

Межа витривалості для матеріалу призм становить 430 МПа. Тоді запас межі витривалості призм дорівнює  $430/152,7884 = 2,81435$ . З даних табл. 4 видно, що критичний (нестабільний) стан починається з 11 обривів стяжних призм у номінальному режимі, а при врахуванні динамічних навантажень – з 8, 9 пошкоджень призм. Після цього відбувається незворотне руйнування шийки стяжних призм.

1. *Абрамов А.И., Извенов В.И., Серихин Н.А.* Проектирование турбогенераторов. – М.: Высш. шк., 1990. – 336 с.
2. *Мильников О.В.* Опір матеріалів: Конспект лекцій. – Тернопіль: Вид-во ТНТУ, 2010. – 257 с.
3. *Мистецкий В.А.* Математическая модель и методика расчета усилий в стяжных призмах сердечника статора турбогенератора при наличии дефектов на основе метода абсолютно твердого тела // Пр. Ін-ту електродинаміки НАНУ: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2013. – Вип. 34. – С. 34–41.
4. *Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В.* Опір матеріалів: Підручник / За ред. Г.С. Писаренка. – К.: Вища шк., 1988. – 736 с.
5. *Фесик С.П.* Справочник по сопротивлению материалов. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Будівельник, 1982. – 280 с.

УДК 621.313

**А.И. Титко**, чл.-корр. НАН Украины, **В.А. Мистецкий**, инж.

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

**Анализ влияния количества разрушенных шпилек статора турбогенератора на механические характеристики стяжных призм**

*Разработана методика и проведено исследование влияния количества поврежденных стяжных призм статора турбогенератора на изменение напряженно-деформированного состояния других стяжных призм на основе метода абсолютно твердого тела. Библ. 5, рис. 3, табл. 5.*

**Ключевые слова:** *стяжная призма, шпилька призмы, статор, турбогенератор, механические напряжения, абсолютно твердое тело.*

**O.I. Tytko, V.A. Mystetckiy**

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

**Analysis of influence quantity destroy pins of stator turbogenerator in the mechanical characteristics of a tightening prism**

*Has been elaborated method and has been studied the influence of the number of corrupted tightening prisms of turbogenerator stator on the change of the stress-strain state in the other tie tightening prisms on the basis of the method of absolutely solidbody. References 5, figures 3, tables 6.*

**Key words:** *tightening prism, stator, hairpin of prism, turbogenerator, mechanical tensions, absolutely solidbody.*

Надійшла 29.12.2014

Received 29.12.2014

УДК 621.313

## МОДЕЛЮВАННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ В ПРОМІЖКУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ЗА ВИТКОВИХ ЗАМИКАНЬ ОБМОТКИ СТАТОРА

**М.С. Гуторова**, інж. 1 кат.,

Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Перемоги, 56, Київ – 57, 03680, Україна  
e-mail: ma\_gu@ukr.net

*Наведено методику розрахунку впливу дефектів обмотки статора на магнітне поле в повітряному проміжку асинхронних двигунів. Досліджено вплив виткових замикань обмотки статора на індукцію в повітряному проміжку. Проведено розрахункові дослідження впливу ступеня розвитку дефекту обмотки статора на поле в повітряному проміжку асинхронних двигунів типу А62. Розглянуто можливість діагностики виткового замикання неробочої обмотки. Бібл. 4, рис. 5, табл. 3.*

**Ключові слова:** асинхронний двигун, короткозамкнений ротор, математична модель, обмотка статора, компенсоване магнітне поле.

На сьогодні двигуни змінного струму є найбільшими споживачами електричної енергії. Відповідно до останніх досліджень вони споживають понад 80 % електроенергії [3], що виробляється. Однак у процесі експлуатації можуть виникати пошкодження елементів двигуна, що у свою чергу призводить до передчасного виходу його з ладу.

Практика експлуатації асинхронних електродвигунів (АД) показує, що одним з найбільш поширених дефектів є пошкодження статорної обмотки, що виникає з різних причин. Так, замикання витків однієї котушки або її виводів з'являються в результаті зношування ізоляції; обриви в обмотках – внаслідок розпаювання місць з'єднання або механічного псування тонкої обмотки; замикання обмотки на корпус – внаслідок перетирання її ізоляції.

У разі коротких замикань в обмотці утворюються замкнені контури, у яких змінне магнітне поле індукуює значні електрорушійні сили (ЕРС) й струми короткого замикання. Ці струми перегрівають обмотку, в результаті чого обвуглюється ізоляція, з'являється дим і, якщо вчасно не будуть вжиті заходи, розплавляються провідники обмотки й ушкоджується залізо.

