

КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИЙ ДІАГНОСТИЧНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН НА НАДІЙНІСТЬ

Розроблено структуру діагностичного комплексу для випробувань електричних машин на надійність, що забезпечує необхідні режими роботи при варіюванні температурних і вібраційних факторів. Запропонований комплекс є уніфікованим та дозволяє враховувати дійсний стан досліджуваної машини, а режими випробувань не порушують фізику процесів старіння і зношування конструктивних вузлів та матеріалів. Бібл. 6, рис. 5.

Ключові слова: електрична машина, надійність, температура, вібраційні фактори.

Разработана структура диагностического комплекса для испытаний электрических машин на надежность, обеспечивающего необходимые режимы работы при варьировании температурных и вибрационных факторов. Предложенный комплекс является унифицированным и позволяет учитывать действительное состояние исследуемой машины, а режимы испытаний не нарушают физики процессов старения и износа конструктивных узлов и материалов. Библ. 6, рис. 5.

Ключевые слова: электрическая машина, надежность, температура, вибрационные факторы.

Вступ. Прогнозування стану електричних машин під час їх виготовлення, ремонту та експлуатації повинно бути невід'ємною частиною технологічного процесу. Впровадження систем такого прогнозування на підприємствах промислово-енергетичного комплексу, залізничного й морського транспорту, ремонтних заводах і т. ін. значною мірою підвищує показники надійності та ефективності використання обладнання.

Невід'ємною складовою процесу прогнозування стану машин є їх випробування на надійність. Особливість таких випробувань полягає у розробці структурної схеми надійності, виявленні основних експлуатаційних факторів, що впливають на надійність роботи електричних машин та кількісній оцінці цих факторів. Як правило до такої схеми входять конструктивні вузли та елементи машин, що формують основні потоки відмов.

Таким чином, для проведення випробувань електричних машин на надійність необхідне обладнання, яке відповідає б вимогам щодо можливості форсування експлуатаційних факторів та не порушує фізику процесів старіння та зношування матеріалів конструкції при урахуванні дійсного стану машини. Під час проведення випробувань на діагностичному комплексі повинні бути враховані критерії та вимоги ГОСТів щодо відповідних випробувань, на які розраховано діагностовані машини. Так, наприклад, при випробуваннях на вібрацію нормується розташування точок вимірювання вібропараметрів, оцінюваний параметр та його межовий рівень за встановленими напрямками (ГОСТ 20815-93). Оцінка теплового стану виконується згідно ГОСТ 11828-86 та ГОСТ 8865-93, що задають умови оцінки нагрівостійкості машини та її ізоляції. У відповідності до стандартів, випробування електричних машин необхідно проводити по можливості безпосередньо у їх номінальних режимах (S1–S8), а при наявності декількох номінальних режимів – у тому з них, при якому перевищення температури є завідомо більшим. Фактично для 70 % електричних машин основним робочим режимом є S1, для якого, у відповідності до ГОСТ 28173-89, є характерною робота машини при незмінному навантаженні тривалий час при досягненні незмінної температури всіх її частин.

Через складність необхідного форсування та неуніфікованість обладнання для випробувань двигунів різних типів та виробників на сьогодні фактично відсутні узагальнені схеми випробувальних систем.

Аналіз результатів попередніх досліджень. Існують окремі результати розробки універсальних діагностичних комплексів для проведення випробувань електричних машин [1, 2]. Діагностичний комплекс, наведений у [1], забезпечує послідовну роботу одного із випробуваних електродвигунів (АД, СД, ДПС) у режимах короткого замикання, неробочого ходу та вільного вибігу. Контрольовані параметри реєструються блоком вимірювання величин, що містить датчики напруги, струму і швидкості, поєднані з аналого-цифровим перетворювачем. Керування режимами вимірювання здійснюється програмно за допомогою ЕОМ та допоміжних контролерів. Комп'ютеризований комплекс для післяремонтних випробувань електричних машин, побудований згідно з [2], являє собою сукупність вимірювальних датчиків струму, напруги, вібрації та температури, інформація з яких надходить через багатоканальний вимірювально-керуючий модуль та оброблюється ЕОМ. Для завдання режимів випробувань до складу комплексу входять основні типи керування перетворювачів для електричних машин постійного та змінного струму. Запропонована структура комп'ютеризованого комплексу дозволяє оцінювати та прогнозувати зміну паспортних даних, робочих параметрів та характеристик електричних машин, обумовлену зміною властивостей конструктивних вузлів внаслідок тривалої експлуатації та ремонту. До недоліків наведених рішень слід віднести:

