cos \varphi_{NL}}{3} + \frac{U_{NL}^2}{3}}}$

Продовження таблиці 1

Параметр	Абсолютна похибка
Постійні втрати, (8)	$\Delta P_k = \sqrt{\Delta P^2 + \left(\frac{6 \cdot I_{NL} \cdot R_{S,25^\circ C} \cdot (k_s + \theta_{NL})}{k_s + 25} \right)^2 \cdot \Delta I^2 + \left(\frac{3 \cdot I_{NL}^2 \cdot (k_s + \theta_{NL})}{k_s + 25} \right)^2 \cdot \Delta R_{S,25^\circ C}^2 + \left(\frac{3 \cdot I_{NL}^2 \cdot R_{S,25^\circ C}}{k_s + 25} \right)^2 \cdot \Delta \theta^2}$
Втрати в сталі, (9)	$\Delta P_{fe} = \Delta P_k$
Еквівалентний опір втрат у сталі для Г-подібної схеми заміщення, (10)	$\Delta R_{fe\Gamma} = \frac{3 \cdot U_{i,NL}}{P_{fe}} \sqrt{4 \cdot \Delta U_{i,NL}^2 + \left(\frac{U_{i,NL}}{P_{fe}} \right)^2 \cdot \Delta P_{fe}^2}$
Коефіцієнт потужності у випробуванні на номінальному навантаженні, (11)	$\Delta \cos \varphi_N = \frac{\sqrt{\Delta P^2 + \left(\frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot U_N} \right)^2 \cdot \Delta U^2 + \left(\frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot I_N} \right)^2 \cdot \Delta I^2}}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N}$
Номінальна синхронна частота обертання, (12)	$\Delta n_{syn} = \frac{60}{p} \cdot \Delta f_N$
Величина ковзання, (13)	$\Delta s = \frac{1}{n_{syn}} \sqrt{\left(\frac{n}{n_{syn}} \right)^2 \cdot \Delta n_{syn}^2 + \Delta n^2}$
Компонент струму, (14)	$\Delta I_{Sa} = \sqrt{(\cos \varphi_N)^2 \cdot \Delta I^2 + (I_N)^2 \cdot \Delta \cos \varphi_N^2}$
Компонент струму, (15)	$\Delta I_{Sb} = \sqrt{(1 - \cos \varphi_N^2) \cdot \Delta I^2 + \left(\frac{I_N \cdot \cos \varphi_N}{\sqrt{1 - \cos \varphi_N^2}} \right)^2 \cdot \Delta \cos \varphi_N^2}$
Міжфазовий опір, (16)	$\Delta R_N = \frac{k_s + \theta_w}{k_s + \theta_0} \sqrt{\Delta R_{lm}^2 + \left(\frac{R_{lm}}{k_s + \theta_0} \right)^2 + \left(\frac{R_{lm}}{k_s + \theta_w} \right)^2} \cdot \Delta \theta^2$
Компонент внутрішньої напруги машини, (17)	$\Delta U_{ia} = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \Delta U^2 + \left(\frac{I_{Sa}}{2} \right)^2 \cdot \Delta R_N^2 + \left(\frac{R_N}{2} \right)^2 \cdot \Delta I_{Sa}^2}$
Компонент внутрішньої напруги машини, (18)	$\Delta U_{ib} = \sqrt{\left(\frac{I_{Sb}}{2} \right)^2 \cdot \Delta R_N^2 + \left(\frac{R_N}{2} \right)^2 \cdot \Delta I_{Sb}^2}$
Внутрішня напруга машини, (19)	$\Delta U_i = \frac{\sqrt{U_{ia}^2 \cdot \Delta U_{ia}^2 + U_{ib}^2 \cdot \Delta U_{ib}^2}}{\sqrt{U_{ia}^2 + U_{ib}^2}}$
Сумарний реактивний опір статора, (20)	$\Delta X_{tS} = \sqrt{(2 \cdot \pi \cdot L_{tSN})^2 \cdot \Delta f_N^2 + (2 \cdot \pi \cdot f_N)^2 \cdot \Delta L_{tSN}^2}$
Приведений опір втрат у сталі, (21)	$\Delta R'_{fe\Gamma} = \frac{U_i^2}{U_{i,NL}^2} \sqrt{\Delta R_{fe\Gamma}^2 + \left(\frac{2 \cdot R_{fe\Gamma}}{U_i} \right)^2 \cdot \Delta U_i^2 + \left(\frac{2}{U_{i,NL}} \right)^2 \cdot \Delta U_{i,NL}^2}$

