

## ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

**О.І. Титко**, чл.-кор. НАН України

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

*Виконано дослідження фізичних процесів в електричних машинах, у т.ч. за наявності дефектів. Запропоновано і науково обґрунтовано нові способи виконання елементів торцевих зон генераторів та засоби функціонального моніторингу електричних машин, які підвищують надійність їх експлуатації. Бібл. 8, рис. 9, табл. 5.*

**Ключові слова:** генератор, двигун, надійність, фізична модель, математична модель, екрани статора, натискні пальці, діагностика, фізичні процеси.

У процесі генерування електроенергії суттєвою є проблема підвищення надійності енергетичних електричних машин: турбо- і гідрогенераторів, електродвигунів власних потреб електростанцій. Проблема надійності електроенергетичного обладнання ТЕС, АЕС, ГЕС України пов'язана, перш за все, зі старінням обладнання та відсутністю коштів на його реабілітацію. На ТЕС проблема надійності посилюється використанням генеруючого обладнання в маневрених режимах. Такі показники надійності, як коефіцієнт готовності і наробіток на відмову, значно менший за нормативні. Проблема надійності для генераторів обумовлює значною мірою економічні показники, оскільки відмови генераторів призводять до великих обсягів відновлюваних робіт і значних витрат на ремонти. Для гідрогенераторів-двигунів великої потужності, які в Україні лише починають освоювати, проблема надійності ще більш істотна.

Найбільш поширеними дефектами, що вимагають великих фінансових витрат і часу на відновлювані роботи, є пошкодження ізоляції обмоток, сегментів шихтованого осердя статора, відгини натискних пальців, ослаблення і руйнування стяжних призм. Підвищені вібрації є причиною і наслідком вказаних і багатьох інших дефектів. Робота відділу моделювання машин змінного струму з розробки засобів підвищення надійності електроенергетичних машин проводилась в таких напрямках. Розроблено математичні й елементи фізичних моделей та проведено дослідження процесів, у т.ч. при наявності дефектів у турбо- і гідрогенераторах та двигунах власних потреб електростанцій. Розроблено для них низку технічних рішень та способів виконання вузлів і засобів моніторингу за технічним станом, застосування яких у практиці створення і експлуатації машин підвищує показники надійності. Наведемо деякі з них.

Розроблено математичні моделі, програми розрахунку та проведено дослідження теплових і термомеханічних процесів в елементах ротора і статора турбогенераторів, у яких при експлуатації відбуваються зміни в системі охолодження. Дослідження проведено для двох типів генераторів: ТВВ-1000-2 і ТГВ-300.

Розрахунки розподілу температур в аксіальному напрямку проведено для трьох елементів обмотки статора ТВВ-1000-2 – ізоляції, міді і оболонок каналів охолодження. Розрахунки проводились при погіршенні системи охолодження. Отримано термомеханічні напруження. Виходячи з вимог до напружень у корпусній ізоляції ТГ при різних температурах, можна дійти висновку, що механічні напруження при погіршенні системи охолодження можуть перевищувати допустимі значення для ізоляції. Виявлено зони, де ці перевищення мають місце. Це дуже важливий фундаментальний результат і в тому аспекті, що механічні напруження не контролюються, контролюються лише температури. Отримані ж залежності напружень від температури дають змогу при експлуатації контролювати механічний стан обмотки статора.

Отримано розподіл температури в елементах ротора генератора ТГВ-300 при погіршенні проходження в каналах охолоджуючого газу. Показано, при яких умовах виникають

неприпустимо високі температури, в тому числі в тілі ротора, що є небезпечним і для ізоляції обмотки, і для теплового небалансу ротора, який призводить до підвищених вібрацій. Результати можуть бути використані також і для діагностування технічного стану ротора.

Запропоновано і досліджено низку технічних рішень і способів удосконалення конструкції торцевої зони ТГ для зменшення її нагрівання і збільшення механічної стійкості статора. Досліджено зубцево-пазове виконання екрана статора. Запропоновано виготовляти екран у вигляді мідних сегментів. За геометрією вони повторюють форму сегментів сталі, ізольовані один від одного, встановлені в середині крайніх пакетів. Схема оснащення сегментів екрана і заліза статора фізичної моделі показана на рис. 1, де *a* – схема встановлення трьох

