

го и не зависит в своей работе от электромеханических процессов во втором генераторе, который является ведомым. Предложенный алгоритм управления выходной мощностью ведомого генератора станции обеспечивает выполнение задачи сглаживания выходного тока ведущего генератора. Библ. 9, рис. 3.

Ключевые слова: математическая модель, ведомый асинхронный генератор, вентильное возбуждение, ветровая турбина, сеть, алгоритм.

L.I. Mazurenko, O.V. Dzhura, V.I. Romanenko

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Mathematical model of connected to DC grid wind electric station and induction slave-generator control technique

The mathematical model of a direct current grid connected wind electric station with variable speed wind turbines is given. The station is built of two identical units with inverter excited induction generators. The first generator operates as a master-generator independently of electromechanical processes in the second generator. The second generator operates as a slave-generator. The proposed algorithm of the slave-generator output power control ensures smoothing of master-generator output current. References 9, figure 3.

Key words: mathematical model, induction slave-generator, inverter excitation, wind turbine, grid, algorithm.

Надійшла 12.03.2015

Received 12.03.2015

УДК 621.313

АНАЛІЗ ВПЛИВУ КІЛЬКОСТІ ЗРУЙНОВАНИХ ШПИЛЬОК СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА НА МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТЯЖНИХ ПРИЗМ

О.І. Титко, чл.-кор. НАН України, **В.А. Мистецький**, інж.

Інститут електродинаміки НАН України,

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

Розроблено методіку і проведено дослідження впливу кількості пошкоджених стяжних призм статора турбогенератора на зміну напружено-деформованого стану інших стяжних призм на основі методу абсолютно твердого тіла. Бібл. 5, рис. 3, табл. 6.

Ключові слова: стяжна призма, шпилька призми, статор, турбогенератор, механічні напруження, абсолютно тверде тіло.

У процесі роботи турбогенераторів мають місце пошкодження шпильок (обриви) стяжних призм статора. Процес пошкодження стяжних призм призводить до значних матеріальних і фінансових втрат. Основними причинами пошкоджень є підвищена вібрація і циклічні термомеханічні напруження при змінних режимах навантаження [1]. На рис. 1 показано осереддя статора, де позначено: 1 – натискна плита; 2 – стяжна призма; 3 – пакет активної сталі; 4 – вентиляційний канал; 5 – опорне кільце; 6 – гайка; 7 – кільцева шпонка; 8 – натискний палець; 9 – ступінчасті крайні пакети; 10 – шпилька стяжної призми.

У роботі [3] наводиться проста для використання методіка розрахунку зусиль у шпильках призм статора електричних машин, яка потребує подальшого вдосконалення в напрямку збільшення точності розрахунку та при наявності пошкодження

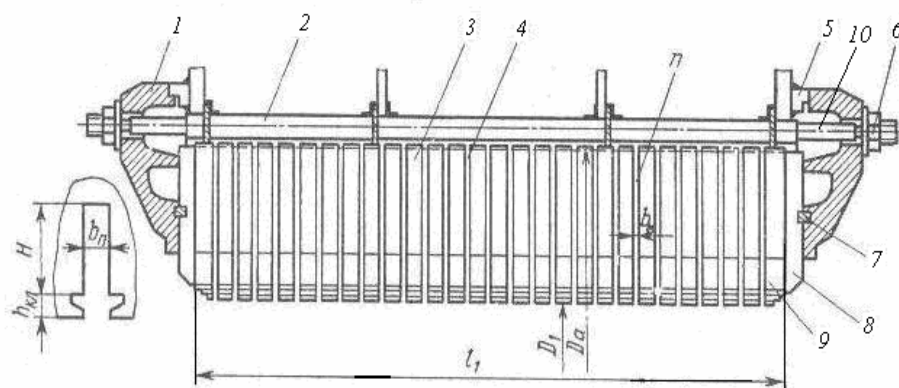


Рис. 1

довільної кількості шпильок $m > 1$.

При математичному розв'язанні цієї задачі розглянуто систему з $N+1$ рівняннями і $N+1$ невідомими, де перші два рівняння – це рівняння рівноваги сил $\sum_{i=1}^N \vec{F}_i = 0$ і моментів сил $\sum_{i=1}^N \vec{M}_i = 0$, N – кількість стяжних призм. Інші рівняння – це рівняння, які виникають з умови, що плита – абсолютно тверде тіло. Запишемо рівняння та знайдемо їх розв'язок при довільній кількості m пошкоджених стяжних призм (рис. 2).

