

8. Пат.303 Україна. Статор електричної машини / В.І. Смородін, В.А. Крамарський, І.Я. Черемісов, В.В. Кузьмін. – Опубл. 30.04.93. Бюл. № 1.

УДК 621.313

**А.І. Титко**<sup>1</sup>, докт. техн. наук, **В.А. Крамарський**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, **К.А. Кобзарь**<sup>3</sup>, гл. констр.

1,2 – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ - 57, 03680, Україна

3 – завод «Електротяжмаш»,

Харьков, Україна

### **Методика оцінки рівня нагрівання елементів решітчатого екрана на торці статора потужного турбогенератора**

*Представлена нова методика розрахункової оцінки рівня нагрівання елементів решітчатого екрана на торці статора потужного турбогенератора для захисту крайніх пакетів статора від електромагнітних полів дисипації, розроблена в відділі моделювання машин переменного току Інституту електродинаміки НАН України в 2014 році. Отримані нові наукові результати щодо рівня нагрівання елементів різних варіантів конструкції решітчатого екрана в номінальному режимі. Методика дозволяє на стадії ескизного проектування вибирати найбільш ефективний варіант його конструкції. Бібл. 8, рис. 3, табл. 2.*

**Ключові слова:** турбогенератор, торцева зона статора, електромагнітні втрати, температура.

**О.І. Titko**<sup>1</sup>, **V.A. Kramarsky**<sup>2</sup>, **K.A. Kobzar**<sup>3</sup>

1, 2 – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy, 56, Kyiv-57, Ukraine

3 – SE plant Electrovazhmash,

Kharkiv, Ukraine

### **The technique of estimation of a level of heating of the elements of electromagnetic lattice screen on the stator end face of powerful turbogenerator**

*Presented new technique estimates a level of heating of the elements of electromagnetic lattice screen on the stator end face of powerful turbogenerator for protecting the extreme packet of a stator core from electromagnetic fields dissipation. New scientific results relative to level of heating of the elements of different design options lattice screen in the nominal mode were obtained. The technique allows in the preliminary design phase select the most effective variant of design for protect the extreme packet of a stator core from electromagnetic fields dissipation. References 8, figures 3, tables 2.*

**Key words:** turbogenerator, stator core, electromagnetic losses, temperature, electromagnetic screen.

Надійшла 6.04.2015

Received 6.04.2015

УДК.621.313

## **ВПЛИВ ВИТКОВИХ ЗАМИКАНЬ ОБМОТКИ СТАТОРА НА РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ**

**М.С. Гуторова**, інж. 1-ї кат.

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

*У відділі моделювання машин змінного струму Інституту електродинаміки НАН України у 2014 році досліджено особливості залежностей струмів, напруг, втрат і ковзання від навантаження асинхронного двигуна при різній кількості замкнених витків обмотки статора. Розглянуто вплив виткових замикань обмотки статора на розподіл та величину магнітної індукції в зубцях у зоні дефекту та за межами її залежно від навантаження. Запропоновано для ідентифікації дефектів ефективні чутливі діагностичні параметри і процедури. Виявлено області навантажень асинхронного двигуна, коли коефіцієнти чутливості набувають максимальних значень. Бібл. 5, рис. 7, табл. 5.*

**Ключові слова:** асинхронний двигун, обмотка статора, замкнені витки обмотки, фазні струми, втрати, напруги, ковзання, потужність, діагностика, коефіцієнти чутливості.