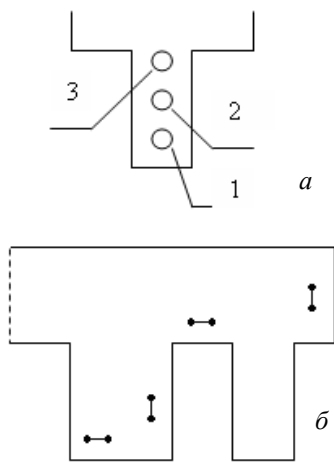


Рис. 1

(1–3) датчиків магнітного поля на спеціальній текстолітовій планці; *b* – схема розміщення потенціальних зондів на мідному сегменті екрана. Лише аксіальний потік зменшується до двох разів у зубцевій зоні (табл. 1), тоді як інші екрани, у т.ч. найбільш ефективний на сьогодні, наприклад, решічастий екран [2] – всього на 20...40%. У табл. 1 наведено результати експериментальних досліджень ефективності зубцево-пазового екрана статора ТГ у вигляді ЕРС датчиків магнітного поля в мілівольтах, отриманих на фізичній моделі. На рис. 2 показано особливості електромагнітних процесів при застосуванні таких екранів: *a* – розподіл аксіальної складової індукції поля  $B_z$  по глибині масиву шихтованого заліза статора, *n* – номер листа, на якому вимірювалась індукція; *b* – залежність магнітної індукції  $B_z$  (в.о.) від товщини екрана: 1 – у точці 1; 2 – у точці 2; 3 – у точці 3. Видно, що в різних зонах ефективність екрану-

вання є різною для різних товщин екранів. При застосуванні таких екранів дуже важливим є визначення місця встановлення сегментів екрана всередині крайніх пакетів. З одного боку, чим далі від торця осердя, тим більше підвищується механічна міцність осердя з екраном, але знижується ефективність екранування. Це питання досліджено в результаті реалізації математичної моделі, показаної на рис. 3: область I – повітряне середовище, де знаходиться тонкий шар струму; область II – шихтовані сегменти заліза осердя статора; область III – шихтовані сегменти електропровідного екрана.

Таблиця 1

№ датчика	Вихідний варіант без екрана	Шестизубцевий екран товщиною 0,5 мм, вимірювальна планка під екраном	Тризубцевий екран товщиною 1,5 мм		Тризубцевий екран товщиною 2 мм	Тризубцевий екран товщиною 3,5 мм	
			вимірюв. планка під екраном	вимірюв. планка над екраном	вимірюв. планка над екраном	вимірюв. планка під екраном	вимірюв. планка над екраном
1	18,5	16,2	14,6	14,6	13	11	15,7
2	9,4	8,4	8,1	7,3	6	5,7	7,3
3	11,8	9,3	7,5	8,1	6	6	8,0

Вектор індукції магнітного поля має дві складові  $B_x$  і  $B_y$ , а вектор напруженості електричного поля – одну  $E_z$ . Оскільки розглядається зубцево-пазова конструкція, то магнітна проникність  $\mu$ -тензор