Продовження таблиці 1

Параметр	Абсолютна похибка
Компонент струму намагнічування, (22)	$\Delta I_{ma} = \sqrt{\left(\frac{1}{R'_{fe\Gamma}}\right)^2 \cdot \Delta U_{ia}^2 + \left(\frac{U_{ia}}{R'_{fe\Gamma}}\right)^2 \cdot \Delta R_{fe\Gamma}^2 + \left(\frac{1}{X_{ts}}\right)^2 \cdot \Delta U_{ib}^2 + \left(\frac{U_{ib}}{X_{ts}}\right)^2 \cdot \Delta X_{ts}^2}$
Компонент струму намагнічування, (23)	$\Delta I_{mb} = \sqrt{\left(\frac{1}{X_{ts}}\right)^2 \cdot \Delta U_{ia}^2 + \left(\frac{U_{ib}}{R'_{fe\Gamma}}\right)^2 \cdot \Delta R_{fe\Gamma}^2 + \left(\frac{1}{R'_{fe\Gamma}}\right)^2 \cdot \Delta U_{ib}^2 + \left(\frac{U_{ia}}{X_{ts}}\right)^2 \cdot \Delta X_{ts}^2}$
Опір ротора, (24)	$\Delta X'_{t\sigma} = \frac{\sqrt{b_1^2 \cdot \Delta U_{ia}^2 + a_1^2 \cdot \Delta U_{ib}^2 + \left(U_{ib} + \frac{2 \cdot a_1 \cdot (U_{ia} \cdot b_1 - U_{ib} \cdot a_1)}{a_1^2 + b_1^2}\right)^2 \cdot \Delta I_{Sa}^2 + \left(U_{ia} + \frac{2 \cdot b_1 \cdot (U_{ia} \cdot b_1 - U_{ib} \cdot a_1)}{a_1^2 + b_1^2}\right)^2 \cdot \Delta I_{Sb}^2 + \left(\frac{2 \cdot a_1 \cdot (U_{ib} \cdot a_1 - U_{ia} \cdot b_1)}{a_1^2 + b_1^2} - U_{ib}\right)^2 \cdot \Delta I_{ma}^2 + \left(U_{ia} + \frac{2 \cdot b_1 \cdot (U_{ib} \cdot a_1 - U_{ia} \cdot b_1)}{a_1^2 + b_1^2}\right)^2 \cdot \Delta I_{mb}^2}}{a_1^2 + b_1^2}$ де $a_1 = I_{Sa} - I_{ma}$, $b_1 = I_{Sb} - I_{mb}$
Індуктивність розсіювання ротора, (25)	$\Delta L'_{t\sigma} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_N} \sqrt{\Delta X_{t\sigma}'^2 + \left(\frac{X'_{t\sigma}}{f_N}\right)^2 \cdot \Delta f_N^2}$
Сумарна індуктивність розсіювання, перетворена на Г-подібну схему заміщення, (26)	$\Delta L_{t\sigma} = \frac{\sqrt{\left(L_{tSN}'^2\right)^2 \cdot \Delta L_{t\sigma}'^2 + \left(L_{t\sigma}'^2\right)^2 \cdot \Delta L_{tSN}^2}}{\left(L_{t\sigma}' + L_{tSN}\right)^2}$
Індуктивність намагнічування, (27)	$\Delta L_m = \sqrt{\Delta L_{tSN}^2 + \left(\frac{k_\sigma}{1 + k_\sigma}\right)^2 \cdot \Delta L_{t\sigma}^2}$
Індуктивність статора, (28)	$\Delta L_{\sigma S} = \sqrt{\Delta L_{tSN}^2 + \Delta L_m^2}$
Індуктивність ротора, (29)	$\Delta L'_{\sigma r} = \sqrt{\Delta L_{t\sigma}^2 + \Delta L_{\sigma S}^2}$
Реактивний опір ротора, (30)	$\Delta X'_{\sigma r} = \sqrt{\left(2 \cdot \pi \cdot L'_{\sigma r}\right)^2 \cdot \Delta f_N^2 + \left(2 \cdot \pi \cdot f_N\right)^2 \cdot \Delta L_{\sigma r}'^2}$