Виткові замикання обмоток асинхронних двигунів (АД) є найбільш поширеними дефектами і причиною відмов машин. Завчасне визначення наявності таких дефектів під час роботи – це важливий фактор надійної роботи двигунів, продовження їх ресурсу. І хоча про-

блемі діагностування АД приділяється велика увага з боку вчених і спеціалістів [1-5], на практиці їх створення і експлуатації більше застосовується тестовий контроль. Здійснюються технічний моніторинг машин при виготовленні та під час їх зупинок в експлуатації і значно менший обсяг функціонального діагностування, тобто моніторингу в процесі роботи двигунів з контролем параметрів і характеристик, які властиві процесам, що супроводжують роботу машин, та визначення і прогнозування технічного стану машин. Тому в цій роботі проведено дослідження робочих характеристик АД при зародженні й розвитку таких дефектів обмотки статора (ОС), як виткові замикання (ВЗ) в одній із фаз для виявлення особливостей впливу цих явищ на вказані характеристики та пошуку чутливих діагностичних параметрів для визначення кількості та місця знаходження ВЗ. Особливо важливим такий напрямок діагностування є для регульованих двигунів.

Дослідження проводились на фізичному стенді, створеному на базі АД типу А62-12/8/6/4 з паспортними даними:  $P_n = 1,7$  кВт;  $f = 50$  Гц;  $U_n = 380$  В;  $2p = 12$ ;  $I_n = 6,2$  А;  $\eta = 63$  %,  $n = 460$  об/хв;  $\cos\phi = 0,66$ ;  $M_n = 45$  Н·м;  $m = 3$ .

Виткові замикання обмотки статора АД здійснювались у лобових частинах. При цьому вимірювались і розраховувались такі величини:  $U_3$ ,  $I_3$  – напруга і струм в замкненій частині фази обмотки,  $n_3$  – кількість замкнених витків,  $r_3$  – опір замкнених витків.

За допомогою комп'ютера і цифрового осцилографа вимірювались миттєві значення струмів і напруг в ОС, магнітної індукції в повітряному проміжку машин. Для побудови і дослідження робочих характеристик вимірювались діючі значення напруг, струмів, втрати у фазах ОС, швидкість обертання ротора. АД досліджувались при чотирьох технічних станах – при відсутніх дефектах в ОС та для трьох варіантів замикання обмотки. В табл. 1 наведено характеристики варіантів випробування експериментального АД при замиканні витків обмотки статора ( $U_3$  наведено для  $U = 220$  В у режимі ХХ).

Таблиця 1

№ вар.	$n_3$	$n_3 / W_\phi$ , %	$n_3 / W_{\phi p}$ , %	$U_3$ , В
1	32	4,5	26,0	10,2
2	22	3,1	18,6	6,86
3	9	1,3	7,8	2,82

Проведемо аналіз експериментальних даних. Значення фазних напруг не суттєво змінювались при зміні навантажень. На рис. 1, 2 зображено залежність струмів у фазах від навантаження на валу для умовно бездефектного та для АД з витковим замиканням ОС (вид замикання № 1). А на рис. 3, 4 показано залежність фазних втрат від навантаження на валу для умовно бездефектного та для АД з витковими замиканнями ОС (вид замикання № 1). Криві для фазних струмів та для потужностей підтверджують той факт, що при випробуванні АД з дефектною ОС мало місце виткове замикання у фазі В обмотки. Струм і втрати у цій фазі при всіх навантаженнях вищі за значення цих величин в інших фазах. Струм та потужність при підвищених навантаженнях у фазі С також зростають при ВЗ, оскільки замкнені витки фази В та С знаходяться в одних пазах. Адже обмотка статора такого АД двохшарова. Магнітне поле замкненої частини фази ОС є пульсуючим. Воно суттєво впливає і на локальну деформацію поля в проміжку та магнітопроводі статора машин і взагалі на сумарне поле в повітряному проміжку, а через нього і на робочі характеристики АД як для окремих фаз, так і в цілому для обмотки (рис. 2), що відображається на процесах не лише в фазі з замкненим витком, а й у решті фаз.

Порівняльний аналіз залежностей  $I$  і  $P$  від навантаження для кожної окремої фази ОС показує, що максимальні відмінності цих величин при різних навантаженнях при двох розглянутих технічних станах АД мають місце в фазі В ОС. Причому ці відмінності збільшуються зі зростанням кількості замкнених витків. Ці результати підтверджують можливість визначити місце і кількість замкнених витків ОС АД.

