



УДК 621.313.322

ТИТКО О.І., чл.-корр., докт. техн. наук,
 Ін-т електродинаміки НАН України, м. Київ,
УРМАНОВ О.Б., директор каскаду Київських ГЕС та ГАЕС
ФЕДОРЕНКО Г.М., докт. техн. наук,
 Ін-т електродинаміки НАН України, м. Київ,
ХУДЯКОВ А.В., інженер, Ін-т електродинаміки НАН України, м. Київ,

АКСІАЛЬНИЙ МАГНІТНИЙ ПОТІК В ЗУБЦЯХ КРАЙНІХ ПАКЕТІВ СТАТОРА ПОТУЖНИХ ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ

Проведено аналіз характеристик електромагнітного поля в торцевій зоні осердя статора, де встановлено датчики індукції магнітного поля. Запропоновано нові діагностичні параметри на основі різних форм представлення деформації електромагнітного поля під кожним полюсом ротора гідрогенератора.

В процесі експлуатації в електричних машинах має місце руйнація короткозамкнених стержнів демпферної системи ротора. Особливо актуально це для гідрогенераторів, які працюють в суто змінних режимах [1]. Нерівномірність повітряного зазору призводить до пульсації магнітного потоку в області короткозамкнених стержнів демпферної системи, появи в них струмів навіть в синхронних режимах, підвищеного нагріву та циклічних термомеханічних зусиль, поздовжніх і поперечних зміщень. Виникають дефекти в місцях з'єднань стержнів з короткозамкненими сегментами, що призводить до зростання втрат і нагріву стержнів вказаних місцях. Внаслідок цього і виникають руйнації стержнів і елементів кріплення сегментів (Рис. 1). Як відомо, процес руйнування спонтанно наростає. Розвиток таких дефектів призводить до ще більшої нерівності, що прискорює процес руйнації стержня. Руйнація стержнів демпферної системи нерідко призводить до пошкоджень обмотки статора (Рис. 2). Так як стержні навантажено струмами по-різному, в т. ч. на різних полюсних діленнях, виникає певна деформація магнітного поля, яке збуджується струмами демпферної системи. Враховуючи той факт, що електромагнітні і теплові процеси в короткозамкнених стержнях найбільше змінюються в зоні приєднання до сегментів, адже там відбувається їх руйнація, запропоновано спосіб виявлення дефектів демпферної системи на основі аналізу їх магнітного потоку з допомогою датчиків, встановлених на торці статора гідрогенераторів [2]. Для апробації способу діагностики демпферної обмотки ротора, обґрунтування його достовірності і ефективності, можливого вдосконалення не-

обхідно вивчити особливості магнітного поля в зоні установки датчиків контролю. Для цього на капсульному гідрогенераторі СГК 538/160-70 М ст № 15 Київської ГЕС проведено комплекс робіт по оснащенню датчиками індукції магнітного поля та випробуванню в перехідних (режим пуску) і навантажувальних режимах.

Для експериментального дослідження індукції магнітного поля в зазорі було встановлено датчики індуктивного типу (Рис. 3, а), які розробили і виготовили співробітники Інституту електродинаміки НАНУ.

Датчики, що встановлені в електромашини, повинні відповідати технічним вимогам для забезпечення безперервної та надійної експлуатації електромашини.

Для дослідження електромагнітного поля в гідрогенераторі СГК-538/160-70 М ст. № 15 Київської ГЕС розроблено і встановлено датчики, що виходячи з жорстких умов установки і експлуатації, відповідають таким вимогам:

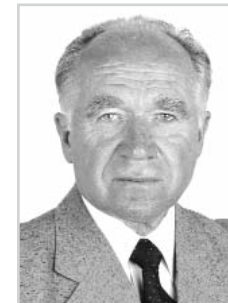
1. Захисний корпус перетворювача по відношенню до нагріву і охолодженню повинен надійно працювати в діапазоні температур від -80°C до $+200^{\circ}\text{C}$.
2. Механічна та електрична міцність ізоляції корпусу перетворювача по відношенню до заліза електромашини повинні відповідати безпечній її



ТИТКО О.І.



УРМАНОВ О.Б.



ФЕДОРЕНКО Г.М.



ХУДЯКОВ А.В.