$$\mu = \begin{vmatrix} \mu_x & 0 \\ 0 & \mu_y \end{vmatrix}. \quad (1)$$

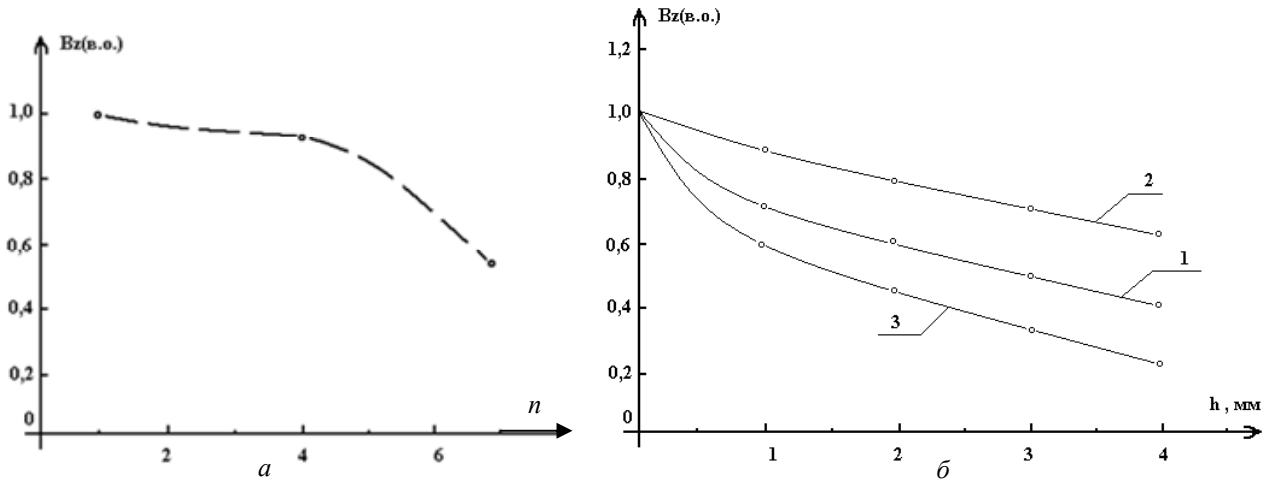


Рис. 2

Розглядати величину  $\mu$  у вигляді тензора має сенс лише для сегментів заліза. Тоді знаходження розв'язку такого рівняння [7] для  $E_z$

$$\frac{\mu_x}{\mu_y} \cdot \frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} - j\omega\sigma\mu_x E_z = 0 \quad (2)$$

дає можливість дослідити особливості електромагнітного поля при застосуванні екранів зубцево-пазової конструкції в зоні спинки.

На рис. 4 показано залежність ефективності екранування від місця встановлення екрана в крайньому пакеті, а в табл. 2 наведено розрахункові дані для нормальної складової напруженості магнітного поля та коефіцієнта екранування електропровідної шихтованої структури при її розміщенні на різних відстанях  $h$  від торця осердя статора. Видно, що область найвищої ефективності екрана знаходиться на відстані від торця осердя до 20 мм. Тобто екран треба розміщувати у цій області.

У табл. 2 наведено нормальну складову вектора  $\vec{H}$  на зовнішній поверхні сегментів сталі (верхній рядок) і за екраном (нижній рядок) та коефіцієнт екранування, який визначається як відношення  $H_y$  без екрана до  $H_y$  з екраном, при різних місцях розташування екрана, тобто при варіації товщини пакета сегментів сталі статора, за яким розміщується екран. Найвища ефективність екрана, коли його встановлено, у цьому випадку, на відстані 0,02 м і ближче до торця осердя статора.

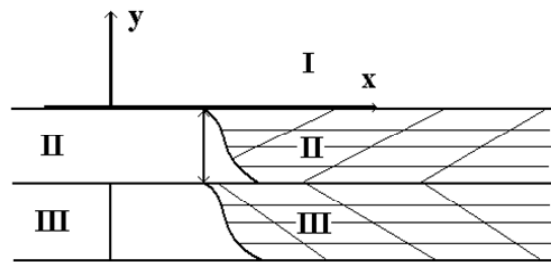


Рис. 3

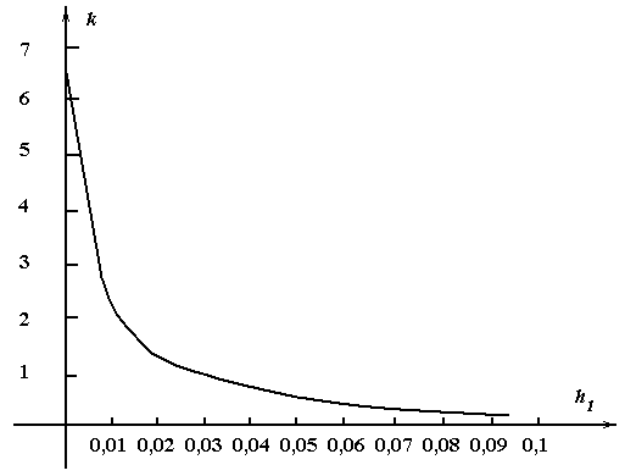


Рис. 4

Таблиця 2

$\sigma_2 = 0$								
$h_1, \text{ м}$	0,07	0,05	0,03	0,02	0,01	0,007	0,002	0,0001
$H_y \cdot 10^{-3}, \text{ А/м}$	-9	-11,4	-18,3	27	-48	58,3	-46	-2,5
	-9,7j	-8j	-7j	-9j	-24j	-39,5j	-108j	-128j
$H_y \cdot 10^{-3}, \text{ А/м}$	12,5	-2,5	-15,7	-25,7	-47	57	-46	-2,8
	-20j	-16,7j	-12,7j	-13j	-25j	-40j	-108j	-128j
$\sigma_2 = 0,26 \cdot 10^8$								
$h_1, \text{ м}$	0,07	0,05	0,03	0,02	0,01	0,007	0,002	0,0001
$H_y \cdot 10^{-3}, \text{ А/м}$	-2,8	-1,997	-1,92	-1,92	-1,96	-1,97	-2	-2