Одним з найпоширеніших методів виявлення виткових замикань на практиці залишається метод вимірювання опору ізоляції обмотки або ж вимірювання струмів у фазах [2]. Цей метод має велику кількість недоліків: вимога відключення АД від мережі живлення з попередньою підготовкою робочого місця; необхідність використання зовнішніх джерел постійного чи змінного струмів; значний час проведення діагностичного випробування. Тому він не знайшов широкого застосування в промисловості. Таким чином, задача створення більш ефективного методу контролю виткових замикань в обмотці статора АД лишається актуальною.

Як відомо, під час замикання в обмотках двигуна обертовим магнітним полем в короткозамкненому контурі буде наводитися ЕРС, яка створить великий за величиною струм, що залежить від опору замкненого контура, при цьому пошкоджена фаза буде мати менший опір, ніж виправні. Це призводить до порушення симетрії опорів та струмів у фазах і, як наслідок, до порушення кругового обертового магнітного поля, що в свою чергу викликає збільшення амплітуд вищих гармонік та зменшення амплітуди основної (першої) гармоніки [1].

У цій роботі розглядається можливість діагностики виткових замикань обмотки статора (ОС) на основі аналізу деформованого магнітного поля в проміжку машини або на основі методу компенсації поля в повітряному проміжку, тобто виділення тієї складової поля, що складає деформацію поля внаслідок появи і розвитку дефектів.

Проведемо дослідження впливу дефектів ОС АД на магнітне поле в повітряному проміжку на основі методики [4]. Міжвиткові замикання ОС АД бувають таких типів: замикання витків у одному пазу; замикання витків у лобовій частині обмотки, що належить різним пазам; замикання в багатополісній машині витків, які належать до двох суміжних полюсів; міжфазне замикання витків.

Розглянемо два перших типи, оскільки вони є характерними. Четвертий тип не належить до теми досліджень, оскільки такі дефекти миттєво призводять до виходу з ладу АД.

На рис. 1 показано схему котушкової групи витків, що розташовані в одному пази. Витки можуть бути замкнені в пазу або в лобових частинах (рис. 1 б), наприклад, у точках А, В, С.

Отже, нехай замкнено  $n_3$  сусідніх витки. Тоді струм перейде з першого витка через перемички  $ABC$  на третій виток, змінюючи таким чином струм у цій фазі й створюючи несиметричну трифазну систему струмів. На рис. 2 показано таку електричну схему для струмів у фазі. У цій схемі  $Z_1$  – комплексний опір частини замкнених витків. Загальний опір витків фази обмотки, представлених на рис. 2, становить  $Z_1 + Z_2$ . Чим більше витків замкнено, тим меншим є опір  $Z_2$ . Таким чином, струм у фазі

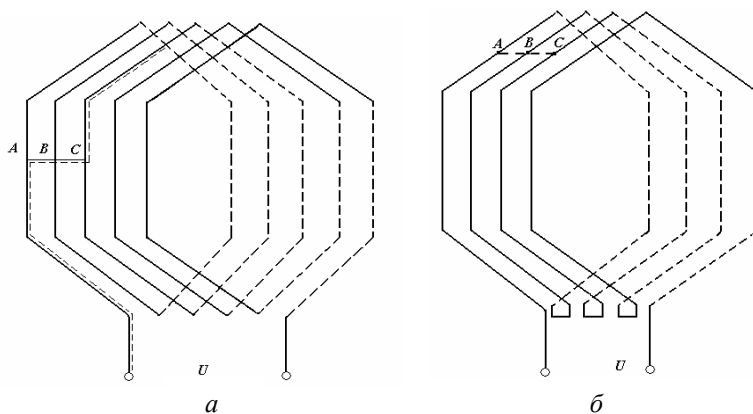


Рис. 1

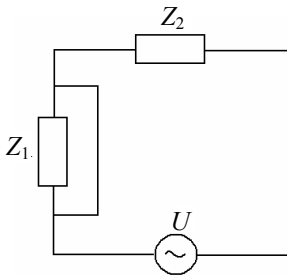


Рис. 2

збільшується при постійній напрузі на затисках фази ОС АД.