Закінчення таблиці 1

Параметр	Абсолютна похибка
Реактивний опір статора, (31)	$\Delta X_{\sigma s} = \sqrt{(2 \cdot \pi \cdot L_{\sigma s})^2 \cdot \Delta f_N^2 + (2 \cdot \pi \cdot f_N)^2 \cdot \Delta L_{\sigma s}^2}$
Реактивний опір намагнічування, (32)	$\Delta X_m = \sqrt{(2 \cdot \pi \cdot L_m)^2 \cdot \Delta f_N^2 + (2 \cdot \pi \cdot f_N)^2 \cdot \Delta L_m^2}$
Повний лінійний опір, (33)	$\Delta Z = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{3}}{3 \cdot I_N}\right)^2 \cdot \Delta U^2 + \left(\frac{\sqrt{3} \cdot U_N}{3 \cdot I_N^2}\right)^2 \cdot \Delta I^2}$
Лінійний реактивний опір, (34)	$\Delta X = \sqrt{\left(\sqrt{1 - \cos \varphi_N^2}\right) \cdot \Delta Z^2 + \left(\frac{Z \cdot \cos \varphi_N}{\sqrt{1 - \cos \varphi_N^2}}\right)^2 \cdot \Delta \cos \varphi_N^2}$
Опір ротора, (35)	$\Delta R'_{r, \theta_L} = \frac{\sqrt{\left(\frac{a_5}{b_5} \cdot (X_m + X'_{\sigma r})\right)^2 \cdot \Delta s^2 + \left(\frac{s}{2} \cdot \left(\frac{a_5}{b_5} - X_m - X'_{\sigma r}\right)\right)^2 \cdot \Delta X_{\sigma r}'^2 + \left(\frac{s}{2} \cdot \left(\frac{a_5}{b_5} + \frac{a_5 + (X'_{\sigma r} - X + X_{\sigma s}) \cdot b_5}{b_5^2} \cdot (X_m + X'_{\sigma r})\right)\right)^2 \cdot \Delta X_m^2 + \left(\frac{s}{2} \cdot \left(\frac{a_5}{b_5^2} \cdot (X_m + X'_{\sigma r}) + \frac{(X_m + X'_{\sigma r})^2}{b_5}\right)\right)^2 \cdot (\Delta X^2 + \Delta X_{\sigma s}^2)}}{\sqrt{\frac{a_5}{b_5} \cdot (X_m + X'_{\sigma r})}}$ $a_5 = X_m \cdot X'_{\sigma r} - (X - X_{\sigma s}) \cdot (X'_{\sigma r} + X_m), b_5 = X - X_{\sigma s} - X_m$
Опір ротора, приведений до стандартної температури, (36)	$\Delta R'_{r, 25^\circ C} = \frac{k_s + 25}{k_s + \theta_L} \sqrt{\Delta R_{r, \theta_L}^2 + \left(\frac{R'_{r, \theta_L}}{k_s + \theta_L}\right)^2 \cdot \Delta \theta^2}$
Еквівалентний опір втрат у сталі для Т-подібної схеми заміщення, (37)	$\Delta R_{fe} = \frac{\sqrt{\Delta R_{fe\Gamma}^2 + \left(\frac{2 \cdot R_{fe\Gamma}}{X_m \cdot \left(1 + \frac{X_{\sigma s}}{X_m}\right)}\right)^2 \cdot \left(\Delta X_{\sigma s}^2 + \left(\frac{X_{\sigma s}}{X_m}\right)^2 \cdot \Delta X_m^2\right)}}{\left(1 + \frac{X_{\sigma s}}{X_m}\right)^2}$