Для отриманих спрощених виразів доцільно розглянути два випадки, коли m – непарне і парне числа. Спочатку розглянемо задачу при непарній кількості обривів m стяжних призм. Сформуємо вказану систему з $N-m+2$ рівнянь і $N-m+2$ невідомих (рис. 2):

$$F_{\frac{m+1}{2}} \cdot \cos\left(\frac{\varphi_{\frac{m+1}{2}}}{2}\right) + F_{\frac{m+3}{2}} \cdot \cos\left(\frac{\varphi_{\frac{m+3}{2}}}{2}\right) + \dots + F_{\frac{N-m+3}{2}} \cdot \cos\left(\frac{\varphi_{\frac{N-m+3}{2}}}{2}\right) + F_{\frac{N-m+1}{2}} \cdot \cos\left(\frac{\varphi_{\frac{N-m+1}{2}}}{2}\right) = 0,$$

$$F_{\frac{m+1}{2}} + F_{\frac{m+3}{2}} + \dots + F_{\frac{N-m+3}{2}} + F_{\frac{N-m+1}{2}} = P,$$

$$F_{\frac{m+1}{2}} = F_0 + k \cdot c \cdot r \cdot \cos\left(\frac{\varphi_{\frac{m+1}{2}}}{2}\right), \quad (1)$$

.....

$$F_{\frac{N-m+1}{2}} = F_0 + k \cdot c \cdot r \cdot \cos\left(\frac{\varphi_{\frac{N-m+1}{2}}}{2}\right),$$

F_i – сили, що діють на призми, де F_0 , k , c – невідомі сталі [3].

Підставивши вирази $F_i = F_0 + k \cdot c \cdot r \cdot \cos(\varphi_i)$ у перше рівняння системи рівнянь (1) та зробивши необхідні тригонометричні перетворення, отримаємо

$$-F_0 \cdot \frac{\sin\left(\frac{m \cdot \pi}{N}\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{N}\right)} + \frac{k \cdot c \cdot r \cdot \left(N - m - \frac{\sin\left(2 \cdot \frac{m \cdot \pi}{N}\right)}{\sin\left(2 \cdot \frac{\pi}{N}\right)}\right)}{2} = 0. \quad (2)$$

Підставивши вирази $F_i = F_0 + k \cdot c \cdot r \cdot \cos(\varphi_i)$ у друге рівняння системи (1) та зробивши перетворення, отримаємо

$$P = F_0 (N - m) - k \cdot c \cdot r \cdot \sin\left(\frac{m \cdot \pi}{N}\right) / \sin\left(\frac{\pi}{N}\right). \quad (3)$$

Розв'язок системи рівнянь (2), (3) буде мати вигляд

$$k \cdot c \cdot r = \frac{2 \cdot P \cdot \frac{\sin\left(\frac{m \cdot \pi}{N}\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{N}\right)}}{(N - m) \left(N - m - \frac{\sin\left(2 \cdot \frac{m \cdot \pi}{N}\right)}{\sin\left(2 \cdot \frac{\pi}{N}\right)}\right) - 2 \cdot \frac{\sin^2\left(\frac{m \cdot \pi}{N}\right)}{\sin^2\left(\frac{\pi}{N}\right)}}; F_0 = \frac{P \left(N - m - \frac{\sin\left(2 \cdot \frac{m \cdot \pi}{N}\right)}{\sin\left(2 \cdot \frac{\pi}{N}\right)}\right)}{(N - m) \left(N - m - \frac{\sin\left(2 \cdot \frac{m \cdot \pi}{N}\right)}{\sin\left(2 \cdot \frac{\pi}{N}\right)}\right) - 2 \cdot \frac{\sin^2\left(\frac{m \cdot \pi}{N}\right)}{\sin^2\left(\frac{\pi}{N}\right)}}. \quad (4)$$

Тепер підставимо значення $k \cdot c \cdot r$ і F_0 у систему рівнянь (1) і отримаємо вирази для сил, що діють на решту призм при обриві шпильок m призм:

$$F_i = F_0 + k \cdot c \cdot r \cdot \cos(\varphi_i) = \frac{P \left(N - m - \frac{\sin\left(2 \cdot \frac{m \cdot \pi}{N}\right)}{\sin\left(2 \cdot \frac{\pi}{N}\right)}\right) + 2 \cdot P \cdot \frac{\sin\left(\frac{m \cdot \pi}{N}\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{N}\right)} \cdot \cos(\varphi_i)}{(N - m) \left(N - m - \frac{\sin\left(2 \cdot \frac{m \cdot \pi}{N}\right)}{\sin\left(2 \cdot \frac{\pi}{N}\right)}\right) - 2 \cdot \frac{\sin^2\left(\frac{m \cdot \pi}{N}\right)}{\sin^2\left(\frac{\pi}{N}\right)}}. \quad (5)$$