Розглянемо тепер як залежить чутливість того чи іншого діагностичного параметра від навантаження АД. Введемо такі коефіцієнти чутливості:  $K_{P\phi} = \frac{P_{\phi d}}{P_{\phi b}}$ ,  $K_{I\phi} = \frac{I_{\phi d}}{I_{\phi b}}$ , де індекс д – належить до АД з дефектом; б – до умовно бездефектної машини.

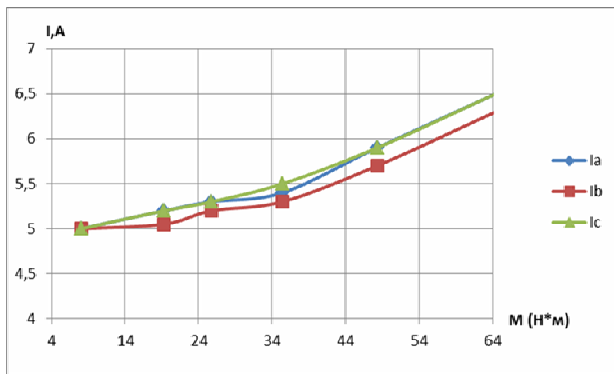


Рис. 1

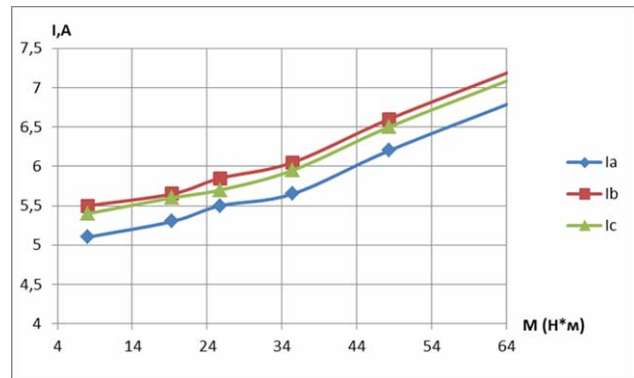


Рис. 2

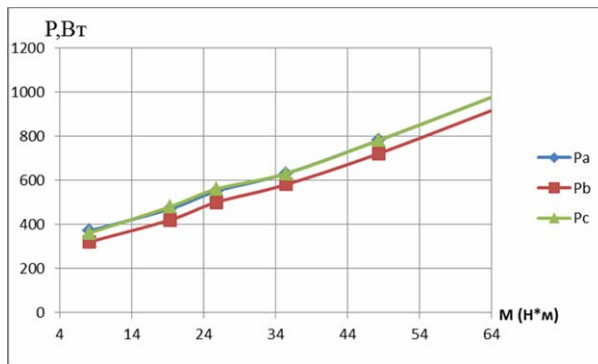


Рис. 3

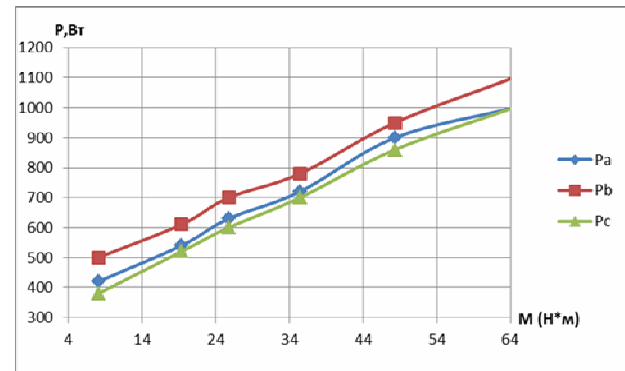


Рис. 4

У табл. 2 наведено залежність коефіцієнтів чутливості діагностичних параметрів  $P_\phi$  та  $I_\phi$  від навантаження на валу. Аналіз даних, наведених у табл. 2, підтверджує викладене раніше. Величини  $P_\phi$  і  $I_\phi$  для АД з дефектом ОС максимально змінюються в фазі В.