Для багатовиткової ОС електричної машини замикання витків у одній з її фаз важко виявити на ранній стадії при незначній кількості замкнених витків на основі контролю зворотної послідовності магнітного поля в повітряному проміжку, оскільки воно складає доли відсотків від прямої послідовності. Як правило, ОС АД має декілька сотень витків, тому такий спосіб є малоефективним для ранньої діагностики при замиканні до десятка витків. Так, зменшення струму в одній з фаз на 10 % призводить до появи зворотної послідовності поля, характери-

стики якого складають всього близько 3 % від прямої послідовності. Тому більш ефективним є спосіб знаходження пульсуючого поля в повітряному проміжку при появі виткових замикань в ОС АД. Коли виникає виткове замикання, з'являється місцевий замкнений контур, який оминає струм фази ОС та в якому наводиться ЕРС і протікають місцеві циркуляційні струми.

Отже, в замкненій частині обмотки не будуть протікати струми обмотки статора. Тому для дослідження поля в цьому випадку будемо розглядати компенсоване магнітне поле, тобто ту частину поля, що привносить зміни в зв'язку з виникненням дефектів. У цьому випадку компенсоване магнітне поле збуджується симетричними струмами на ділянках двох полюсів (рис. 3). Таким чином, якщо відокремити магнітне поле від сумарного магнітного поля при витковому замиканні в одній із фаз магнітного поля умовно-бездефектної машини, то можна отримати поле, що збуджується уявними струмами фази ОС, які протікають по замкнених витках цієї фази. При знаходженні електромагнітного поля в повітряному проміжку машини необхідно розкласти в ряд лінійну густину струму, що пульсує в зоні замкнення витків фази ОС АД.

Наведемо коефіцієнти для розкладання в ряд лінійної густини струму в замкнених витках обмотки статора. З врахуванням того, що розглядається компенсоване поле, та того факту, що хвиля струму статора є біжучою по відношенню до місця виткових замикань, розподіл амплітуди уявного струму буде таким, який показано на рис. 3, а її значення  $I_u$ , при неврахуванні циркуляційних струмів, відповідає значенню струму в фазі, де відбулося виткове замикання:  $\Delta I_c = I_u - I_c$ , де  $I_u$  – циркуляційні струми, що наводяться в замкнених витках.

Тоді коефіцієнти розкладання в ряд матимуть вигляд

$$b_k = \frac{A_{0c}}{k\pi} \left[ \cos k \frac{\pi}{\tau} h_1 - \cos k \frac{\pi}{\tau} (h_1 + h) \right],$$

де  $A_{0c}$  – лінійна густина уявного струму на ділянці замкнених контурів;  $A_{0c} = \frac{\Delta I_c}{h}$ ,  $h$  – ширина замкнених витків.

Вираз для індукції магнітного поля в повітряному проміжку машини  $B_r$  у декартовій системі координат матиме загальний вигляд:

$$B_r = \sum B_{0k} \cdot \sin k \frac{\pi}{\tau} x,$$

де  $B_{0k}$  – коефіцієнти розкладання в ряд Фур'є.

Розрахункові дослідження впливу ступеня розвитку дефектів ОС на поле в повітряному проміжку машини проведемо для АД типу А62 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;  $\cos \varphi = 0,66$ ;  $M_n = 45$  Н·м;  $m = 3$ .

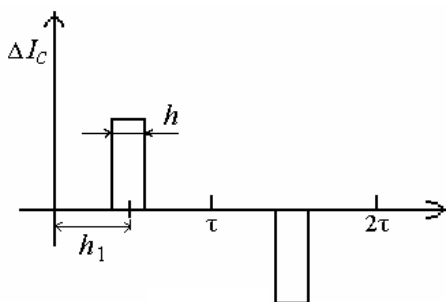


Рис. 3

Розрахунки компенсованого магнітного поля в повітряному зазорі при виткових замиканнях ОС АД наведено в табл. 1 (залежність індукції магнітного поля в повітряному проміжку машини при різній кількості замкнених витків в одному пазу  $h_1 = \tau/2$ ,  $x = \tau/2$ ,  $h = 0,0115$  м) та табл. 2 (залежність індукції компенсованого магнітного поля при зміні величини  $h$  та при  $h_1 = \tau/2$ ,  $w_3 \cdot \Delta I_c = 6,2$  А). Розрахунки для випадку, коли  $I_u \ll I_c$ , представлено на рис. 4, 5. У табл. 1 наведено залежність індукції магнітного поля в

Таблиця 1

$k$	1	3	5	7	9	11
$w_3 \cdot \Delta I_c, A$	6,2					
$B_k$	0,175	0,0358	0,0049	-0,000468	-0,00039	-4,6E-05
$B, Tл$	0,021					
$k$	1	3	5	7	9	11
$w_3 \cdot \Delta I_c, A$	62					
$B_k$	0,175	0,0358	0,049	-0,00466	-0,0039	-4,6 · 10 <sup>-4</sup>
$B, Tл$	0,21					
$w_3 \cdot \Delta I_c, A$	124					
$B, Tл$	0,42					

