

Planning/methodology/approach – the study was built using the Analytical Hierarchy Process (AHP) as the basis for pairwise comparisons with consideration of each KPI.

Novelty – a new approach was developed aimed at step-by-step directions for making decisions for the KPI prioritization process. The results of the analysis of this problem highlight the possibility of applying the proposed approach and the calculation process for KPI prioritization.

Research limitations/applicability – Rating scales in the AHP are conceptual; the research was conducted at the departments of expert systems, databases, and computer information technologies

Originality/value – The article presents a new approach to KPI optimization. The proposed approach is a holistic mechanism; it will be able to provide teams with decision-making; it is also able to improve the quality of advanced technological approaches; finally, it provides broad opportunities for future research.

Keywords: Analytical hierarchy method, performance/fitness measurement, integration.

УДК 621.313.333.072.6:621.316.925

DOI: 10.18372/2073-4751.83.20513

Чалий О. В., старший викладач,
orcid.org/0009-0003-5429-8869

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ СИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ШЛЯХОМ МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ ЗБУДЖЕННЯ ТАТЕМПЕРАТУРИ ОБМОТОК

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

e-mail: oleg.chalyi@npp.kai.edu.ua

Вступ

Синхронні електродвигуни є одними з основних елементів сучасних електроприводних систем, що забезпечують стабільну частоту обертання, високу енергоефективність та можливість компенсації реактивної потужності.

Однак експлуатаційна надійність синхронних електродвигунів значною мірою залежить від стабільності параметрів збудження та температурного стану обмоток. Перевищення допустимих температур призводить до прискореного старіння ізоляції, зниження електричної міцності та виникнення міжвиткових коротких замикань. Нестабільність струму збудження, у свою чергу, викликає коливання магнітного потоку, зростання втрат потужності та порушення синхронізму. Такі фактори знижують довговіч-

ність машини і можуть спричинити її передчасний вихід з ладу.

Проблема своєчасного виявлення небезпечних режимів роботи синхронних електродвигунів є особливо актуальною для промислових об'єктів безперервного циклу, де зупинка обладнання призводить до суттєвих економічних втрат. Тому виникає необхідність у впровадженні систем моніторингу параметрів збудження та температури обмоток, які забезпечують контроль стану машини в реальному часі та дозволяють прогнозувати можливі відмови.

Мета

Метою статті є дослідження впливу параметрів збудження та температурного режиму на надійність синхронних електродвигунів, а також обґрунтування доцільності використання моніторингових систем

для підвищення їхньої довговічності та запобігання аварійним відмовам.

Основна частина

У ряді наукових праць розглядаються різні аспекти підвищення ефективності та надійності роботи синхронних електродвигунів. Дослідження [1, 2] присвячені впливу електричних і теплових навантажень на технічний стан обмоток статора та ротора. У роботі [3] наведено підходи до оцінювання температурних полів у машині та визначення критичних зон нагріву, які впливають на ресурс ізоляції.

В інших дослідженнях [4, 5] розроблено математичні моделі процесів збудження синхронних машин, що враховують коливання струму збудження та магнітного потоку. Робота [6] описує методи контролю струму збудження для підтримання стабільності магнітного поля і забезпечення синхронізму. Також у [7] розглядаються системи моніторингу технічного стану електродвигунів на основі аналізу електричних сигналів, температури та вібраційних параметрів.

Разом з тим, залишається недостатньо дослідженим комплексний підхід до одночасного моніторингу параметрів збудження та температурного стану обмоток у процесі експлуатації синхронних машин.

Вплив параметрів збудження на роботу синхронного електродвигуна.

Робота синхронного двигуна визначається рівновагою між електромагнітним моментом M_e та моментом навантаження M_n . Для стаціонарного режиму маємо:

$$M_e = M_n \quad (12)$$

Електромагнітний момент синхронного двигуна може бути виражений через струм збудження I_f , напругу статора U , синхронну реактивність X_s та кут навантаження δ :

$$M_e = \frac{3UE_f}{\omega_s X_s} \sin \delta, \quad (34)$$

де $E_f = k\Phi_f \omega_s$ — ЕРС, наведена в статорі, Φ_f — магнітний потік збудження, ω_s — синхронна кутова швидкість.