Чутливість діагностичних параметрів  $P$  і  $I$  змінюється також і від навантаження. Особливо це видно для втрат у фазах ОС. Існує область навантажень, де коефіцієнт чутливості стає максимальним.

Таблиця 2

M, Н·м	8,05	19,32	25,76	35,42	48,30	64,40
$K_{IA}$	1,02	1,02	1,04	1,05	1,05	1,05
$K_{IB}$	1,10	1,12	1,13	1,14	1,16	1,14
$K_{IC}$	1,08	1,08	1,08	1,08	1,10	1,09
$K_{pA}$	1,14	1,15	1,15	1,14	1,15	1,02
$K_{pB}$	1,56	1,45	1,40	1,34	1,32	1,20
$K_{pC}$	1,06	1,08	1,07	1,11	1,10	1,02
$\Delta I_A$	0,10	0,10	0,20	0,25	0,30	0,30
$\Delta I_B$	0,50	0,60	0,65	0,75	0,90	0,90
$\Delta I_C$	0,40	0,40	0,40	0,45	0,60	0,60
$\Delta P_A$	50,00	70,00	80,00	90,00	120,00	20,00
$\Delta P_B$	180,00	190,00	200,00	200,00	230,00	180,00
$\Delta P_C$	20,00	40,00	40,00	70,00	80,00	20,00
$K_{\Delta IA}$	1,96	1,89	3,64	4,42	4,84	4,41
$K_{\Delta IB}$	9,09	10,62	11,11	12,40	13,64	12,50
$K_{\Delta IC}$	7,41	7,14	7,02	7,56	9,23	8,45
$K_{\Delta PA}$	11,90	12,96	12,70	12,50	13,33	2,00
$K_{\Delta PB}$	36,00	31,15	28,57	25,64	24,21	16,36
$K_{\Delta PC}$	5,26	7,69	6,67	10,00	9,30	2,00

На рис. 5 показано залежність коефіцієнта чутливості діагностичного параметра  $I_\phi$  у трьох фазах від навантаження на валу. Характер кривих залежностей коефіцієнтів чутливості вказує на те, що найбільш прийнятним є діагностичний параметр  $P_\phi$ , а коефіцієнти чутливос-

ті стають максимальними при номінальній потужності двигунів. Показано також, що існують локальні максимальні проявлення цих діагностичних параметрів.

Цікаво розглянути різницю  $\Delta P_\phi = P_{\phi д} - P_{\phi б}$  як діагностичну ознаку, залежність якої від навантаження на валу наведено в табл. 2. Очевидно, що для бездефектної машини ця величина близька до нуля. Отже, чим більш розвинутий дефект ОС, тобто чим більша кількість замкнених витків фази, тим більша вказана різниця.

Це видно з даних таблиці. Очевидно, що зі збільшенням навантаження АД величина  $\Delta P_\phi$  зростає. Це зростання спостерігається в усіх фазах ОС.

Отже, якщо за діагностичну ознаку вибрати  $\Delta P_\phi$ , то найбільш ефективним буде спосіб діагностування за цією ознакою в режимі номінального навантаження. Можна розглядати аналогічно величину  $\Delta I_\phi$  як діагностичну ознаку. Як правило, в діагностуванні застосовуються діагностичні ознаки як безрозмірні величини. Тому введемо коефіцієнт чутливості для  $\Delta P_\phi$  як  $K_{\Delta P_\phi} = \frac{\Delta P_\phi}{P_{\phi б}} \cdot 100, \%$ . Однак при такому підході до діагностування характер залежності коефіцієнтів  $K_{\Delta P_\phi}$ ,  $K_{P_\phi}$  є ідентичним.