A/м	-1,16 j	-1,15 j	-1,02 j	-0,92 j	-0,8 j	-0,78 j	-0,073 j	-0,7 j
$H_y \cdot 10^{-3}$ ,	-1,03	-1,628	-1,8	-1,85	-1,89	-1,9	-1,9	-1,95
A/м	-2,8 j	-1,3 j	-0,27 j	+0,056 j	+0,25 j	+0,28 j	+0,33 j	+0,3 j
k	5,5	6	9	13,4	25,3	33,4	54	60

Вибір оптимального місця встановлення екрана можна здійснити в результаті розв'язання оптимізаційної задачі знаходження максимального коефіцієнта екранів і мінімального зниження напружень механічної стійкості крайніх пакетів. Але при застосуванні такого екрана виникає ще одна проблема. Шихтування мідних сегментів, які мають товщину сталевих сегментів, мають технологічні складності. Тому шляхом математичного моделювання досліджено [8], при яких товщинах втрати в мідних сегментах від радіального потоку будуть хоча б тотожні втратам у сегментах сталі. Знайдено, що ця товщина становить близько 2 мм. А це вже вирішує технологічну проблему.

Запропонована нами конструкція екрана з відгином (рис. 5) [4] використовується в серійних генераторах та набуває подальшого розвитку. На цьому рисунку *a* – торцева зона потужного генератора з екраном статора, де 1 – пакети осердя, 2 – натискна плита, 3 – натискний палець, 4 – обмотка, 5 – циліндрична частина електромагнітного екрана; *б* – способи подовження циліндричної частини електропровідного екрана у бік лобової частини обмотки; *в* – переріз натискного пальця торцевої зони статора турбогенератора. Відгин пропонується робити зміщеним у бік лобової частини обмотки. Для генераторів ТГВ таке зміщення конструктивно можливе. Запропоновано низку способів такого виконання. В результаті досліджень на фізичній моделі показано, що відбувається зменшення осьової складової індукції  $B_z$  в області дна паза крайнього пакета на 10 % для варіанта екрана (*б*) у порівнянні з варіантом екрана (*a*).

Запропоновано нові способи виконання натискних пальців, які пресують зубцеву частину осердя (рис. 5 *в*) [6]. Це дуже відповідальний елемент. Результати розрахункових досліджень підтверджують ефективність запропонованої конструкції. Її застосування призводить до зменшення втрат електромагнітної енергії в тілі натискного пальця на 15...20 %, збільшення поверхні охолодження натискного пальця на 30...40 %, зменшення середнього перевищення температури натискного пальця на 10...15 %.

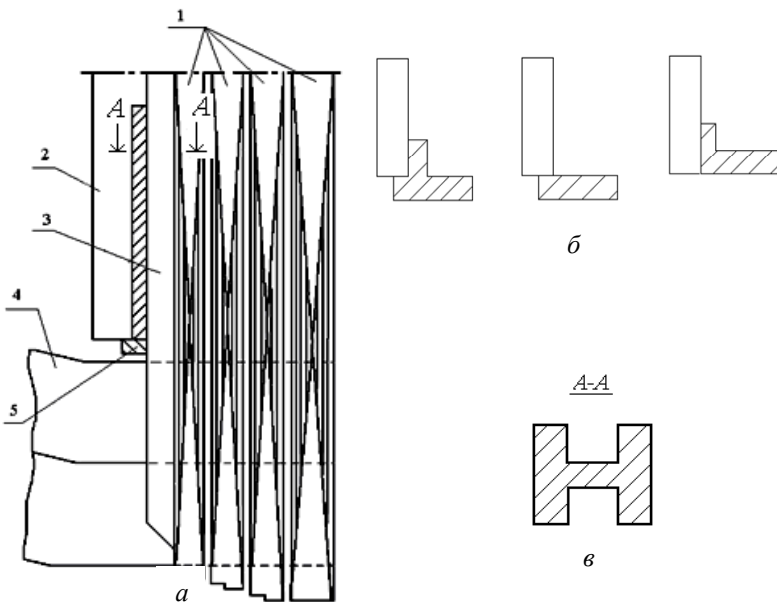


Рис. 5

решітчастого екрана [2]. Слабкою ланкою цієї екрануючої системи є підвищене нагрівання мідного кільця, що замикає натискні пальці. Запропонований спосіб знизить не лише нагрівання самих пальців, а і кільця.