З формули 2 видно, що нестабільність струму збудження I_f безпосередньо впливає на електромагнітний момент і стійкість синхронного режиму. Зменшення I_f призводить до зниження E_f , а отже — до зменшення M_e , що може спричинити втрату синхронізму.

Для моніторингу процесу збудження доцільно використовувати похідну струму збудження у часі, що дозволяє виявляти динамічні відхилення:

$$\frac{dI_f}{dt} = \frac{U_f - R_f I_f - E_f}{L_f}, \quad (56)$$

де R_f — опір обмотки збудження, L_f — її індуктивність, U_f — прикладена напруга.

Аналіз виразу показує, що навіть короточасне зменшення U_f або збільшення R_f (наприклад, через нагрів) може спричинити суттєву зміну I_f , що знижує стійкість роботи двигуна.

Температурний режим обмоток і його вплив на надійність. Температура обмоток статора та ротора впливає на електричний опір провідників, ізоляційні властивості та втрати потужності. Залежність опору від температури описується лінійною апроксимацією:

$$R(T) = R_0[1 + \alpha(T - T_0)], \quad (78)$$

де R_0 — опір при температурі T_0 , α — температурний коефіцієнт опору.

Зі зростанням температури зростають втрати P_{Cu} у міді:

$$P_{Cu} = 3I^2 R(T), \quad (910)$$

що, у свою чергу, підвищує температуру, виникає позитивний зворотний зв'язок, який може призвести до теплового пробію.

Для аналізу теплових процесів можна використовувати спрощене рівняння теплового балансу:

$$C \frac{dT}{dt} = P_{Cu} + P_{Fe} - P_{BT}, \quad (1112)$$

де C — теплоємність системи, P_{Fe} — втрати в сталі, P_{BT} — втрати тепла через охолодження.

Стаціонарна температура $T_{ст}$ визначається умовою рівноваги:

$$P_{Cu}(T_{CT}) + P_{Fe}(T_{CT}) = P_{BT}(T_{CT}). \quad 1314()$$

Якщо температура перевищує допустиме значення $T_{дон}$, ймовірність відмови обмотки P_e різко зростає. Цей зв'язок можна апроксимувати експоненційною залежністю типу Арреніуса [8]:

$$P_B(T) = 1 - \exp[-\lambda_0 e^{\beta(T-T_0)} t], \quad 1516()$$

де λ_0 — початкова інтенсивність відмов, β — температурний коефіцієнт деградації.

Комплексна модель оцінювання надійності. З урахуванням одночасного впливу електричних і теплових факторів на стан обмоток, інтенсивність відмов синхронного двигуна можна подати як функцію двох змінних:

$$\lambda(t) = \lambda_0 \left(1 + k_1 \frac{\Delta I_f}{I_{fH}} + k_2 \frac{T - T_{ном}}{T_{ном}} \right), \quad 1718()$$

де k_1, k_2 — емпіричні коефіцієнти впливу збудження та температури.

Тоді ймовірність безвідмовної роботи визначається інтегральним виразом:

$$P(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau\right). \quad 1920()$$

Для стаціонарного режиму, коли $\lambda = const$, формула спрощується:

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad 2122()$$

Використання моніторингу параметрів $I_f(t)$ і $T(t)$ дозволяє в реальному часі коригувати прогноз надійності, своєчасно виявляючи небезпечні тенденції до зниження ресурсу.

Практична реалізація системи моніторингу. Система моніторингу повинна складатися з таких функціональних модулів:

- датчики струму збудження та температури;
- мікроконтролер із блоком аналітичної обробки;
- модуль прогнозування надійності на основі інтегральної моделі $\lambda(t)$;
- система сигналізації при перевищенні граничних параметрів.