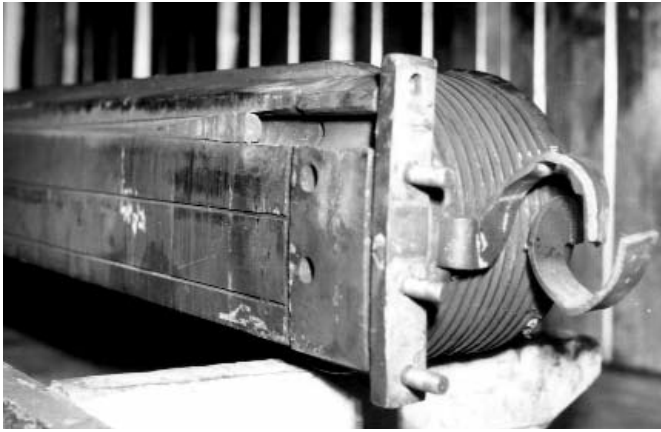


Рис. 1. Пошкодження демпферного стержня ротора гідрогенератора СГК 538/160-70М Київської ГЕС



Рис. 2. Пошкодження обмотки статора гідрогенератора при руйнації демпферних стержнів ротора



Рис. 3, а. Датчик індукції магнітного поля, встановлений на гідрогенераторі Київської ГЕС



Рис. 3, б. Місця установки датчиків індукції (показані стрілками) магнітного поля в торцевій зоні гідрогенератора ст. №15 Київської ГЕС

роботі.

3. Перетворювач повинен мати здатність працювати при гранично допустимих величинах вібрації електромашини.

4. Корпус перетворювача повинен бути триваломіцним.

Захисний корпус перетворювача виготовлено з пластикату, фізико-технічні характеристики якого співпадають з характеристиками матеріалу фторопласт-2, але поверхня пластикату при механічній обробці має більшу міцність кріплення, але при наклеюванні на елементи конструкції виявляє більшу надійність. Заготовка з твердого пластикату товщ. 4 мм має розмір 15 × 10 × 5 мм.

Дослідний цех, прийнявши до уваги технічні вимоги (пункти 1–4), виконав механічні роботи з заготовками корпусів перетворювачів. Особливою точністю вимагало фрезерування отвору $\varnothing 6,5$ мм по висоті корпусу для постановки датчиків індукції (ДІ) та свердління отвору $\varnothing 4$ мм в торці корпусу для подальшого вводу кабелю з провідниками.

Датчик індукції – кругла, плоска, безкаркасна котушка $\varnothing 6$ мм, виконана намоткою мідного проводу $\varnothing 0,06$ мм виток до витка з фторопластовою ізоляцією типу ПЭТВ-Ф, станочним способом. Витки котушки з короткими вивідними кінцями змащуються для міцності ізоляційним клеєм, кількість витків становила 100.

Як відомо, розмір перетворювача, розмір котушки ДІ, кількість її витків залежить від величини ЕРС індукції в досліджуваній конструкції електричної машини. Відповідно до цього і виготовлено такі датчики.

Перед установкою котушок ДІ в корпус перетворювача їх витаровано на спеціальному стенді, що включає трубчастий дросель (соленоїд) довжиною 1000 мм.

Дросель – це пола трубка з гетинаксу товщиною 2 мм, з обмоткою з мідного проводу $\varnothing 2$ мм в х/б ізоляції в 4 шари. Величина ЕРС індукції електромагнітного поля по довжині рівномірна і однакова. Таким чином, котушки ДІ витаровано в рівномірному синусоїдальному полі.



Котушка разом із фіксуючим пристроєм заводилась в середину дроселя. Вимірювання ЕРС котушки ДІ проводилось на стенді мілівольтметром, що фіксує показання діючого значення змінної напруги, а також вимірювались поточні значення за допомогою комп'ютера. Ряд приладів і пристроїв на стенді виконують функції подачі і контролю напруги струмів.

Котушка, має свій паспорт, введена в гніздо корпусу перетворювача та закріплена клеєм, що відповідає пунктам 1–4 технічних вимог. В торцевий отвір корпусу (Рис. 3, а) $\varnothing 4$ мм вводиться кабель, що має потрібну ізоляцію і гарантує надійну роботу перетворювача при пробивній напрузі до 15 кВ. Кабель $\varnothing 3,5$ мм і довжиною 1500 мм має два мідних провідника різноколірної ізоляції.