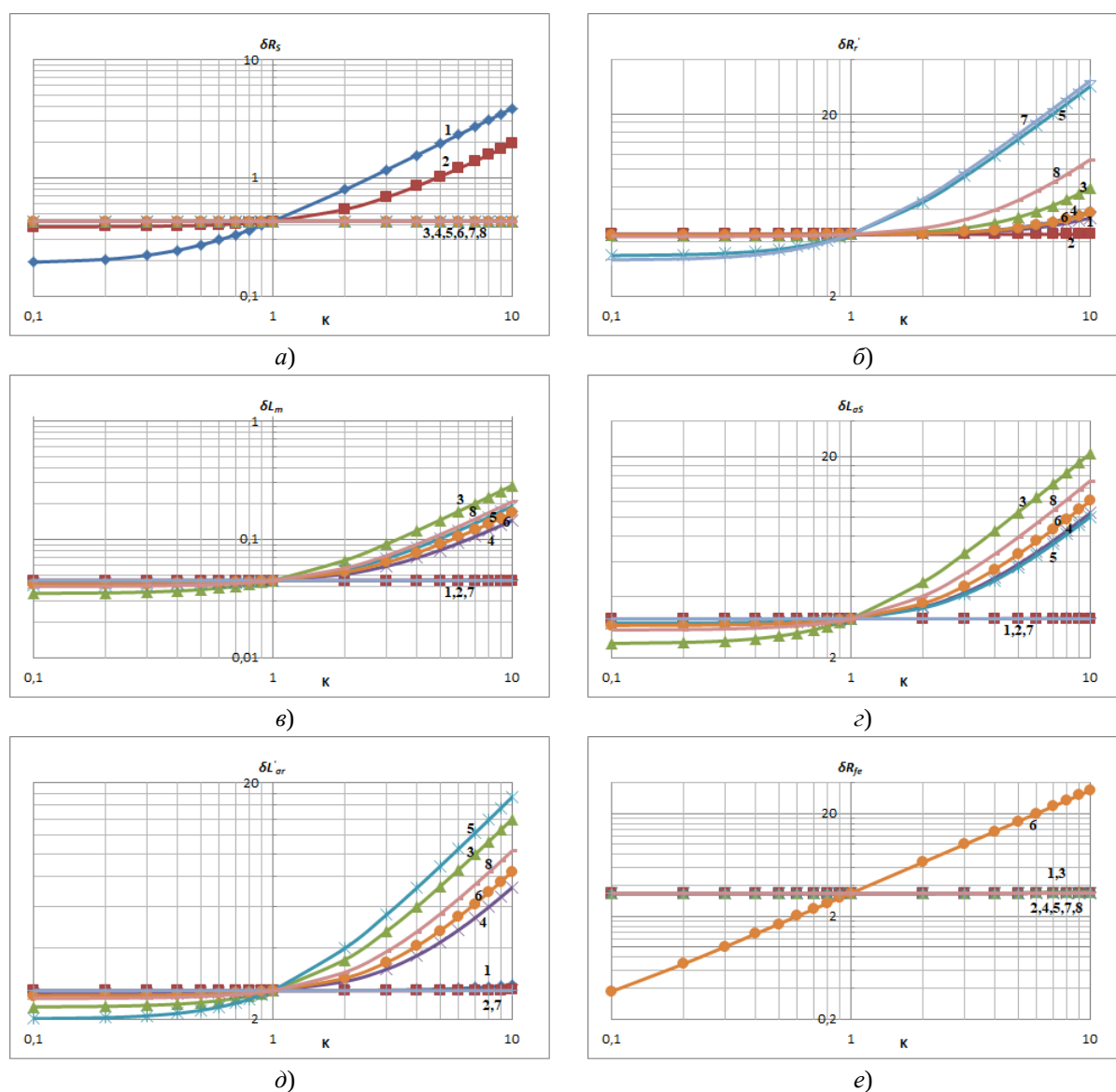
Оцінка впливу похибок прямих вимірювань на точність визначення параметрів двигуна. Послідовний розрахунок з використанням отриманих виразів дає змогу оцінити очікувану похибку визначення параметрів ще на етапі, що передуює безпосередньо дослідженням. Для оцінки впливу похибок вимірюваних приладів були виконані чисельні експерименти з розрахунку значень параметрів та значень похибок для двигуна типу 4A160M4Y3, довідникові параметри якого в

номінальному режимі мають значення: $R_s = 0.264$ Ом, $R_r' = 0.151$ Ом, $L_m = 0.088$ Гн, $L_{\sigma s} = 0.0017$ Гн, $L_{\sigma r}' = 0.0026$ Гн, $R_{fe} = 438$ Ом. В номінальному режимі: фазна напруга $U_n = 220$ В, фазний струм $I_n = 32$ А, потужність $P_n = 19.37$ кВт, частота обертання $n = 1467$ об/хв. В режимі холостого ходу: фазна напруга $U_{xx} = 220$ В, фазний струм $I_{xx} = 7.46$ А, потужність $P_{xx} = 343$ Вт, частота обертання $n_{xx} = 1500$ об/хв.