Алгоритм роботи системи моніторингу параметрів збудження та температури обмоток синхронного електродвигуна функціонує за принципом безперервного збору, аналізу та корекції параметрів збудження та температурного стану обмоток статора й ротора

1. Початковий етап: ініціалізація та калібрування. На початку роботи система проводить автоматичну ініціалізацію та калібрування вимірювальних каналів:

$$U_f(0), I_f(0), T_s(0), T_r(0), \quad 2324()$$

де U_f — напруга збудження, I_f — струм збудження, T_s і T_r — температури обмоток статора та ротора відповідно.

Після цього формується еталонний вектор параметрів стану:

$$X_0 = [U_{f0}, I_{f0}, T_{s0}, T_{r0}, \omega_0], \quad 2526()$$

який використовується для подальшого порівняння у процесі моніторингу.

2. Блок збору даних. Сенсорна підсистема забезпечує періодичний знім даних із частотою f_s . Отримані параметри записуються у базу короточасної пам'яті для оперативної обробки:

$$X(t_i) = [U_f(t_i), I_f(t_i), T_s(t_i), T_r(t_i), \omega(t_i)]. \quad 2728()$$

Для підвищення достовірності показань застосовується ковзне середнє:

$$\bar{X}(t_i) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(t_i - k\Delta t), \quad 2930()$$

де N — кількість останніх вибірок, Δt — період дискретизації.

3. Обчислення електромагнітного моменту. У режимі реального часу система розраховує фактичне значення електромагнітного моменту:

$$M_e = \frac{3}{\omega_s} \cdot U_f I_f \sin(\delta), \quad 3132()$$

де ω_s — синхронна кутова швидкість, δ — кут навантаження між вектором ЕРС і струмом статора. Порівняння M_e з номінальним моментом $M_{ном}$ дозволяє визначити зміну навантаження та можливу розбалансованість у збудженні.

4. Теплова модель обмоток. Температура обмоток розраховується на основі рівняння теплового балансу:

$$C_t \frac{dT}{dt} = P_{Cu} + P_{Fe} - P_{cool}, \quad 3334()$$

де C_t — теплова ємність, P_{Cu} — втрати у міді (I^2R), P_{Fe} — втрати в сталі, P_{cool} — потужність охолодження.

Дискретизована форма рівняння, яка реалізується мікроконтролером системи моніторингу:

$$T_{k+1} = T_k + \frac{\Delta t}{C_t} (P_{Cu,k} + P_{Fe,k} - P_{cool,k}). \quad 3536()$$

Значення R коригується з урахуванням температурної залежності:

$$R(T) = R_0[1 + \alpha(T - T_0)], \quad 3738()$$

де α — температурний коефіцієнт опору міді.

5. Оцінка стану та інтенсивності відмов. Інтегральний показник надійності розраховується як функція збудження і температури:

$$\lambda(t) = \lambda_0 \exp[k_1(T_s - T_{s0}) + k_2(I_f - I_{f0})], \quad 3940()$$

де λ_0 — початкова інтенсивність відмов, k_1 , k_2 — емпіричні коефіцієнти чутливості. Якщо виконується умова $\lambda(t) > \lambda_{dop}$ то система переходить у режим попередження оператора про передаварійний стан.

6. Система прийняття рішень. Блок аналізу формує сигнали керування на основі нечіткої логіки:

$$R = f(\Delta I_f, \Delta T_s, \Delta T_r), \quad 4142()$$

де вихід R визначає ступінь ризику (нормальний, передаварійний, критичний). Для цього використовуються правила типу:

— Якщо $T_s > T_{s_max}$ і $I_f > I_{f_max}$, тоді R = критичний режим;

— Якщо T_r зростає швидше ніж на $5^\circ\text{C}/\text{хв}$, тоді R = передаварійний режим.

7. Візуалізація та архівація. Усі параметри зберігаються у базі даних для

побудови часових трендів. Візуалізація у вигляді графіків $T_s(t)$, $I_f(t)$, $\lambda(t)$ дозволяє оцінити динаміку стану машини. Додатково формується архів для статистичного аналізу тенденцій деградації.

8. Адаптивне регулювання. У разі виявлення систематичного відхилення збудження система здійснює автоматичне коригування струму збудження:

$$I_{f,new} = I_f + K_p(M_{ref} - M_e), \quad 4344()$$

де K_p — коефіцієнт пропорційного регулятора, M_{ref} — еталонний момент.