Вихідні кінці котушки ДІ розпаяні на кінці кабелю. Отвір на корпусі закривається круглою текстолітовою втулкою ВЧ $\varnothing 6,5$ мм товщиною 0,25 мм, яка закріплена клеєм.

На вихідних кінцях кабелю з бирками заміряно величину опору і записано у паспорт ДІ.

На гідрогенераторі ст. № 15 Київської ГЕС установлено перетворювачі в кількості 3 шт. на поверхні зубців заліза статора в торцевій зоні (Рис. 3, б). Кінці перетворювачів виведено на стенд.

Вимірювання індукції магнітного поля здійснюється шляхом комп'ютерної реєстрації в режимі реального часу відповідно до схеми (Рис. 4), що дає можливість отримати поточні значення індукції.

Використовується АЦП Е-14-440 розрядністю в 14 біт.

За 1 с здійснюється 400000 вимірювань для одного каналу, для трьох — в три рази менше. За період індукції поля 0,02 с — 8000.

В зв'язку з тим, що в умовах електростанцій генеруються високочастотні сигнали, при низьких корисних сигналах використовувалися фільтри. Для контролю

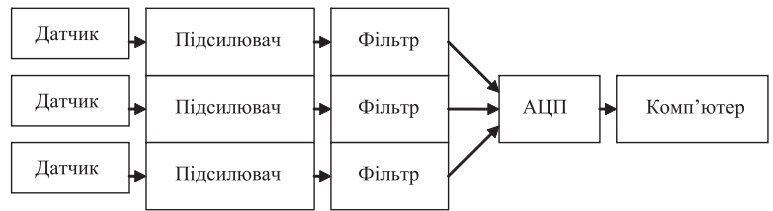


Рис. 4. Схема вимірювання індукції магнітного поля

результатів експерименту комп'ютерні вимірювання дублювались цифровим осцилографом DS 51 02 С.

Проведено ряд випробувань гідрогенераторів в перехідних і сталих режимах. Характеристики одного із режимів: $P = 14,9$ МВт, $Q = 1,9$ мВар, $I_{ст} = 1,4$ кА, $i_p = 750$ А, $\cos \varphi = 0,974$. На жаль, не вдалося провести вимірювання в режимі холостого ходу