- неможливість урахування дійсного стану основних конструктивних вузлів;
- неможливість прямого урахування показників надійності через відсутність устаткування для форсування основних факторів впливу;
- неможливість безпосередньої оцінки параметрів вібрації та температури через відсутність відповідного вимірювального обладнання;
- неможливість керування рівнем вібрації електричних машин через відсутність відповідного устаткування;
- неможливість зміни параметрів охолоджуючого середовища з причини відсутності засобів формування теплового потоку заданої направленості та інтенсивності.

Також існує ряд робіт, що доводять суттєву зміну теплових та вібраційних параметрів електричних машин при тривалому напрацюванні на відмову та у процесі ремонту [3, 4]. Зокрема, у роботі [3] показано

високу інформативність діагностичних вібраційних параметрів електричних машин при контролі їх технічного стану в умовах експлуатації. У роботі [4] доведено, що зміна властивостей осердь електротехнічної сталі суттєво впливає на температуру обмотки статора.

З вище сказаного **метою роботи** є розробка діагностичного комплексу, який відповідав би критеріям та вимогам під час проведення випробувань, забезпечував реалізацію основних режимів роботи електричних машин та виконання поставлених задач, необхідних у процесі їх прискорених випробувань на надійність.

Матеріали досліджень. Визначення та прогнозування показників надійності електричних машин передбачає етапи, що пояснюються рис. 1 [5].



Рис. 1. Алгоритм визначення та прогнозування показників надійності електричних машин

Для визначення та прогнозування показників надійності електричних машин у відповідності зі статистичними даними ремонтних підприємств двигуни змінного та постійного струму умовно розбиваються на вузли, що мають найбільшу ймовірність виходу з ладу: обмотка рухомої та нерухомої частин, підшипниковий вузол, колекторно-щітковий вузол для двигунів постійного струму, контактні кільця для синхронних генераторів та асинхронних двигунів з фазним ротором, шихтоване осердя, вал обертової частини, корпус електричної машини.

Проводиться попереднє оцінювання стану кожного конструктивного вузла, що включає в себе виявлен-

ня явних несправностей та відхилень технічних та геометричних параметрів: обмотка перевіряється на цілісність ізоляції та наявність короткозамкнених витків; підшипниковий вузол – на стан підшипника та зношуваність підшипникових щитів, рівень та стан мастила; колекторно-щітковий вузол та контактні кільця – на стан контактних елементів; шихтоване осердя – на наявність коротких замикань між окремими листами та ослаблення пресування; вал обертової частини – на наявність різних видів ексцентриситету; корпус машини – на цілісність місць кріплення (лап або фланців) та додаткового оребрення, стан запресування осердя.

Визначаються контрольовані параметри для основних вузлів досліджуваної електричної машини: для обмотки це температура лобових частин θ_i ; для підшипникового вузла – температура підшипника θ_p та віброшвидкість v_p ; для валу – величина прогину δ_r ; для корпусу – температура θ_k та віброшвидкість v_k ; для колекторно-щіткових вузлів та контактних кілець – ступінь іскріння n_{sch} .

Кількісними характеристиками надійності для обмоток ротора й статора, щіток та підшипників є ймовірності безвідмовної роботи $P(t)$ і відмови $Q(t)$, частота $a(t)$ та інтенсивність відмов $\lambda(t)$. До кількісних характеристик колекторно-щіткових вузлів, пускорегулюючої апаратури, валу роторів відносять параметр потоку відмов $\omega(t)$, середнє напрацювання до першої відмови T_{av} та напрацювання на відмову $\sum t_i$.