На Трипільській ТЕС проведено комплекс випробувань турбогенератора потужністю 300 МВт для дослідження технології поліпшення вібраційного стану статора шляхом регулювання температури холодного газу. Змінювались температура охолоджуючого газу і реактивна потужність. Вимірювались віброприскорення – штатні, на опорах підшипників ротора,

проте їх можна робити декілька для збільшення теплообмінної поверхні. Але ця конструкція має переваги ще в такому аспекті. Натискні пальці є елементами екрануючої системи у вигляді

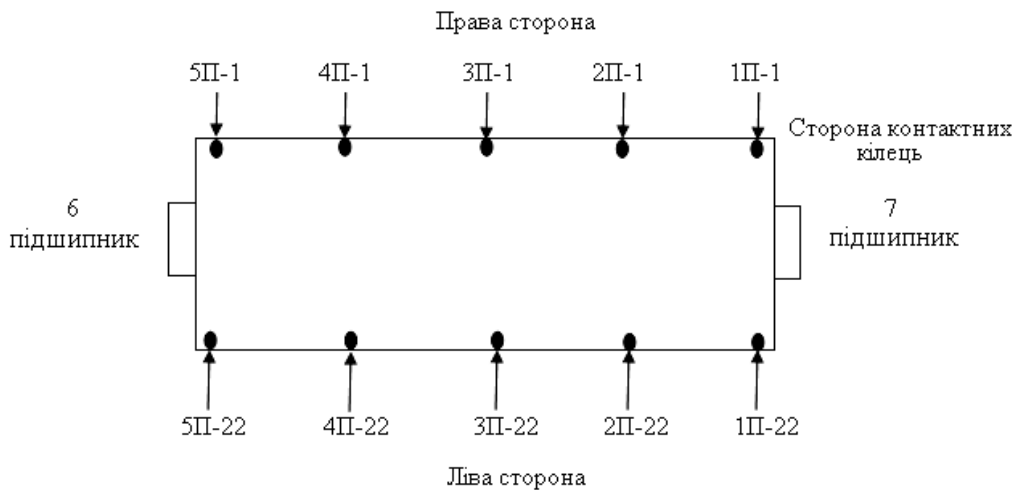


Рис. 6

і зовні на корпусі статора. Схему вимірювань показано на рис. 6. Тут також показано поперечний напрямок замірів (вид зверху) віброзміщень статора ТГ № 3 Трипільської ТЕС і місця установки датчиків вібрації на корпусі турбогенераторів.

Досліджувались

спектри віброприскорень і віброзміщень. Отримано низку цікавих результатів. На рис. 7 і в табл. 3, 4 наведено деякі з них. Основний висновок такий. Зміна температури газу по-різному впливає на значення вібрацій на різних частотах, для різних реактивних потужностей, у різних місцях статора. Тому цю технологію зменшення віброхарактеристик доцільно реалізувати на основі багатоканальної системи регулювання охолодженням. Така технологія звичайно буде ефективною при неповних навантаженнях, при роботі в маневрених режимах, підвищених вібраціях при наявності дефектів, при переході через критичні швидкості, для того щоб через підвищені вібрації не порушувати номінальну щільність статора. Результати роботи відкривають новий науковий напрямок в теорії діагностування технічного стану статора на основі контролю вібрацій на корпусі статора. Що це реально, підтверджують дані, наведені у роботі [1]. З кривих рис. 8, де показано зміну вібрації корпусу (2) та осердя (1) статора ТГ, потужністю 500...800 МВт з ростом навантаження (а) і в часі (б) видно, що вібрації на корпусі корелюють з вібраціями в осерді статора.