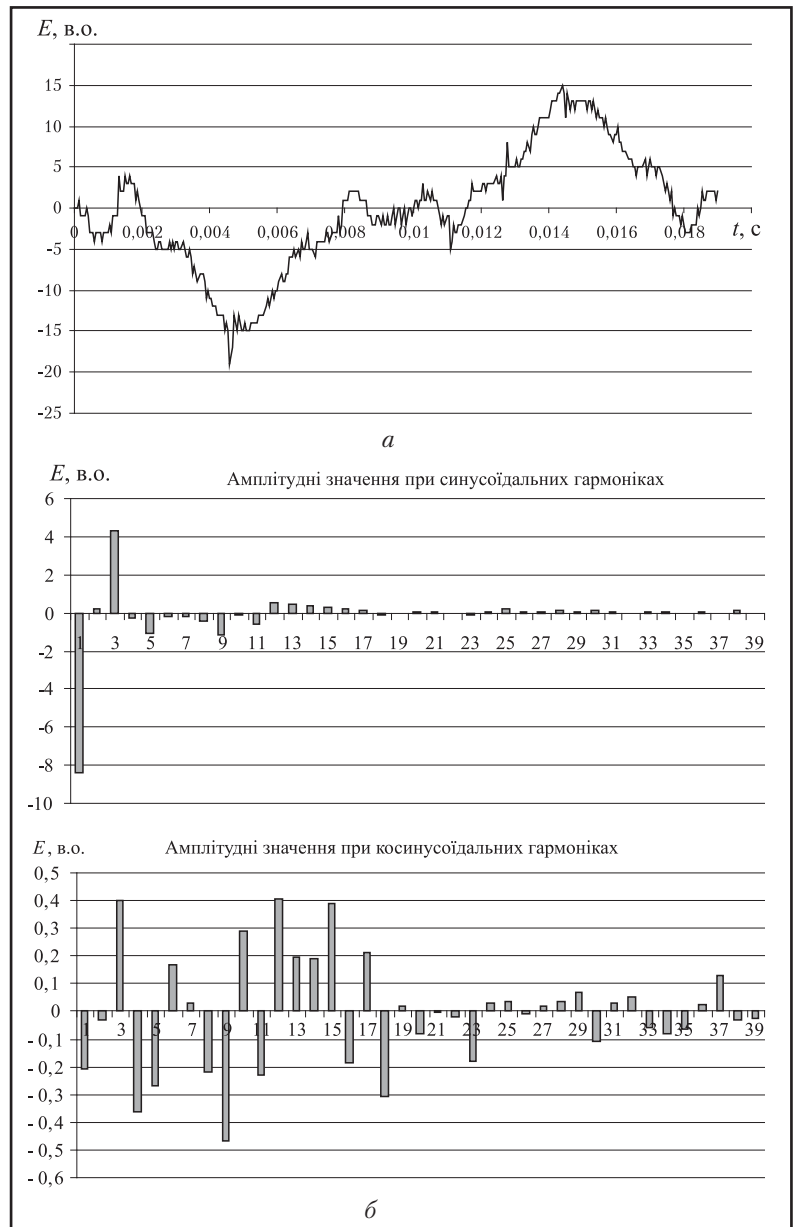


Рис. 5. Наведена в датчику № 1 ЕРС та її спектральний аналіз



Таблиця 1. Характеристика постійної розкладу в ряд Фур'є наведеної в датчику № 1 ЕРС при проходженні його всіх пар полюсів ротора.

№ пари полюсів	Значення постійної розкладу, a_{0i}	Відхилення постійної розкладу від середнього значення, δ_i	Відношення постійної розкладу до середнього значення, γ_i
1	0.08	- 1	0.45
2	0.12	- 0.6	0.67
3	0.18	0	1.01
4	0.114	- 0.7	0.78
5	0.2	0.2	1.09
6	0.18	0	0.96
7	0.2	0.2	1.07
8	0.22	0.4	1.22
9	0.21	0.3	1.14
10	0.19	0.1	1.03
11	0.22	0.3	1.19
12	0.2	0.2	1.12
13	0.14	0.4	0.76
14	0.08	- 0.1	0.47
15	0.22	0.4	1.21
16	0.19	- 0.1	1.05
17	0.17	- 0.1	0.91
18	0.3	1.2	1.62
19	0.19	0.1	1.07
20	0.2	0.2	1.1
21	0.2	0.2	1.14
22	0.2	0.2	1.12
23	0.2	0.2	1.09
24	0.15	0.3	0.85
25	0.23	0.5	1.29
26	0.15	- 0.03	0.79
27	0.2	0.2	1.12
28	0.2	0.2	1.07
29	0.11	- 0.7	0.62
30	0.12	- 0.6	0.66
31	0.23	0.5	1.26
32	0.24	0.6	1.33
33	0.15	- 0.3	0.81
34	0.3	0.12	1.6
35	0.11	- 0.07	0.6