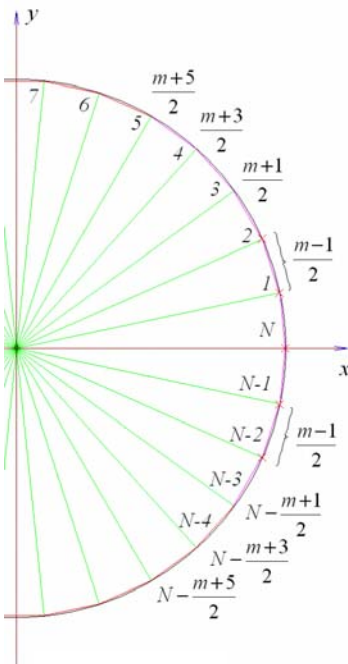


Рис. 2

При непарній кількості обривів стяжних призм $\varphi_i = \frac{2\pi}{N} \cdot i$ (рис. 2).

Максимальна сила в стяжних призмах буде $\frac{m+1}{2}$ і $N - \frac{m+1}{2}$. Враховуючи симетрію системи, $F_{\max} = F_{\frac{m+1}{2}} = F_{N - \frac{m+1}{2}}$. Тоді при $i = \frac{m+1}{2}$

$$F_{\max} = F_{\frac{m+1}{2}} = \frac{P \cdot \left(N - m - \frac{\sin\left(\frac{2m\pi}{N}\right)}{\sin\left(\frac{2\pi}{N}\right)} \right) + 2 \cdot P \cdot \frac{\sin\left(\frac{m\pi}{N}\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{N}\right)} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{N} \cdot (m+1)\right)}{(N-m) \cdot \left(N - m - \frac{\sin\left(\frac{2m\pi}{N}\right)}{\sin\left(\frac{2\pi}{N}\right)} \right) - 2 \cdot \frac{\sin^2\left(\frac{m\pi}{N}\right)}{\sin^2\left(\frac{\pi}{N}\right)}} \quad (6)$$

При парній кількості обривів стяжних призм для забезпечення симетрії система координат переміщується на половину відстані між призмами (рис. 3). При складанні рівнянь (1) номер першої призми за пошкодженими буде $\frac{m}{2} + 1$. Загальний вигляд рівнянь (2), (3) та виразів (5), (6) буде ідентичним для обох розглянутих випадків.

Лише кут φ_i буде іншим (рис. 3), а саме:

$$\varphi_i = \frac{2\pi}{N} \cdot (i - 0,5) \quad (7)$$

При парній кількості обривів стяжних призм максимальна сила буде в стяжних призмах під номерами $\frac{m}{2} + 1$ і $N - \frac{m}{2}$. Враховуючи симетрію системи $F_{\max} = F_{\frac{m}{2} + 1} = F_{N - \frac{m}{2}}$ та значення кутів у точці $\frac{m}{2} + 1 - \varphi_{\frac{m}{2} + 1} = \frac{2\pi}{N} \cdot \left(\frac{m}{2} + 1 - 0,5 \right) = \frac{\pi(m+1)}{N}$, а в точці $N - \frac{m}{2} -$

$\varphi_{N - \frac{m}{2}} = \frac{2\pi}{N} \cdot \left(N - \frac{m}{2} - 0,5 \right) = \frac{2\pi}{N} \cdot \left(N - \frac{m+1}{2} \right)$, отримаємо

$$F_{\max} = F_{\frac{m}{2} + 1} = \frac{P \cdot \left(N - m - \frac{\sin\left(\frac{2m\pi}{N}\right)}{\sin\left(\frac{2\pi}{N}\right)} \right) + 2 \cdot P \cdot \frac{\sin\left(\frac{m\pi}{N}\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{N}\right)} \cdot \cos\left(\frac{(m+1) \cdot \pi}{N}\right)}{(N-m) \cdot \left(N - m - \frac{\sin\left(\frac{2m\pi}{N}\right)}{\sin\left(\frac{2\pi}{N}\right)} \right) - 2 \cdot \frac{\sin^2\left(\frac{m\pi}{N}\right)}{\sin^2\left(\frac{\pi}{N}\right)}} \quad (8)$$

Проведено дослідження впливу дефектів у системі закріплення шихтованого осердя статора ТГ на перерозподіл зусиль у стяжних призмах. Розрахунки проведено для ТГ типу ТГВ-300. Дуже важливо знайти ту кількість пошкоджень призм, коли відбувається подальше лавиноподібне руйнування решти призм і неможлива подальша експлуатація ТГ.