Особливістю визначення контрольованих параметрів є зняття складових вібрації у режимі неробочого ходу та після від'єднання досліджуваної електричної машини від джерела живлення з метою виділення її електромагнітної складової. Ступінь іскріння та прогин валу фіксуються фототехнікою. Локальне визначення температури конструктивних вузлів забезпечується відповідним розміщенням термодатчиків.

Як найбільш ефективні фактори форсування, що впливають на надійність конструктивних вузлів, використовуються тепловий і механічний вплив (середня температура охолоджуючого потоку $\Delta\theta_0$, яка комплексно характеризує основні джерела нагріву; віброшвидкість v ; корисне навантаження на валу P_2).

На практиці на різних етапах розвитку дефектів використовують шість основних вібраційних методів дослідження рівня пошкодження вузлів та елементів електричної машини (СКЗ віброшвидкості; аналіз спектру вібросигналу; метод ППК-фактору; аналіз спектру огинаючої вібросигналу; метод ударних імпульсів; спектральний метод ударних імпульсів), що мають свої переваги та недоліки, ступінь достовірності та можливість застосування за заданих умов. Визначальним фактором при виборі методу діагностування є вірогідність отримуваних результатів, можливість визначення зароджуваних дефектів та оцінка поточного стану. Так, для діагностування технічного стану підшипника найбільш інформативним способом є застосування методу ударних імпульсів у комплексі зі спектральним аналізом.

Зазвичай випробування проводяться циклічно, із повторюваними циклами відповідно до плану проведення повного факторного експерименту (у більшості випадків трифакторного типу 2^3).

Залежно від періоду експлуатації електричної машини для розрахунку показників надійності використовується один із основних законів розподілу.

Узагальнені математичні моделі для розрахунку показників надійності електричних машин будуються з урахуванням факторів, що впливають на надійність конструктивних вузлів з наступним об'єднанням отриманих для них залежностей на основі узагальнюючого співвідношення [6]:

$$P_p(t) = \prod_i P_i(t),$$

де $P_i(t)$ – ймовірності безвідмовної роботи основних конструктивних вузлів.

Розроблений пристрій для прискорених випробувань та визначення показників надійності електричних машин дозволяє отримати їх кількісні значення шляхом вимірювання температури доступних конструктивних вузлів, таких як підшипниковий вузол та обмотка статора, а також струмового навантаження і вібрації. Підвищена функціональність пристрою досягається за рахунок контрольованого форсування випробувань шляхом завдання та відпрацювання режимів роботи випробуваних електричних машин при заданих теплових та вібраційних впливах. Структурна схема комп'ютеризованого діагностичного комплексу для випробувань електричних машин на надійність наведена на рис.2.

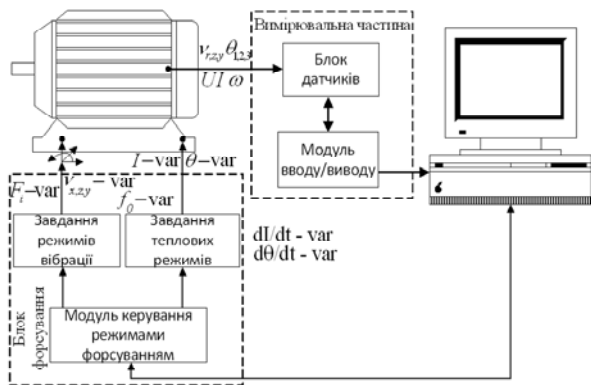


Рис. 2. Структурна схема комп'ютеризованого діагностичного комплексу

Блок форсування при прискорених випробуваннях електричних машин на надійність дозволяє контролювати та змінювати фактори форсування основних конструктивних вузлів, що призводить до зменшення часу випробувань. Структурна схема блоку для завдання факторів впливу представлена на рис. 3 та містить наступні елементи: 1 – кроковий двигун; 2 – пружина з нерегульованим коефіцієнтом жорсткості; 3 – електромагніт; 4 – каркас установки; 5 – кришка столу; 6 – «охоронний циліндр»; 7 – досліджувана машина; 8 – гнучка гофра; 9 – каркас технічного фену; 10 – технічний фен.