Враховуючи те, що потужності, споживані двигуном у номінальному режимі та в режимі холостого ходу, різняться в десятки разів, вимірювання цих величин не може здійснюватися з однаковою абсолютною похибкою, що потребує використання або різних вимірювальних приладів, або приладів зі змінюваною шкалою.

Для аналізу впливу зміни похибок вимірювальних приладів на точність визначення параметрів розглянемо базовий випадок, при якому абсолютні похибки прямих вимірювань мають такі значення: $\Delta T = 1^\circ\text{C}$, $\Delta R = 0.001\ \Omega$, $\Delta U = 0.1\ \text{В}$, $\Delta I = 0.001\ \text{А}$, $\Delta P_n = 100\ \text{Вт}$,

$\Delta P_{xx} = 10\ \text{Вт}$, $\Delta n = 1\ \text{об/хв}$, $\Delta f = 0.01\ \text{Гц}$. За цих умов отримаємо абсолютні похибки визначення параметрів двигуна і для зручності розрахуємо їх відносні похибки: $\delta R_s = 0.429\ \%$, $\delta R_r' = 4.369\ \%$, $\delta L_m = 0.045\ \%$, $\delta L_{\sigma s} = 3.116\ \%$, $\delta L_{\sigma r}' = 2.638\ \%$, $\delta R_{fe} = 3.346\ \%$. Далі розглянемо залежності їх зміни, почергово помножуючи кожен з похибок прямих вимірювань на коефіцієнт K , який прийматиме значення в діапазоні від 0.1 до 10. Результати зображено на рисунку 2. На рисунку цифрами позначено залежності, що відповідають зміні похибок прямих вимірювань, таким чином: 1 – ΔT , 2 – ΔR , 3 – ΔU , 4 – ΔI , 5 – ΔP_n , 6 – ΔP_{xx} , 7 – Δn , 8 – Δf .



похибки визначення параметрів: а) δR_s , б) $\delta R_r'$, в) δL_m , г) $\delta L_{\sigma s}$, д) $\delta L_{\sigma r}'$, е) δR_{fe}

Рисунок 2 – Залежність зміни похибок визначення параметрів при зміні похибок вимірювальних приладів

Обговорення результатів. Аналізуючи отримані результати, відзначимо наступне:

- точність визначення індуктивності намагнічування порівняно з іншими параметрами найменше залежить від похибок вимірювальних приладів і практично не залежить від похибок вимірювання опору статора, температури та частоти обертання;
- точність визначення опору обмотки статора залежить лише від похибок вимірювання температури та опору статора і не залежить від вимірювання інших параметрів;
- точність визначення опору, що враховує втрати енергії в сталі двигуна, майже лінійно залежить від похибки вимірювання потужності холостого ходу та майже не залежить від вимірювання інших параметрів;
- точність визначення опору обмотки ротора майже не залежить від похибок вимірювання температури та опору статора, а найбільше залежить від похибок вимірювання частоти обертання та потужності в номінальному режимі;
- точність визначення індуктивностей розсіювання статора та ротора майже не залежить від похибок вимірювання опору статора, температури та частоти обертання, а залежить від вимірювання інших параметрів є співрозмірною.

Висновки. В роботі визначено методику тестових досліджень асинхронних двигунів та порядок опрацювання їх результатів для розрахунку параметрів схем заміщення двигуна в номінальному режимі роботи. Знайдено аналітичні вирази для розрахунку абсолютних похибок оцінювання параметрів і проаналізовано вплив похибок прямих вимірювань на точність визначення параметрів двигуна.

Наукова новизна полягає в отриманні аналітичних залежностей похибок визначення параметрів двигуна та визначенні впливу похибок вимірювальних приладів на кінцеву точність оцінки параметрів двигуна.

Практична цінність полягає в розробці методики оцінки параметрів двигуна, використання якої дає змогу оцінити очікувану точність визначення параметрів до проведення досліджень та сформулювати вимоги до вимірювальних приладів, використання яких дозволить визначати параметри з заданою точністю.

Подальші дослідження варто присвятити оцінці похибок інших методів визначення параметрів електричних двигунів та їх порівняльному аналізу.