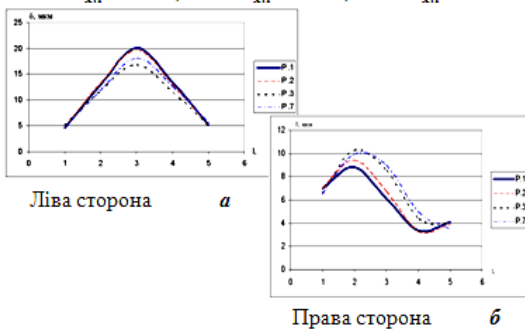
Таблиця 3

Точка 1П-1	Частота, Гц	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 4	Режим 5	Режим 6	Режим 7
	50	0,37	0,40	0,36	0,39	0,39	0,38	0,36
	100	0,73	0,68	0,70	0,70	0,72	0,72	0,77
	150	0,25	0,25	0,21	0,18	0,20	0,20	0,20
	1200	0,59	0,56	0,62	0,62	0,63	0,59	0,48
	2400	0,86	0,70	0,26	0,32	0,36	0,56	0,18
	3600	0,37	0,30	0,28	0,32	0,25	0,58	0,22
	4800	0,08	0,17	0,98	0,74	0,49	0,33	0,77
	6000	0,05	0,04	0,08	0,10	0,10	0,03	0,06
	7200	0,04	0,04	0,11	0,09	0,10	0,04	0,15
8400	0,02	0,01	0,05	0,03	0,04	0,02	0,07	

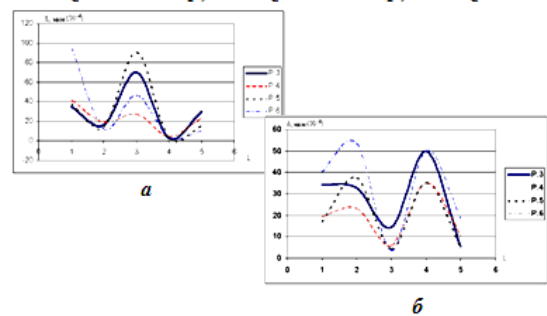
Таблиця 4

Дата	Номер режиму	Режим МВт	Підшипник 6						Підшипник 7					
			В		П		0		В		П		0	
			Вібропереміщення, мкм	Віброшвидкість, мм/с	Вібропереміщення, мкм	Віброшвидкість, мм/с	Вібропереміщення, мкм	Віброшвидкість, мм/с	Вібропереміщення, мкм	Віброшвидкість, мм/с	Вібропереміщення, мкм	Віброшвидкість, мм/с	Вібропереміщення, мкм	Віброшвидкість, мм/с
35.2011 11:20	1	$P=250$ МВт $Q=100$ Мвар $t_{x.r.}=34^{\circ}\text{C}$	39	4,2	17	2,1	23	3,1	22	дз	7	1,1	26	3,9
05.2011 12:55	2	$P=250$ МВт $Q=100$ Мвар $t_{x.r.}=36^{\circ}\text{C}$	38	4,6	14	2,0	25	3,3	22	3,2	6	1,0	27	4,4
05.2011 15:16	3	$P=250$ МВт $Q=100$ Мвар $t_{x.r.}=41^{\circ}\text{C}$	35	4,3	14	1,9	22	2,9	21	3,1	8	1,2	26	4,2
05.2011 15:25	4	$P=250$ МВт $Q=120$ Мвар $t_{x.r.}=41^{\circ}\text{C}$	38	4,5	13	1,9	25	3,1	21	3,1	7	1,1	27	4,3
05.2011 15:32	5	$P=250$ МВт $Q=140$ Мвар $t_{x.r.}=41^{\circ}\text{C}$	38	4,5	14	2,1	23	3,0	20	3,1	7	1,1	26	4,2
05.2011 15:38	6	$P=250$ МВт $Q=160$ Мвар $t_{x.r.}=41^{\circ}\text{C}$	38	4,5	13	1,9	24	3,0	21	3,2	7	1,1	26	4,2
35.2011 16:18	7	$P=250$ МВт $Q=100$ Мвар $t_{x.r.}=43^{\circ}\text{C}$	34	4,1	13	1,9	23	3,0	20	3,0	8	1,1	25	3,8

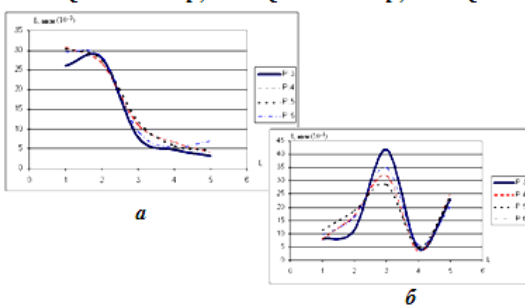
**Зміна температури холодного газу**  
 $f=100$  Гц;  $P=250$  МВт;  $Q=100$  Мвар;  $P.1 - T_{x.r.}=34^{\circ}\text{C}$ ;  
 $P.2 - T_{x.r.}=36^{\circ}\text{C}$ ;  $P.3 - T_{x.r.}=41^{\circ}\text{C}$ ;  $P.7 - T_{x.r.}=43^{\circ}\text{C}$