Принцип роботи блоку полягає у завданні температури навколишнього середовища, що забезпечується завдяки подачі технічним феном 10 повітряного потоку високої температури через гнучку гофру 8 усередину «охоронного циліндру» 6. Завдання необхідного рівня вібрації реалізується використанням електромагнітів 3, крокових двигунів 1 (для зміни кута нахилу кришки столу) та пружин з нерегульованим коефіцієнтом жорсткості 2.

Блок АЦП має 16 диференціальних каналів аналогового вводу, до яких через інтерфейсні схеми (IC 1-5) можуть бути підключені датчики для вимірювання основних параметрів: змінного струму (ДС), змін-

ної напруги (ДН), вібрації (ДВ). Управління характеристиками ІС здійснюється через канали дискретного вводу/виводу (ДВВ). Окремо до ПЕОМ через перетворювач інтерфейсів (ПІ) підключено датчики температури (ДТ) та надходять сигнали від датчика частоти обертання (ДЧО).

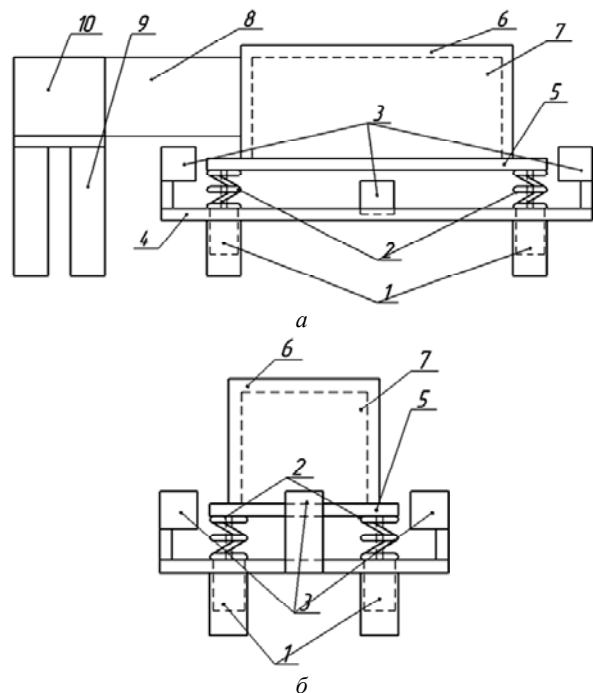


Рис. 3. Зовнішній вид блоку форсування: а – фронтальна проекція ; б – профільна проекція

Вимірювальна частина комплексу, структуру якої представлено на рис. 4, побудована на базі сертифікованого вимірювального модуля LCard E14-440, що містить аналого-цифровий перетворювач (АЦП) і канали ДВВ та підключається до персональної ЕОМ (ПЕОМ).

