

УДК 621.313.072.6:681.518:620.179

DOI: 10.18372/2073-4751.85.21125

Чалий О. В.,
orcid.org/0009-0003-5429-8869,
oleg.chalyi@npp.kai.edu.ua

Сірий Д. Т.,
orcid.org/0009-0005-6262-6257,
dmytro.siryi@npp.nau.edu.ua

МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО- ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Вступ

Електричні машини є невід'ємною складовою сучасних енергетичних і промислових систем, а їхня надійна робота значною мірою визначає ефективність та безпеку технологічних процесів. У процесі експлуатації електродвигуни зазнають впливу електричних, теплових і механічних навантажень, що зумовлює зміну параметрів обмоток, деградацію ізоляції та зростання ймовірності відмов. Тому актуальним є впровадження систем контролю технічного стану, які дозволяють своєчасно виявляти ознаки пошкоджень і прогнозувати ресурс електричних машин. Сучасні системи контролю технічного стану електричних машин базуються на використанні інформаційно-вимірювальних систем (ІВС), які забезпечують збір, передачу та обробку діагностичних параметрів у режимі реального часу [1–3]. До таких параметрів належать струми та напруги, температура обмоток, вібраційні характеристики та магнітні поля. Достовірність діагностичних рішень безпосередньо залежить від точності вимірювань, стабільності метрологічних характеристик вимірювальних каналів і коректності методів обробки вимірювальної інформації.

Недостатній рівень метрологічного забезпечення ІВС призводить до накопичення систематичних і випадкових похибок, що знижує інформативність контролю та може спричинити помилкову оцінку технічного стану електричної машини. [4,5]. У зв'язку з цим виникає необхідність розроблення комплексного підходу до метрологічного забезпечення інформаційно-вимірювальних систем контролю технічного стану електричних машин з урахуванням специфіки вимірюваних параметрів і умов експлуатації.

Мета

Метою статті є розроблення та обґрунтування метрологічного забезпечення інформаційно-вимірювальних систем контролю технічного стану електричних машин шляхом аналізу похибок вимірювань, побудови математичних моделей вимірювальних каналів та оцінювання їх впливу на достовірність діагностичних рішень.

Основна частина

У наукових дослідженнях останніх років значна увага приділяється питанням контролю та діагностування технічного стану електричних машин із використанням інформаційно-вимірювальних систем. У працях [1–3]

розглянуто методи аналізу електричних параметрів, зокрема струмів і напруг, як інформативних ознак для виявлення дефектів обмоток і порушень електромагнітних режимів. Дослідження [4] присвячені вимірюванню температури обмоток і аналізу теплових процесів, що визначають деградацію ізоляції та ресурс електричних машин.

У роботах [5, 6] запропоновано підходи до побудови інформаційно-вимірювальних систем моніторингу, які поєднують вимірювання електричних, теплових і вібраційних параметрів та забезпечують підвищення чутливості діагностики. Водночас у більшості досліджень основна увага зосереджена на алгоритмах обробки сигналів і методах діагностування, тоді як питання метрологічного забезпечення вимірювальних каналів розглядаються фрагментарно.

Аналіз літературних джерел показує, що похибки вимірювань у каналах струму, напруги та температури мають складну структуру і залежать від режимів роботи електричної машини, температурних впливів та електромагнітних завад. Навіть незначні систематичні похибки можуть призводити до істотних відхилень у діагностичних показниках і зниження достовірності оцінювання технічного стану. У зв'язку з цим актуальним є розроблення комплексного підходу до метрологічного забезпечення інформаційно-вимірювальних систем контролю технічного стану електричних машин.

Структура та функції інформаційно-вимірювальної системи.

Інформаційно-вимірювальна система контролю технічного стану електричної машини складається з первинних перетворювачів, вимірювальних каналів, мікропроцесорного блока обробки та

програмного забезпечення. Узагальнений вектор вимірюваних параметрів може бути представлений у вигляді:

$$\mathbf{X}(t) = [I_s(t) \quad U_s(t) \quad T_w(t) \quad v(t)]^T, \quad (1)$$

де I_s — струм статора, U_s — напруга живлення, T_w — температура обмоток, v — вібраційна швидкість.

Результат вимірювання кожного параметра описується співвідношенням:

$$X_i^* = X_i + \Delta X_i, \quad (2)$$

де X_i — істинне значення параметра, ΔX_i — сумарна похибка вимірювання.

Математичний опис похибок вимірювальних каналів.

Сумарна похибка вимірювання формується під впливом систематичних і випадкових складових:

$$\Delta X_i = \Delta X_i^{\text{circr}} + \Delta X_i^{\text{min}}, \quad (3)$$

що є характерним для більшості вимірювальних систем, які застосовуються у діагностиці електричних машин [4].

Для температурних вимірювальних каналів систематична похибка може бути подана у вигляді:

$$\Delta T_{\text{сист}} = k_{\text{др}}(T - T_0) + \Delta T_{\text{нел}}, \quad (4)$$

де $k_{\text{др}}$ — коефіцієнт температурного дрейфу, $\Delta T_{\text{нел}}$ — похибка нелінійності датчика.

Похибка вимірювання струму статора з урахуванням адитивної та мультиплікативної складових описується рівнянням:

$$\Delta I_s = aI_s + b + n(t), \quad (5)$$

де a — коефіцієнт масштабної похибки, b — адитивна похибка, $n(t)$ — випадковий шум.

Оцінювання невизначеності вимірювань.