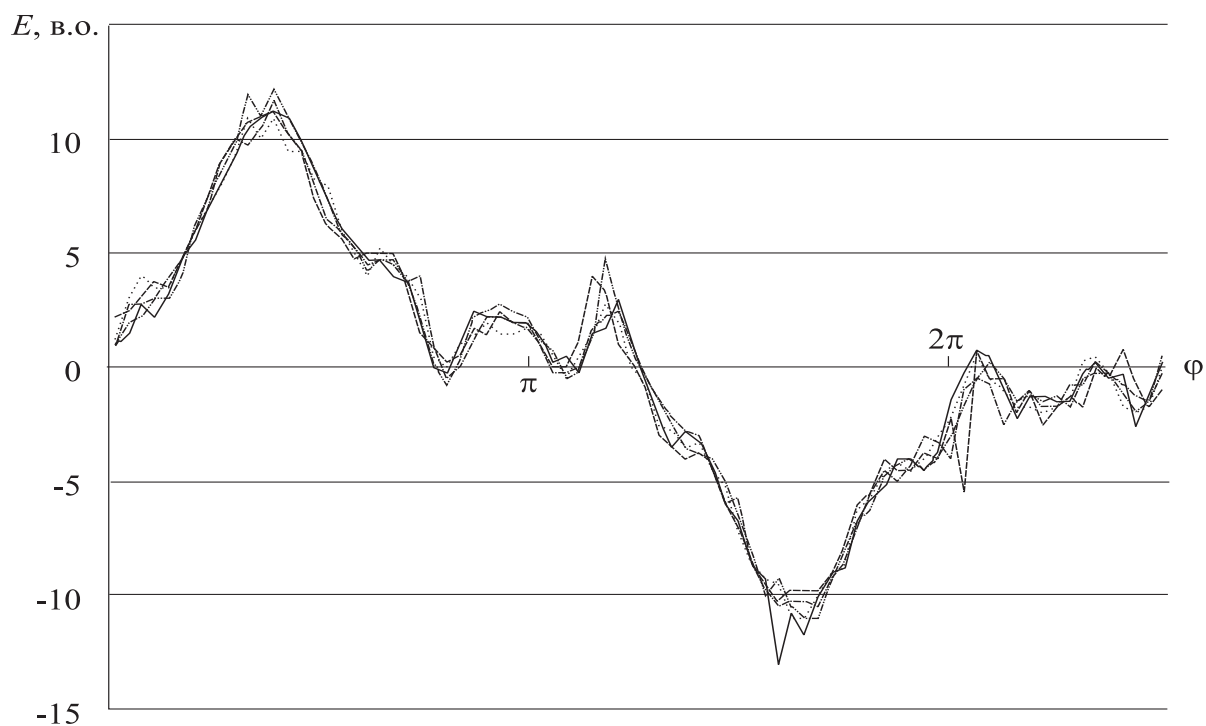


Рис. 6. Наведена в датчику № 1 ЕРС при послідовному проходженні повз датчика 5 пар полюсів ротора ГТ



(Х.Х.). Тому датчик пронизував магнітний потік струмів обмотки статора і ротора. На приведених кривих (Рис. 5, а та 7, б) чітко видно реакцію якоря в міжполюсній зоні. Залежність в часі для різних режимів практично однакова.

Ідентичний характер кривих ЕРС і для різних пар полюсів (Рис. 6). У вимірних сигналах досить часто спостерігається наявність високочастотних перешкод, тому перед виконанням спектрального аналізу криві ЕРС піддавались фільтрації (Рис. 5, 7, б). На Рис. 7, а відтворено криву індукції магнітного поля, яка має синусоїдальний характер.

Із кривих ЕРС і магнітної індукції видно, що вони містять гармоніки стержнів демпферної системи. Це підтверджує результати спектрального аналізу (Рис. 5). Відомо, що для даного випадку мають місце гармоніки порядку

$$v = k \cdot z/p \pm 1, k = 0, 1, \dots,$$

де z/p – кількість стержнів на пару полюсів. Так як в даному генераторі $z/p = 6$, то $v = 1, 5, 7, 11, 13, \dots$. Треба відмітити, що в перехідних і в сталих режимах присутні струми в стержнях. В сталих режимах струми наводяться пульсуючим магнітним полем внаслідок нерівномірності повітряного зазору. Так як на полюсі три стержні, а струм в стержні, який знаходиться на середині полюса, значно менший, так як повздовжні струми тут взагалі відсутні, то в кривих ЕРС можуть появлятися гармоніки, коли $z/p = 4$. Спектральний аналіз великої множини кривих ЕРС показав, що використати вищі гармоніки для діагностування технічного стану демпферної системи чи обмоток збудження складно через складний характер електромагнітних процесів в області установки датчиків. Слід відмітити, що окрім робочого магнітного потоку, в даній області має місце аксіальний потік пазового розсіяння, який також залежить від характеристики режиму.

Найбільш прийнятним для діагностування демпферної системи ротора є використання постійної розкладу в ряд Фур'є кривих ЕРС під кожною парою полюсів. В таблиці приведено дані постійної розкладу a_{0i} ($i = 1, \dots, p$), де p – число пар полюсів, а також представлення цих даних в різних формах, найбільш простих для діагносту-

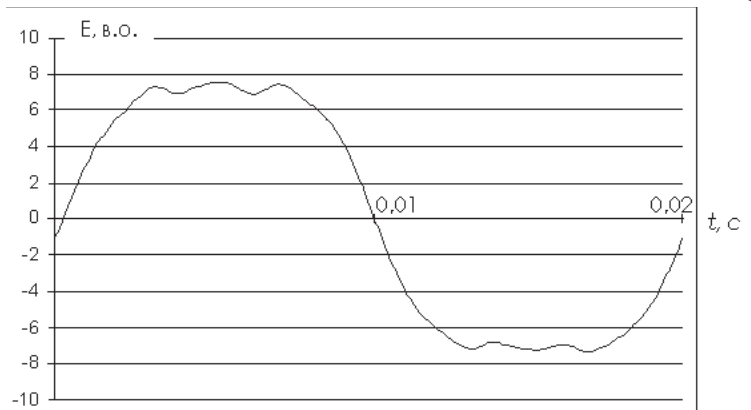


Рис. 7, а. Вид кривої аксіальної індукції магнітного поля в області установки датчика 1.