**Зміна режимів**  
 $f=4800$  Гц;  $P=250$  МВт;  $T_{x.r.}=41^{\circ}\text{C}$ ;  $P.3 - Q=100$  Мвар;  
 $P.4 - Q=120$  Мвар;  $P.5 - Q=140$  Мвар;  $P.6 - Q=160$  Мвар



**Зміна режимів**  
 $f=2400$  Гц;  $P=250$  МВт;  $T_{x.r.}=41^{\circ}\text{C}$ ;  $P.3 - Q=100$  Мвар;  
 $P.4 - Q=120$  Мвар;  $P.5 - Q=140$  Мвар;  $P.6 - Q=160$  Мвар



**Зміна температури холодного газу**  
 $f=4800$  Гц;  $P=250$  МВт;  $Q=100$  Мвар;  $P.1 - T_{x.r.}=34^{\circ}\text{C}$ ;  
 $P.2 - T_{x.r.}=36^{\circ}\text{C}$ ;  $P.3 - T_{x.r.}=41^{\circ}\text{C}$ ;  $P.7 - T_{x.r.}=43^{\circ}\text{C}$

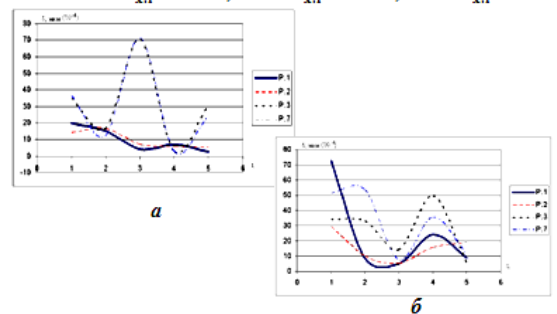


Рис. 7

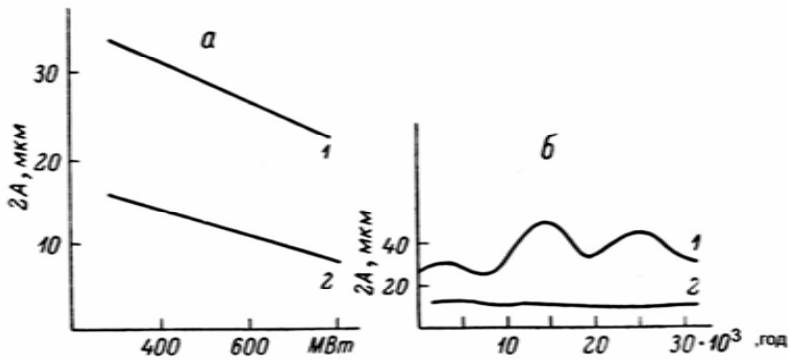


Рис. 8

стю 1,7 кВт при моделюванні основних дефектів: замикання витків обмотки статора, вироблення підшипників, пошкодження стержнів короткозамкненої обмотки ротора. Показано високу чутливість запропонованих параметрів для визначення якості ремонту. Це видно із даних табл. 5. Дані КЗ і ХХ дають змогу також, окрім вказаних, визначити інші дефекти, такі як пошкодження міжлистової ізоляції шихтованого статора, деформація повітряного проміжку машин та ін.

Таблиця 5

Вид пошкодж.	$I_0$ , (А)	$P_0$ , (Вт)	$R_0$ , (Ом)	$X_0$ , (Ом)	$P_{k_2}$ , (Вт)	$R_{k_2}$ , (Ом)	$X_{k_2}$ , (Ом)	
Без пошкоджень	5,05	648	8,47	42,73	611	8,32	8,6	
КЗ витки	5,16	816	10,2	41,4	614	9,09	9,56	
Дефект підшипн.	4,9	600	8,34	44,13	630	8,69	12,94	
Вид пошкодж.	$\cos \varphi$	$P_{I_1}$ , (кВт)	$P_{см_1}$ , (Вт)	$P_{эл_1}$ , (Вт)	$P_{эл_2}$ , (Вт)	$P_{доб_1}$ , (Вт)	$P_1$ , (Вт)	$P_2$ , (кВт)
Без пошкодж.	0,66	2,7	319	496	117,7	13,5	946,1	1,755
КЗ витки	0,645	2,639	472	496	120,5	13,2	1100	1,538
Дефект підшипн.	0,597	2,443	290,3	496	134	8,9	932,2	1,51

Отже, замовнику необхідно вимагати у ремонтних підприємств надавати дані випробувань у режимах КЗ і ХХ, а за розробленою методикою можна визначити якість проведених ремонтів або новий паспорт АД при незворотних дефектоутвореннях.