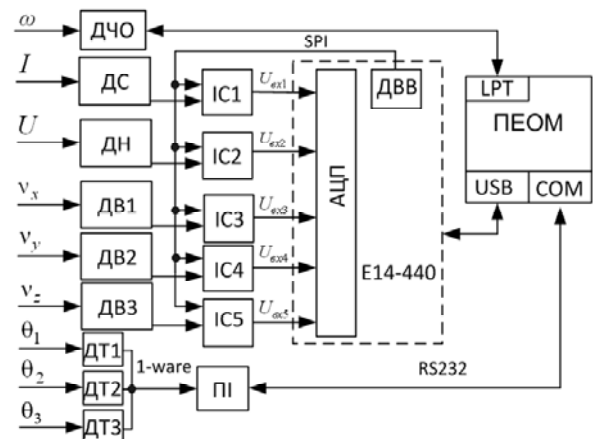


Рис. 4. Структура вимірювального комплексу

Запропонована схема розташування датчиків температури та вібрації (рис. 5) дозволяє підвищити точність вимірювання параметрів за рахунок визначення просторового вектора вібрації та локальних температур конструктивних вузлів. Схема містить наступні позначення: 1 – датчик температури підшипника; 2 – датчик температури навколишнього середовища; 3 – датчик радіальної складової вібрації по осі «у»; 4 – датчик осьової складової вібрації по осі «х»; 5 – датчик радіальної складової вібрації по осі

«з»; 6 – датчик температури обмотки статора; 7 – датчик температури корпусу машини.

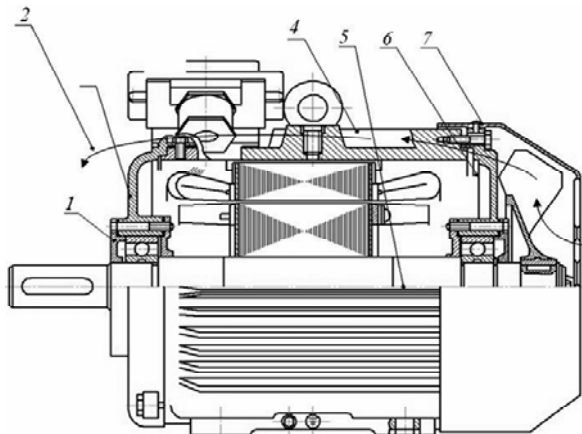


Рис. 5. Схема розміщення датчиків температури та вібрації

Висновки. У результаті досліджень обґрунтовано структуру комп'ютеризованого комплексу для випробувань електричних машин на надійність, що дозволяє, з урахуванням їх дійсного стану, у реальному часі змінювати температурний та вібраційний вплив на електричну машину, не порушуючи фізику процесів старіння та зношування матеріалів її конструктивних вузлів та елементів. Зазначене дає можливість суттєво скоротити час, який витрачається на проведення випробувань на надійність електричних машин, і підвищити вірогідність отримуваних даних у результаті їх проведення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Закладний О.М., Закладний О.О. Універсальний діагностувальний комплекс для прискорених випробувань електродвигунів // Інформаційний збірник «Промислова електроенергетика та електротехніка» Промелектро. – 2007. – №4. – С. 35-39.
2. Прус В.В., Колотило І.А., Угаров А.В. Комп'ютеризований комплекс для післяремонтних випробувань асинхронних двигунів зі зміною властивостей пакетів сталі статорів // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2005. – №3(32). – С. 184-186.
3. Барков А.В., Баркова Н.А., Борисов А.А. Вибрационная диагностика электрических машин в установившихся режимах работы: Методические указания. – Санкт-Петербург: Северо-Западный учебный центр, 2006. – 36 с.
4. Прус В.В., Загирняк М.В., Колотило І.А. Определение максимума температуры обмотки статора отремонтированных асинхронных двигателей // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені М. Остроградського. – 2008. – №3(50), ч.2. – С. 68-72.
5. Пат. 88527 У Україна. МПК G01R 31/34 (2006.1). Спосіб визначення та прогнозування показників надійності електричних машин / О.О. Сьомка, В.В. Прус, – №05385631; Заявлено 12.08.2013; Опубл. 25.03.2014. Бюл. №6. – 4 с.
6. Сьомка А.А. Разработка модели надежности, учитывающей изменение состояния конструктивных узлов электрической машины // 36. наук. праць X Міжн. наук.-техн. конф. молодих учених і спеціалістів. – Кременчук. – 28-29 березня 2012. – С. 358-359.