Оцінювання невизначеності вимірювань є обов'язковою складовою метрологічного забезпечення ІВС відповідно до рекомендацій GUM [4, 5]. Сумарна стандартна невизначеність визначається за законом поширення невизначеностей:

$$u_c(X) = \sqrt{\sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right)^2 u^2(x_j)}, \quad (6)$$

де $f(x_1, \dots, x_m)$ — функціональна залежність вимірюваної величини.

Розширена невизначеність вимірювання визначається як:

$$U = k \cdot u_c(X), \quad (7)$$

де k — коефіцієнт охоплення, що задається з урахуванням довірчої ймовірності.

Вплив похибок вимірювань на діагностичні показники.

Оцінювання технічного стану електричної машини здійснюється на основі діагностичної функції:

$$D = f(I_s, T_w, v), \quad (8)$$

тоді похибка оцінки діагностичного показника становить:

$$\Delta D = \sqrt{\left(\frac{\partial D}{\partial I_s} \Delta I_s \right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial T_w} \Delta T_w \right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial v} \Delta v \right)^2}. \quad (9)$$

Зростання похибки ΔD знижує достовірність діагностики та може призвести до хибних рішень щодо технічного стану електричної машини [1, 6].

Метрологічно обґрунтована модель прогнозування надійності.

Прогнозування надійності електричних машин доцільно здійснювати на основі вимірювальних даних з урахуванням теплових та електричних навантажень [6, 7]. Інтенсивність відмов може бути подана у вигляді:

$$\lambda(t) = \lambda_0 \exp \left[\alpha(T_w - T_0) + \beta \left(\frac{I_s}{I_{ном}} \right)^2 \right], \quad (10)$$

де λ_0 — базова інтенсивність відмов, α, β — коефіцієнти чутливості.

Ймовірність безвідмовної роботи електричної машини:

$$P(t) = \exp \left(- \int_0^t \lambda(\tau) d\tau \right). \quad (11)$$

З урахуванням невизначеності вимірювань прогноз надійності доцільно подавати у вигляді інтервальної оцінки:

$$P(t) \pm \Delta P(t), \quad (12)$$

де $\Delta P(t)$ визначається через похибки вимірювальних каналів.

Висновок

У статті розглянуто метрологічні аспекти забезпечення інформаційно-вимірювальних систем контролю технічного стану електричних машин. Показано, що похибки та невизначеність вимірювань істотно впливають на достовірність діагностичних показників і результати прогнозування надійності. Запропоновано математичні моделі похибок вимірювальних каналів і методику оцінювання невизначеності вимірювань діагностичних параметрів.

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та впровадженні сучасних систем моніторингу електричних машин з підвищеними вимогами до точності, надійності та обґрунтованості прийняття технічних рішень.

Література

1. Vas, P. Condition Monitoring and Diagnostics of Electrical Machines. Springer, 1993.
2. Nandi, S., Toliyat, H. A., Li, X. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors — A review. IEEE Transactions on Energy Conversion. 2005.

3. Widodo, A., Yang, B.-S. Support vector machine in machine condition monitoring and fault diagnosis. Mechanical Systems and Signal Processing. 2007.

4. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM).

5. Bentley, J. P. Principles of Measurement Systems. Pearson Education, 2005.

6. Billinton, R., Allan, R. N. Reliability Evaluation of Engineering Systems. Springer, 1992.

7. Mobley, R. K. An Introduction to Predictive Maintenance. Butterworth-Heinemann, 2002.

Чалий О. В. Сірий Д.Т.

МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН.

У статті розглянуто проблеми метрологічного забезпечення інформаційно-вимірювальних систем контролю технічного стану електричних машин. Проаналізовано основні джерела систематичних і випадкових похибок у вимірювальних каналах струму, напруги та температури обмоток, які впливають на достовірність діагностичних рішень. Розроблено математичні моделі вимірювальних каналів з урахуванням динамічних режимів роботи електричних машин та температурної нестабільності елементів вимірювальної системи. Запропоновано підхід до комплексного оцінювання сумарної похибки інформаційно-вимірювальної системи та її впливу на результати контролю технічного стану. Представлені результати можуть бути використані для підвищення точності діагностування, надійності прийняття рішень та ефективності експлуатації електричних машин у промислових електроприводах.

Ключові слова: інформаційно-вимірювальна система, метрологічне забезпечення, електричні машини, контроль технічного стану, похибка вимірювань, вимірювальний канал, діагностування.

Chalyi O.V., Siryy D.T.

METROLOGICAL SUPPORT OF INFORMATION-MEASUREMENT SYSTEMS FOR MONITORING THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTRICAL MACHINES

The article addresses the issues of metrological support of information-measurement systems used for monitoring the technical condition of electrical machines. The main sources of systematic and random errors in measurement channels of currents, voltages, and winding temperatures are analyzed, as these errors directly affect the reliability of diagnostic decisions. Mathematical models of measurement channels are developed, taking into account dynamic operating modes of electrical machines and thermal instability of measurement system components. A comprehensive approach to evaluating the total measurement error of the information-measurement system and its influence on the accuracy of technical condition assessment is proposed. The obtained results can be applied to improve diagnostic reliability, measurement accuracy, and operational efficiency of electrical machines in industrial electric drive systems.

Keywords: information-measurement system, metrological support, electrical machines, technical condition monitoring, measurement error, measurement channel, diagnostics.

Стаття подана до редакції: 23/03/2026

Стаття прийнята до опублікування: 30/03/2026

Стаття опублікована: 27/04/2026