Висновок

У результаті проведеного дослідження встановлено, що надійність синхронних електродвигунів істотно залежить від стабільності струму збудження та температурного стану обмоток. Порушення цих параметрів призводить до зниження електромагнітного моменту, перегріву активних частин машини та деградації ізоляції, що значно підвищує ймовірність відмови.

Запропоновано комплексну систему моніторингу, яка здійснює безперервний контроль струму збудження та температури обмоток. Її впровадження забезпечує підвищення надійності електродвигунів за рахунок своєчасного виявлення відхилень параметрів від номінальних значень, можливості прогнозування потенційних відмов, оптимізації режимів охолодження та регулювання збудження.

Література

1. Al Badawi, F. S., Nikiforov, V., Morisi, W. Reliability modelling and assessment of electric motor driven systems. IET Electric Power Applications. 2015, Vol. 9, № 4, pp. 150-157.
2. Chen, M., Li, Y., Wang, Z. Lifetime prediction of permanent magnet synchronous motors under thermal stress. Sensors. 2024, Vol. 24, № 12, Art. 3747.
3. Gherghina, I.-S., Bizon, N., Iana, G.-V., Vasilică, B.-V. Recent Advances in Fault Detection and Analysis of Synchronous Motors: A Review. Machines. 2025, Vol. 13, № 9, Art. 815.

4. Loginov, B. M., et al. Motor Temperature Observer for a Four-Mass Thermal Model. (Open access article) PMC. 2025.

5. Ni, Q., et al. A fault diagnosis and measurement method for synchronous motors based on data-driven framework. Electric Power Systems Research. 2024.

6. Pascual, R., et al. Influence of Temperature on Brushless Synchronous Ma-

chines. Applied Sciences. 2024, Vol. 14, № 17, Art. 8061.

7. Sjölander, J. Non-Invasive Technologies for Condition Monitoring of Synchronous Motors. (Dissertation) 2014.

8. Sun, Z., et al. A public data-set for synchronous motor electrical faults. Data in Brief / Experimental data article. 2023.

Чалий О. В.

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ СИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ШЛЯХОМ МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ ЗБУДЖЕННЯ ТА ТЕМПЕРАТУРИ ОБМОТОК.

У статті розглянуто вплив параметрів збудження та температурного режиму на надійність синхронних електродвигунів. Розроблено аналітичні залежності, що описують зміну електромагнітного моменту залежно від струму збудження, а також температурні моделі, які враховують теплові втрати в обмотках. Запропоновано інтегральну математичну модель для оцінювання інтенсивності відмов електродвигуна з урахуванням одночасного впливу електричних і теплових факторів. Представлено підхід до побудови системи моніторингу, яка забезпечує контроль параметрів збудження та температури в реальному часі з метою своєчасного виявлення передавальних режимів. Отримані результати можуть бути використані для підвищення довговічності, енергоефективності та безвідмовної роботи синхронних машин у промислових електроприводах.

Ключові слова: синхронний електродвигун, надійність, моніторинг, збудження, температура обмоток, інтенсивність відмов, система контролю.

Chalyi O

IMPROVING THE RELIABILITY OF SYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS THROUGH MONITORING OF EXCITATION PARAMETERS AND WINDING TEMPERATURE

The article examines the influence of excitation parameters and thermal conditions on the reliability of synchronous electric motors. Analytical dependencies are developed to describe the variation of the electromagnetic torque as a function of the excitation current, as well as thermal models that take into account heat losses in the windings. An integrated mathematical model is proposed for evaluating the failure rate of the motor, considering the combined effect of electrical and thermal factors. A monitoring system approach is presented, providing real-time control of excitation and temperature parameters to enable timely detection of pre-failure operating modes. The obtained results can be applied to improve the durability, energy efficiency, and fault-free operation of synchronous machines in industrial electric drives.

Keywords: synchronous motor, reliability, monitoring, excitation, winding temperature, failure rate, control system.