На основі вимірювання швидкості обертання ротора визначались значення ковзання. На рис. 6 показано залежність ковзання від навантаження на валу в двох технічних станах АД: бездефектний та при витковому замиканні ОС (тип замикання № 1). Аналіз залежностей ковзання від навантаження для різних технічних станів АД показує, що зі зростанням навантаження при виткових замиканнях ковзання  $s$  зростає швидше, ніж у бездефектній машині. Якщо

ковзання  $s$  прийняти за діагностичний параметр, то його коефіцієнт чутливості  $K_s = \frac{S_d}{S_б}$  зростає з ростом навантаження. Залежність коефіцієнтів чутливості діагностичних параметрів  $s$  і  $\Delta s$  зведено в табл. 3. Як діагностичну ознаку можна прийняти різницю  $\Delta s = S_d - S_б$ . Залежності коефіцієнтів чутливості  $K_{\Delta s} = \frac{\Delta s}{S_б}$  і  $K_s$  від навантаження мають несуттєві відмінності.

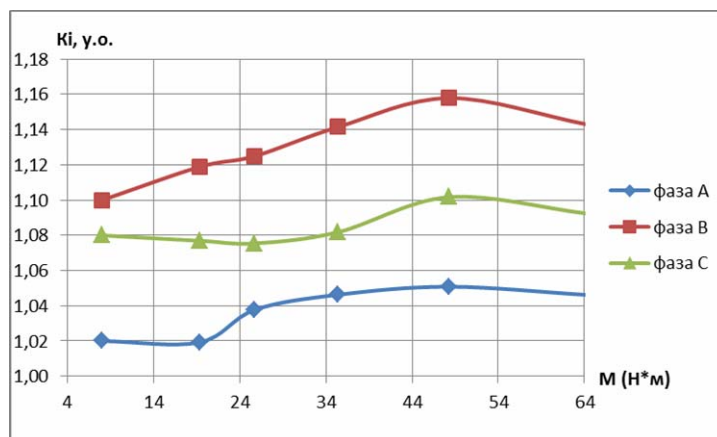


Рис. 5

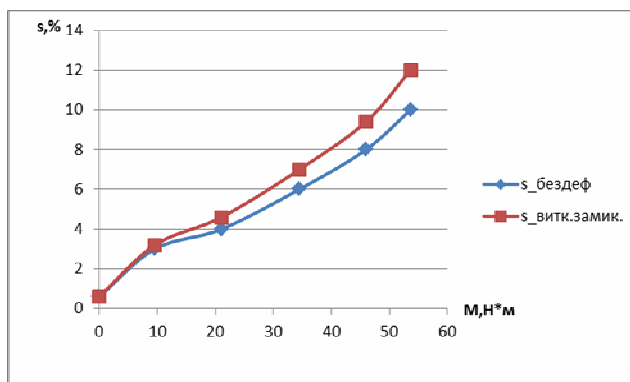


Рис. 6

Таблиця 3

$P_{\text{навант.}}$ , Н·м.	0	9,58	21,08	34,50	46,00	53,67
$K_s$	1	1,07	1,15	1,17	1,18	1,20
$\Delta s$ , %	0	0,2	0,6	1	1,4	2
$K_{\Delta s} \cdot 100$ , %	0	6,25	13,04	14,29	14,89	16,67
$S_б$ , %	0,6	3	4	6	8	10
$S_д$ , %	0,6	3,2	4,6	7	9,4	12