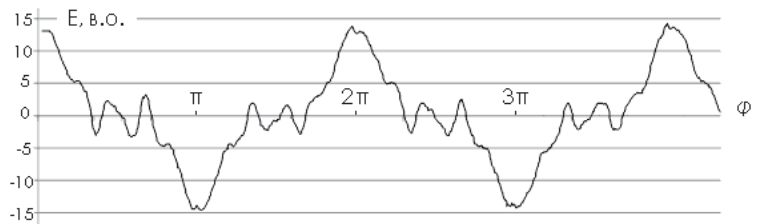


Рис. 7, б. Вид кривої ЕРС після фільтрації

вання, а саме відношення постійних розкладу для кожної пари до їх середнього значення для всіх 35 пар полюсів ротора (величина γ_i), а також різниця постійних розкладу і середнього значення (величина δ_i). Треба відмітити, що величина a_{0i} приймає досить невеликі значення по відношенню до амплітудного значення першої гармоніки ЕРС. Тому за абсолютним значенням a_{0i} важко проводити діагностування. Із таблиці видно, що постійні розкладу для всіх пар ніколи не будуть набувати нульового значення, так як є різні технологічні відхилення для кожної пари полюсів і в т. ч., є похибка вимірювання. Тому для діагностування необхідно вибирати значення, a_0, δ_0, γ_0 , які найбільш часто повторюються, як еталонні, і в подальшому проводити аналіз відхилень величин a_i, δ_i, γ_i для кожної пари полюсів від a_0, δ_0, γ_0 . Найбільш зручно проводити діагностичний аналіз на основі розгляду величин γ_i .

В нашому випадку γ_0 приблизно дорівнює 1,12. Серед 35 пар полюсів величини γ_i для 22 пар з точністю до 15 % корелюють значення γ_0 , ще для 11 пар – менше цього значення, для двох пар γ_i суттєво відрізняються від середньостатистичного значення γ_0 . Отже демпферні стержні цих пар полюсів можуть мати проблеми. Цікаво, що вони розташовані по колу майже діаметрально. Приведена таблиця складена для випадку, коли випробування генератора проводились при певному нагріванні ротора і, як показав технічний огляд,



це виникало в результаті незадовільної пайки окремих стержнів демпферної системи.

На даному генераторі, в силу технологічних проблем, проведено оснащення за спрощеною схемою з одної із сторін генератора. Тому при випробуваннях проводились роботи, перш за все, по об'рунтуванню запропонованого способу діагностики демпферної системи гідрогенераторів та відпрацювання пристрою і діагностичних процедур.

Висновки.

1. Проведений аналіз характеристик електромагнітного поля в торцевій зоні осердя статора, де встановлено датчики індукції магнітного поля, в перехідних і сталих режимах показав, що незважаючи на складну форму сигналів датчиків можливо ефективно використати дані вимірювання для діагностування демпферних систем і систем збудження ротора.

2. Запропоновано нові діагностичні параметри на основі різних форм представлення деформації електромагнітного поля під кожним полюсом ротора гідрогенератора, які більш прості і ефективні для діагностики демпферних систем багатополюсних електричних машин.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Поташич С.І., Васьковський Ю.М., Федоренко Г.М.* Підвищення надійності, рівня безпеки та ефективності функціонування демпферних систем потужних гідрогенераторів. //Гідроенергетика України. — 2009. — № 4. — С. 28–34.

2. *Урманов О.Б., Шевченко В.Ю., Титко О.І., Федоренко Г.М., Гуторова М.С., Грубой О.П., Шофул А.К.* Патент на корисну модель. № 73157. Спосіб діагностики стану короткозамкнених стержнів обмоток ротора електричних машин.

3. *Вольдек А.И.* Электрические машины. — Л. Энергия, 1974. — 840 с.

© Титко О.І., Урманов О.Б., Федоренко Г.М., Худяков А.В., 2013