Список використаних джерел

- [1] Austin Hughes, *Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications*. Third ed. Elsevier Ltd., 2006.
- [2] М. Г. Попович, О. Ю. Лозинський, В. Б. Клепиков та ін., *Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи*: навч. посіб., М. Г. Попович, О. Ю. Лозинський, Ред. Київ, Україна: Либідь, 2005.
- [3] М. А. Яцун, *Електричні машини*. Львів, Україна: Вид-во Львів. політехніки, 2011.
- [4] М. О. Осташевський, та О. Ю. Юр'єва, *Електричні машини та трансформатори*: навч. посіб., д.т.н., проф. В. І. Міліх, Ред.. Київ, Україна: Каравела, 2018.
- [5] Г. Г. Пивняк, и А. В. Волков, *Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией*. Днепропетровск, Украина: НГУ, 2006.
- [6] М. В. Загірняк, В. Б. Клепиков, С. М. Ковбаса та ін. *Енергоефективні електромеханічні системи широкого технологічного призначення*: монографія. Київ, Україна: Ін-т електродинаміки НАН України, 2018.
- [7] W. Leonhard, *Control of Electrical Drives*. Springer, 2001.
- [8] R. Ramanujam. *Modeling and Analysis of Electrical Machine*. I K International Publishing House, 2018.
- [9] О. П. Чорний, А. В. Луговой, Д. Й. Родькін, Г. Ю. Сисюк, та О. В. Садовой, *Моделювання електромеханічних систем*: підручник. Кременчук, Україна, 2001.
- [10] P. Vas, *Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines*. Oxford, New York: Oxford University Press, 1993.
- [11] J. Tang, Y. Yang, F. Blaabjerg, J. Chen, L. Diao, and Z. Liu, *Parameter Identification of Inverter-Fed Induction Motors: A review*, *Energies*, vol. 11, p. 2194, 2018. doi: 10.3390/en11092194.
- [12] J. J. Guedes, M. F. Castoldi, A. Goedel, C. M. Agulhari, and D. S. Sanches, "Parameters estimation of three-phase induction motors using differential evolution", *Electric Power Systems Research*, vol. 154, pp. 204-212, 2018.
- [13] S. Yang, D. Ding, X. Li, Z. Xie, X. Zhang, and L. Chang, "A novel online parameter estimation method for indirect field oriented

- induction motor drives", *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 32, pp. 1562-1573, 2017.
- [14] С. М. Пересада, С. Н. Ковбаса, и Д. Л. Приступа, "Алгоритм идентификации электрических параметров асинхронного двигателя на основе адаптивного наблюдателя полного порядка: синтез и экспериментальное тестирование", *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*, № 34, с. 27-34, 2013.
- [15] А. П. Черный, Д. И. Родькин А. П. Калинин, и О. С. Воробейчик, *Мониторинг параметров электрических двигателей электромеханических систем*: монография. Кременчуг, Украина: ЧП Щербатых А.В., 2008.
- [16] IEC 60034-28:2013. *Rotating electrical machines - Part 28: Test methods for determining quantities of equivalent circuit diagrams for three-phase low-voltage cage induction motors*.
- [17] В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський, та В. В. Грабко, *Основи метрології та електричних вимірювань*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2012.
- [7] W. Leonhard, *Control of Electrical Drives*. Springer, 2001.
- [8] R. Ramanujam. *Modeling and Analysis of Electrical Machine*. I K International Publishing House, 2018.
- [9] O. P. Chorny, A. V. Luhovoy, D. Y. Rod'kin, H. Yu. Sysyuk, and O. V. Sadovoy, *Modeling of Electromechanical Systems*: textbook. Kremenichuk, Ukraine, 2001 [in Ukrainian].
- [10] P. Vas, *Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines*. Oxford, New York: Oxford University Press, 1993.
- [11] J. Tang, Y. Yang, F. Blaabjerg, J. Chen, L. Diao, and Z. Liu, *Parameter Identification of Inverter-Fed Induction Motors: A review*, *Energies*, vol. 11, p. 2194, 2018. doi: 10.3390/en11092194.
- [12] J. J. Guedes, M. F. Castoldi, A. Goedel, C. M. Agulhari, and D. S. Sanches, "Parameters estimation of three-phase induction motors using differential evolution", *Electric Power Systems Research*, vol. 154, pp. 204-212, 2018.
- [13] S. Yang, D. Ding, X. Li, Z. Xie, X. Zhang, and L. Chang, "A novel online parameter estimation method for indirect field oriented induction motor drives", *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 32, pp. 1562-1573, 2017.
- [14] S. M. Peresada, S. N. Kovbasa, and D. L. Pristupa, "Algorithm for identification of electrical parameters of an induction motor based on a full-order adaptive observer: Synthesis and experimental testing", *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*, no. 34, pp. 27-34, 2013 [in Russian].
- [15] A. P. Chernyy, D. I. Rod'kin A. P. Kalinov, and O. S. Vorobeychik, *Monitoring of Parameters of Electric Motors of Electromechanical Systems*: monograph. Kremenichuk, Ukraine: ChP Shcherbatykh A.V., 2008 [in Russian].
- [16] IEC 60034-28:2013. *Rotating electrical machines - Part 28: Test methods for determining quantities of equivalent circuit diagrams for three-phase low-voltage cage induction motors*.
- [17] V. V. Kukharchuk, V. Yu. Kucheruk, Ye. T. Volodars'kyi, and V. V. Hrabko, *Fundamentals of Metrology and Electrical Measurements*. Vinnytsia, Ukraine: VNTU, 2012 [in Ukrainian].