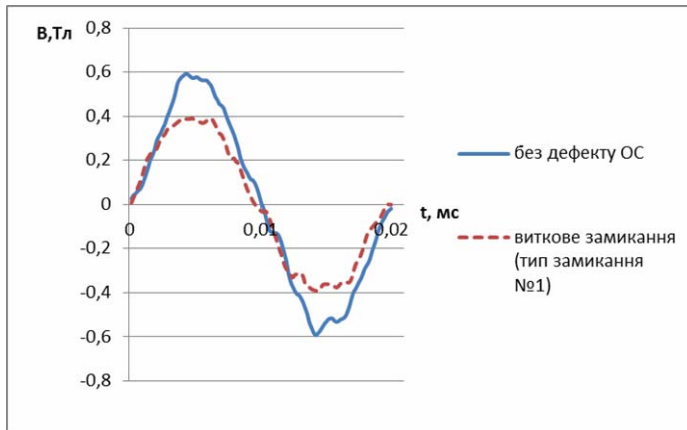


Рис. 7

Оскільки вплив магнітного поля замкненої частини ОС є визначальним для зміни технічних характеристик АД, досліджено поле в зубцях, розміщених у зоні замкнених витків обмотки (датч. № 3) і далеко від цієї зони (датч. № 1, 4). Для цього на зубцях статора встановлено витки для вимірювання наведеної в них ЕРС і визначення індукції в зубцях.

У зв'язку з несинусоїдальним характером кривих індукції у табл. 4 наведено розмах магнітної індукції (Тл) у повітряному зазорі для двох технічних

станів АД залежно від навантаження на валу. З таблиці видно, що індукція в зубці, який знаходиться в зоні дії магнітного поля замкненої частини, значно менша, ніж у інших зубцях. Причому індукція в зоні впливу поля замкненої частини зменшується швидше зі збільшенням навантаження.

Таблиця 4

Тип дефекту	Двигун без дефектів			Тип замикання №1		
	дат. № 1	дат. № 3	дат. № 14	дат. № 1	дат. № 3	дат. № 14
$P_{\text{навант.}}$ Н·м.						
9,58	1,672	1,672	1,672	1,672	1,14	1,672
21,08	1,52	1,52	1,52	1,52	1,064	1,52
34,5	1,482	1,482	1,482	1,482	1,026	1,482
46	1,444	1,444	1,444	1,444	0,95	1,444
53,6	1,406	1,406	1,406	1,406	0,836	1,406

Отже, магнітна індукція в зубцях є досить ефективним діагностичним параметром.

Якщо ввести коефіцієнт чутливості як  $K_B = \frac{B_0}{B_d}$ , то в режимі ХХ значення  $K_B$  становить 1,4.

Тоді як при навантаженні, рівному половині від номінального,  $K_B$  зростає до 1,7 (табл. 5).

Отже, чутливість діагностичного параметра ВЗ ОС АД зростає зі збільшенням навантаження.

З кривих на рис. 7, де представлено магнітну індукцію в зубці (датч. № 3) при навантаженні на валу  $P = 53,7$  Н·м, видно, що в зоні дії магнітного поля замкненої частини ОС АД

вищі гармоніки більше проявляються порівняно з варіантом умовно бездефектної машини. Чим менше навантаження АД, тим це проявлення сильніше. Вищі гармоніки стають максимальними в режимі ХХ.

Таблиця 5

$P_{\text{навант.}}$ Н·м	9,58	21,08	34,5	46	53,6
$K_B = B_{\text{бездеф}}/B_{\text{деф}}$	1,47	1,43	1,44	1,52	1,68

## Висновки

1. Проведено експериментальні дослідження робочих характеристик АД при зародженні та розвитку дефектів ОС, а саме при зміні кількості замкнених витків у одній з фаз обмотки. Отримано нові дані щодо впливу виткових замикань на робочі характеристики двигуна, виявлено ряд особливостей такого впливу. Запропоновано та науково обґрунтовано чутливі діагностичні ознаки для ідентифікації місця знаходження і кількості замкнених витків обмотки.

2. Показано особливості впливу пульсуючого магнітного поля замкненої частини ОС на магнітну індукцію в зубцях  $B_z$  залежно від їх розміщення по відношенню до замкнених витків та від навантаження.