REFERENCES

1. Zakladnyi O.M., Zakladnyi O.O. Universal diagnostic complex for electric motors rapid test. *Informatsiyni zbirnyk «Promyslova elektroenerhetyka ta elektrotekhnika» Promelektro – Informational collected papers «Promyslova elektroenerhetyka ta elektrotekhnika» Promelektro*, 2007, no.4, pp. 35-39. (Ukr).
2. Prus V.V., Kolotylo I.A., Ugarov A.V. Computer-aided complex for post-repair test of induction motors with change of proper-

ties of stator cores. *Visnyk Kremenchutskoho derzhavnoho politekhnichnoho universytetu – Transactions of Kremenchuk State Polytechnic University*, 2005, no.3(32), pp. 184-186. (Ukr).

3. Barkov A.V., Barkova N.A., Borisov A.A. *Vibracionnaja diagnostika jelektricheskikh mashin v ustanovivshijsja rezhimakh raboty: metodicheskie ukazanija* [Vibration diagnostics of electric machines in steady states of operation: manual]. St. Petersburg, North-West training center Publ., 2006. 36 p. (Rus).

4. Prus V.V., Zagirnyak M.V., Kolotylo I.A. Determination of the maximum temperature of stator winding of repaired induction motors. *Visnyk Kremenchutskoho derzhavnoho politekhnichnoho universytetu – Transactions of Kremenchuk State Polytechnic University*, 2008, no.3(50), part 2, pp. 68-72. (Rus).

5. Somka O.O., Prus V.V. *Sposib vyznachennia ta prohozuvannia pokaznykiv nadiinosti elektrychnykh mashyn* [Method of determination and forecasting of the indices of electric machines reliability]. Patent UA, no.88527, 2014. (Ukr).

6. Somka O.O. Development of reliability model taking into account the change of the state of electric machine structural units. *Zbirnyk naukovykh prats X Mizhn. nauk.-tekhn. konf. molodykh uchenykh i spetsialistiv* [Conf. proceedings of the 10th Int. conf. of students and young researches]. Kremenchuk, 2012, pp. 358-359. (Rus).

Надійшла (received) 30.01.2015

Сьомка Олександр Олександрович¹, аспірант,
Прус Вячеслав Вячеславович¹, к.т.н., доц.,
¹Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського,
39600, Кременчук, вул. Першотравнева, 20,
тел/phone +38 0536 743245, e-mail: oleksandrsmk@gmail.com

O.O. Somka¹, V.V. Prus¹
¹Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University,
20, Pershotravneva Str., Kremenchuk, Poltava region, 39600, Ukraine.

A computerized diagnostic complex for reliability testing of electric machines.

Purpose. To develop a diagnostic complex meeting the criteria and requirements for carrying out accelerated reliability test and realizing the basic modes of electric machines operation and performance of the posed problems necessary in the process of such test. **Methodology.** To determine and forecast the indices of electric machines reliability in accordance with the statistic data of repair plants we have conditionally divided them into structural parts that are most likely to fail. We have preliminarily assessed the state of each of these parts, which includes revelation of faults and deviations of technical and geometric parameters. We have determined the analyzed electric machine controlled parameters used for assessment of quantitative characteristics of reliability of these parts and electric machines on the whole. **Results.** As a result of the research, we have substantiated the structure of a computerized complex for electric machines reliability test. It allows us to change thermal and vibration actions without violation of the physics of the processes of aging and wearing of the basic structural parts and elements material. The above mentioned makes it possible to considerably reduce time spent on carrying out electric machines reliability tests and improve trustworthiness of the data obtained as a result of their performance. **Originality.** A special feature of determination of the controlled parameters consists in removal of vibration components in the idle mode and after disconnection of the analyzed electric machine from the power supply with the aim of singling out the vibration electromagnetic component, fixing the degree of sparking and bend of the shaft by means of phototechnique and local determination of structural parts temperature provided by corresponding location of thermal sensors. **Practical value.** We have offered a scheme of location of thermal and vibration sensors, which allows improvement of parameters measuring accuracy due to determination of the spatial vector of vibration and local temperatures of structural parts. References 6, figures 5.

Key words: electric machine, reliability, temperature, vibration parameters.