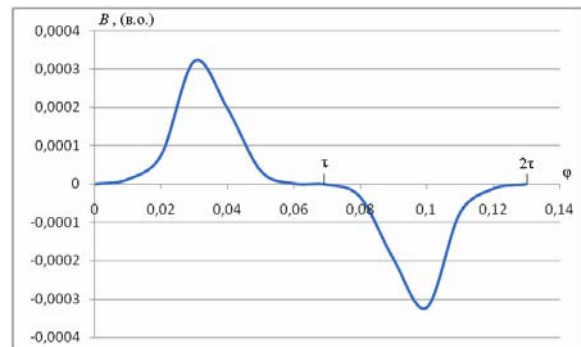


Рис. 4

повітряному проміжку машини при різній кількості замкнених витків одного пазу типу AC –  $n_3 = 1$  виток, 10 витків і 20 витків відповідно.

При розрахунках індукції магнітного поля в повітряному проміжку АД застосовувались коефіцієнти  $k_\delta, k_u$ . Перш за все треба відмітити добру збіжність рядів для величини  $B$ .

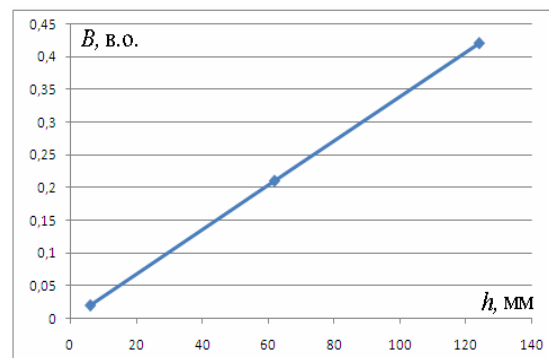
Видно, що зі збільшенням кількості замкнених витків, ампер-витки у витках збільшуються, інтенсивність магнітного поля в повітряному проміжку теж збільшується. Навіть при замиканні одного витка у фазі індукція складає сотні гаусів, що фіксується сучасними вимірювальними засобами. Зі зростанням  $h$  індукція падає.

Дані табл. 3 (залежність індукції компенсованого магнітного поля від величини  $h_1$  при  $h = 0,0115$  м,  $w_3 \cdot \Delta I_c = 6,2$  А) та рис. 5 свідчать про підвищення компенсованого магнітного поля в повітряному проміжку машини при зміщенні місця виткового замикання в бік осі фази обмотки.

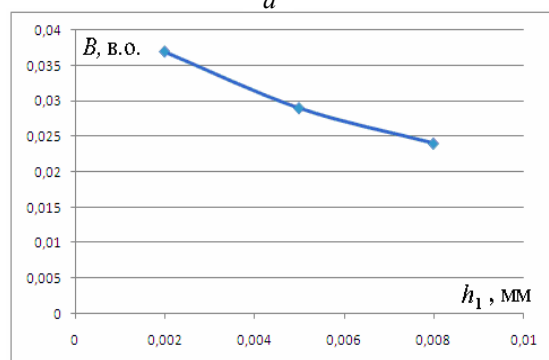
На рис. 4 представлено розподіл індукції компенсованого магнітного поля при витковому замиканні ОС по розточці статора на парі полюсів. Видно, що крива магнітного поля має звужений вигляд до місця дефекту, однак на близько половині сегменту полюсного ділення значення індукції магнітного поля в зазорі є суттєвим.

Для неробочої обмотки модель виткового замикання буде іншою. Коли замикаються витки, то з'являється контур, складений замкненими витками, де протікають циркуляційні струми. Замикання може бути двох типів: може відбуватись в точках A, B, C або лише в точках A, C (рис. 1). Магнітне поле повітряного проміжку наводить в замкненому контурі струми.

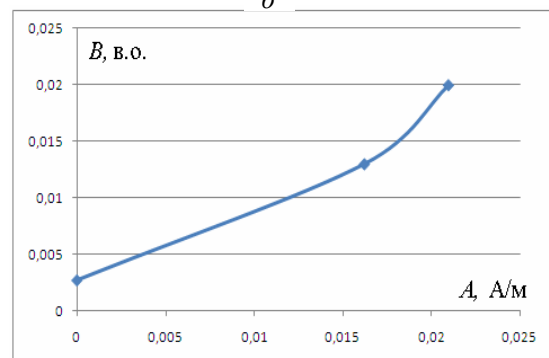
Для визначення струмів, які протікають у замкнених витках, треба додатково розв'язати самостійну задачу розрахунку характеристик магнітного поля. У повітряному проміжку машини з'являється таке саме пульсуюче поле, яке розглянуто вище. Оскільки активний опір замкненої частини ОС суттєво залежить від типу замикань (AC чи ABC), то з'являється можливість для діагностування дефектів у неробочій обмотці нових діагностичних параметрів, пов'язаних, наприклад, з нерівномірністю нагрівання фаз ОС, що спостерігається