3. Введено та досліджено у різних режимах навантаження АД коефіцієнти чутливості для діагностичних параметрів  $P_\phi$ ,  $I_\phi$ ,  $\Delta P_\phi = P_{\phi d} - P_{\phi 0}$ ,  $B_z$ ,  $S$ ,  $\Delta S = S_d - S_0$ . Виявлено області на-

вантажень АД, коли коефіцієнти чутливості набувають максимальних значень. Так, при появі та розвитку дефектів магнітна індукція в зоні замкнених витків зменшується і ступінь зменшення зростає зі збільшенням навантаження, а вищі гармоніки посилюються. Запропоновані діагностичні параметри, ознаки і процедури дають можливість досить достовірно ідентифікувати на ранній стадії розвитку дефектів ОС навіть при незначній кількості замкнених витків, тобто здійснювати раннє діагностування, підвищити надійність роботи асинхронних двигунів, особливо регульованих.

1. *Вайнреб К.* Диагностика неисправностей ротора асинхронного двигателя методом спектрального анализа токов статора // *Электричество*. – 2012. – № 7. – С. 51–57.
2. *Гольдберг О.Д.* Автоматизация контроля параметров и диагностика асинхронных двигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 159 с.
3. *Крупенин Н.В., Голубев А.В., Завидей В.И.* Новые возможности в диагностике электрических машин // *Электричество*. – 2011. – № 9. – С. 45–48.
4. *Экспертная система* контроля технического состояния вращающихся машин [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.diacs.com/ru/article.php>. (дата обращения: 29.11.2012).
5. *William T.T., Fenger M.* Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults // *IEEE Industry Application Magazine*. – 2001. – № 7. – P. 23–29.

УДК.621.313

**М.С. Гуторова**, инж. 1 кат.

Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

#### **Влияние витковых замыканий обмотки статора на рабочие характеристики асинхронных двигателей**

*В отделе моделирования машин переменного тока Института электродинамики НАН Украины в 2014 году проведен поиск новых чувствительных диагностических параметров регулируемых асинхронных двигателей при витковых замыканиях обмотки статора. Для достижения этой цели проведены экспериментальные исследования на физическом стенде, созданном на базе асинхронного двигателя. Для измерения магнитной индукции на торце статора по всей окружности установлены датчики поля. Исследованы особенности зависимости токов, напряжений, потерь и скольжения от нагрузки асинхронного двигателя при разном количестве замкнутых витков обмотки статора. Рассмотрено влияние витковых замыканий обмотки статора на распределение и величину магнитной индукции в зубцах в зоне дефекта и за пределами его в зависимости от нагрузки. Для идентификации дефектов предложены эффективные чувствительные диагностические параметры и процедуры. Определены области нагрузок асинхронного двигателя, когда коэффициенты чувствительности достигают максимальных значений. Библ. 5, рис. 7, табл. 5.*

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, обмотка статора, замкнутые витки обмотки, фазные токи, потери, напряжения, скольжение, мощность, диагностика, коэффициенты чувствительности.

**M.S. Gutorova**

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

#### **The impact of short circuits of the stator winding at operating characteristics of induction motors**

*Work is devoted to search of new sensitive diagnostic parameters of adjustable asynchronous engines at winding short circuits of a winding stator. For achievement of the given purpose experimental researches at the physical stand, created are lead on the basis of the asynchronous engine. For measurement of a magnetic induction at an end face stator on all circle gauges of a field are established. Features of dependence of currents, pressure, losses and slidings from loading of the asynchronous engine are investigated at different quantit of the closed coils of a winding stator. Influence winding short circuits of a winding stator on distribution and size of a magnetic induction in зубцах in a zone of defect and outside it is considered, depending on loading. Effective, sensitive diagnostic parameters and procedures are offered for identification of defects. Areas of loadings of the asynchronous engine when factors of sensitivity reach the maximal values are determined. References 5, figures 7, tables 5.*

**Key words:** induction motor, stator winding, closed the coils of the winding phases, currents, loss, stress, slip, power, diagnosis, sensitivity coefficients.

Надійшла 11.03.2015

Received 11.03.2015