References

- [1] Austin Hughes, *Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications*. Third ed. Elsevier Ltd., 2006.
- [2] M. G. Popovich, O. Yu. Lozynsky, V. B. Klepikov et al., *Electromechanical Automatic Control Systems and Electric Drives*: textbook. Kyiv, Ukraine: Lybid', 2005 [in Ukrainian].
- [3] M. A. Yatsun, *Electric Machines*. Lviv, Ukraine: Vyd-vo Lviv. politekhniky, 2011 [in Ukrainian].
- [4] M. O. Ostashevs'kyi, and O. Yu. Yurieva, *Electric Machines and Transformers*: textbook, prof. V. I. Milykh, Ed. Kyiv, Ukraine: Karavela, 2018 [in Ukrainian].
- [5] G. G. Pivnyak, and A. V. Volkov, *Modern Frequency-Controlled Asynchronous Electric Drives with Pulse-Width Modulation*. Dnepropetrovsk, Ukraine: NGU, 2006 [in Russian].
- [6] M. V. Zahirnyak, V. B. Klepikov, S. M. Kovbasa et al., *Energy Efficient Electromechanical Systems for a Wide Range of Technological Purposes*: monograph. Kyiv, Ukraine: In-t elektrodynamiky NAN Ukrainy, 2018 [in Ukrainian].

V. D. Zakharchenko¹, Graduate Student,
e-mail: vladyslav.zakharchenko1@gmail.com
M. V. Dobrolyubova², Ph. D., Associate Professor,
e-mail: m.dobrolyubova@kpi.ua
O. V. Statsenko², Ph. D., Associate Professor,
e-mail: o.statsenko@kpi.ua
K. L. Shevchenko², Dr. Sc., Associate Professor
e-mail: k.shevchenko@kpi.ua
¹LLC "REATISS"
Kazimir Malevich st., 15, Kyiv, 02000, Ukraine
²National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
Peremohy ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine

ESTIMATION OF ERRORS IN EXPERIMENTAL STUDY OF INDUCTION MOTOR PARAMETERS

The article is devoted to solving the problem of analyzing the influence of errors of measuring instruments used during standardized tests of induction electric motors on the accuracy of estimating the parameters of substitution schemes of these motors.

Statement of the problem. *To ensure the efficient use of induction motors in adjustable electric drives, it is necessary to obtain information about the parameters of their substitution schemes.*

Analysis of recent research and publications. *There are various methods for estimation of induction motor parameters, the use of which involves the creation of specified conditions and the use of appropriate equipment. But the basic approach is to use the methods given in the international standard IEC 60034-28: 2013. The main disadvantage of these standard methods is the lack of influence of metrological characteristics of measuring equipment on the accuracy of parameter determination.*

The purpose of the article *is to determine the methodology of research and mathematical processing of results for calculating the parameters of substitution schemes of induction motors, as well as to estimate the impact of errors in measuring instruments on the accuracy of parameter determination.*

Results. *In accordance with international standards, the article defines the methodology and sequence of experimental studies of induction motors required to estimate the parameters of substitution schemes in the nominal mode. Also in the article the algorithm of calculation of motor parameters is developed and analytical expressions for calculation of absolute errors of estimation of these parameters are received. The influence of errors of direct measurements on the accuracy of determining the parameters of an induction motor is also analyzed.*

Conclusion. *The obtained results make it possible to determine the requirements for measuring equipment before conducting research of induction motors, which will increase the accuracy of estimating the parameters of induction motors.*

Keywords: *measurement errors, induction motor, direct and indirect measurements.*