a



б



в

Рис. 5

Таблиця 2

$k$	1	3	5	7	9	11
$h_{2,М}$	0,002					
$B_k$	0,0187	0,00615	0,0036	0,0025	0,00183	0,0014
$B, ТЛ$	0,034					
$k$	1	3	5	7	9	11
$h_{2,М}$	0,005					
$B_k$	0,0187	0,0057	0,0029	0,00158	0,000798	$3,08 \cdot 10^{-4}$
$B, ТЛ$	0,0286					
$k$	1	3	5	7	9	11
$h_{2,М}$	0,008					
$B_k$	0,0183	0,00494	0,0018	0,00043	$-1,9 \cdot 10^{-4}$	$-6,54 \cdot 10^{-4}$
$B, ТЛ$	0,0215					

Таблиця 3

$h_{1,М}$	0
$B, ТЛ$	0,0027
$h_{1,М}$	$\tau/4=0,01625$
$B, ТЛ$	0,013
$h_{1,М}$	$\tau/3=0,021$
$B, ТЛ$	0,02

виткового замикання – крива магнітного поля має звужений вигляд до місця дефекту. А отже, якщо на одному з полюсних ділень розмістити три датчики поля, то за значеннями цих датчиків можна діагностувати дефекти обмоток статора АД.

Таким чином, аналіз електромагнітного поля в повітряному проміжку АД дає змогу здійснювати діагностування технічного стану як робочих, так і неробочих обмоток статора.

в експериментах. Аналіз показує, що замикання типу *ABC* більш небезпечне, ніж *AC* у зв'язку з вищими значеннями тепловиділень у замкненій частині внаслідок меншого активного опору.

**Висновки.** За отриманими даними можна зробити наступні висновки. 1. Зі збільшенням кількості замкнених витків в пазу збільшується інтенсивність магнітного поля в повітряному проміжку. 2. Зі зростанням ширини пошкоджених витків індукція падає.

3. На характер зміни поля впливає місце

1. Гашимов М.А., Абдуладзе С.В. Исследование в целях диагностики физических процессов функционирования электрических машин при неисправностях в обмотке статора и ротора // Электротехника. – 2004. – № 2. – С. 20–27.
2. Гемке Р.Г. Неисправности электрических машин. – Л.: Энергия, 1969.
3. Дудышев В.Д. Радикальная экономия электроэнергии переменного тока // Изд. Самарского техн. ун-та, 2007.
4. Тутко О.І., Гуторова М.С. Моделирование та ідентифікація дефектів короткозамкненої обмотки ротора асинхронних електродвигунів // Гідроенергетика України. – 2014. – № 4. – С. 8–12.

УДК 621.313

**М.С. Гуторова**, инж.

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

#### **Моделирование магнитного поля в воздушном зазоре асинхронных двигателей при витковых замыканиях обмотки статора**

Приведена методика расчета влияния дефектов обмотки статора на магнитное поле в воздушном зазоре асинхронных двигателей. Исследовано влияние витковых замыканий обмотки статора на индукцию в воздушном зазоре. Проведены расчетные исследования влияния степени развития дефекта обмотки статора на поле в воздушном зазоре асинхронного двигателя типа А62. Рассмотрена возможность диагностики виткового замыкания нерабочей обмотки. Библи. 4, рис. 5, табл. 3.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, короткозамкнутый ротор, математическая модель, обмотка статора, компенсированное магнитное поле.

**M.S. Gutorova**

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

#### **Modeling the magnetic field in the air gap when winding circuits of the stator winding**

This paper explores the possibility of diagnostics of short circuits in the stator winding based on the analysis of the deformed magnetic field in the air gap of the machine or on the basis of the payment method field in the air gap. The methods of the calculation of the influence of defects of the stator winding of the induction in the air gap. Computational studies have been conducted for asynchronous motor type А62. Also considered diagnostic of the circuit outside of the winding in a multi-speed motors. References 4, figures 5, tables 3.

**Key words:** induction motor, squirrel-cage rotor, mathematical model, stator winding, the offset magnetic field.

Надійшла 18.02.2015

Received 18.02.2015