Розроблено та обґрунтовано новий пристрій для контролю та діагностики ушкоджень короткозамкненої обмотки ротора двигунів [3]. Пристрій ґрунтується на індукційному методі і має достатню чутливість при виявленні одиночних і групових розривів стержнів обмотки ротора. Пристрій може використовуватися як в умовах поточного виробництва, так і при ремонтах роторів АД. Загальний вигляд пристрою контролю і діагностики показано на рис. 9, де позначено: 1 – ротор; 2 – магнітопровід індуктора пристрою; 3 – вимірювальна обмотка; 4 – обмотка збудження пристрою.

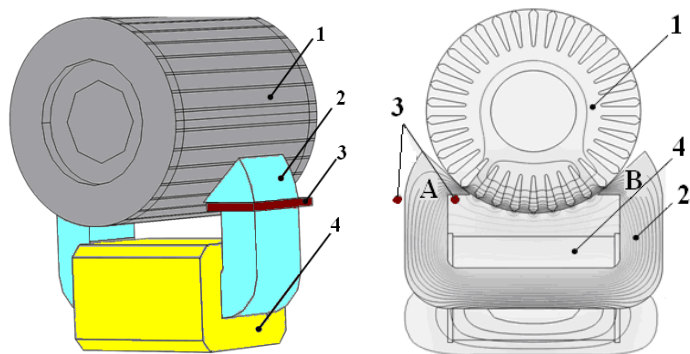


Рис. 9

Протягом звітного періоду подано три заявки на винаходи. Результати роботи можуть бути впроваджені на з-ді «Електроважмаш» та на електрогенеруючих підприємствах.

1. Глебов И.А., Данилевич Я.Б. Научные основы проектирования турбогенераторов. – Л.: Изд. "Наука", 1986. – 185 с.

2. Пат. України на винахід № 303. Статор електричної машини / Смородін В.І., Крамарський В.А., Черемісов І.Я., Кузьмін В.В., Ракогон В.Г. – Опубл. 30.04.1993. Бюл. № 1.
3. Пат. України на корисну модель № 69276. Пристрій для діагностики дефектів литої короткозамкненої обмотки ротора асинхронного двигуна / Васьковський Ю.М., Коваленко М.А. – Опубл. 25.04.2012. Бюл. № 8.
4. Пат. України на корисну модель № 75678. Статор електричної машини / Титко О.І., Крамарський В.А., Черемісов І.Я. – Опубл. 10.12.2012. Бюл. № 23.
5. Пат. України на корисну модель № 82741. Статор електричної машини / Титко О.І. – Опубл. 12.08.13. Бюл. № 15.
6. Пат. України на корисну модель № 83733. Статор електричної машини / Титко О.І., Крамарський В.А., Кучинський К.А. – Опубл. 25.09.13. Бюл. № 18.
7. Титко В.О. Моделювання електромагнітних сигналів та експериментальне дослідження діагностики шихтованого магнітопроводу статора турбо- і гідрогенераторів // Гідроенергетика України. – 2013. – № 3-4. – С. 24–27.
8. Титко А.И., Васьковский Ю.Н. Математическое моделирование вихревых токов и потерь в крайних пакетах сердечника статора турбогенератора // Техн. электродинамика. – 2013. – № 3. – С. 50–57.

УДК 621.313

**А.И. Титко**, чл.-корр. НАН Украины  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

#### **Способы повышения надежности энергетических электрических машин**

*Проведены исследования физических процессов в электрических машинах, в т.ч. при наличии дефектов. Предложены и научно обоснованы новые способы изготовления элементов торцевых зон генераторов и средств функционального мониторинга электрических машин, которые повышают надежность их эксплуатации.* Библ. 8, рис. 9, табл. 5.

**Ключевые слова:** генератор, двигатель, надежность, физическая модель, математическая модель, экраны статора, нажимные пальцы, диагностика, физические процессы.

#### **O.I.Titko**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

#### **The ways of increase of reliability of the power electric machines**

*Had conducted research of physical process in electric machines, including in the case of defects. Offered and scientifically grounded new ways to end zones generators and means of monitoring of electric machines, which increase the reliability of their operation.* References 8, figures 9, tables 5.

**Key words:** generator, motor, reliability, physical model, mathematical model, screens stator, press fingers, diagnostics, physical processes.

Надійшла 21.04.2014

Received 21.04.2014