Результати розрахунків для максимальних навантажень на призми при руйнуванні різної кількості призм наведено в табл. 1.

При відсутності обривів призм для турбогенератора ТГВ-300 співвідношення сил становить $F_{\max}/P=1/30=0,0333$ (табл. 1.) У цьому турбогенераторі кількість стяжних призм $N=30$. Проведемо розрахунки механічних напружень у шпильках призм, щоб з'ясувати, при якій кількості обривів на плиті призм напруження буде перевищувати межу витривалості. Дослідження проведено для різних режимів генераторів: пуск, зупинення, навантаження, холодний стан.

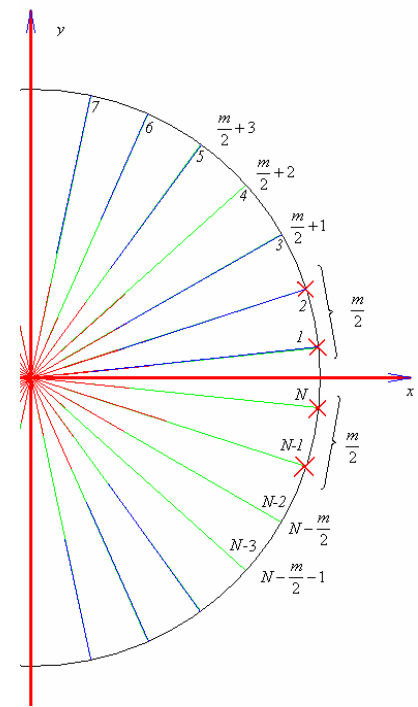


Рис. 3

Таблиця 1

Співвідношення сил F_{max}/P						
Кількість пошкоджених призм, т	0	1	2	3	4	5
співвідношення сил F_{max}/P	0,0333	0,0370	0,0413	0,0466	0,0526	0,0601
Кількість пошкоджених призм, т	6	7	8	9	10	11
співвідношення сил F_{max}/P	0,0686	0,0794	0,0912	0,1073	0,1238	0,1484
Кількість пошкоджених призм, т	12	13	14	15	16	17
співвідношення сил F_{max}/P	0,1720	0,2109	0,2451	0,3099	0,3606	0,4753

У [1] показано, що найменший запас міцності виявляється в шийках стяжних призм. Запас міцності становить 1,2...1,5, що недостатньо у зв'язку з можливими нерівномірними навантаженнями на окремі призми.

У шпильках стяжних призм турбогенератора ТГВ-300 зусилля пресування активного заліза в холодному стані 600 т, у номінальному режимі роботи – 900 т, при перехідних режимах в умовах пусків і зупинень воно може підвищуватися до 1200 т [1].

За результатами натурних випробувань температура активного заліза осердя в номінальному режимі складає 40 °С, а в режимі активного навантаження – 0,7 від номінального температура складає 30 °С. Відповідно пресуюче зусилля на осерді складає 675 т. Результати розрахунків наведено в табл. 2–6. Табличні дані розраховано для шийки стяжних призми з діаметром різьблення 50 мм.

Таблиця 2

Навантаження на рівномірно затягнуті призми в різних режимах роботи

Пресуюче зусилля	Холодний стан, $P=600$ т	Ном. режим $P=900$ т	Зупинки $P=1200$ т	$0,7 P_{ном}$ $P=675$ т
Навантаження на призму ТГВ -300 т	19,98 т	29,97 т	39,96 т	22,4775 т

Таблиця 3

Механічні напруження в призмах для різної кількості пошкоджених призм у непрацюючому статорі турбогенератора ($P=600$ т)

Кількість пошкоджених призм, т	0	1	2	3	4	5
F_{max} , т	19,98	22,2	24,78	27,96	31,56	36,06
Максимальне механічне напруження шийки стяжної призми, σ_{max} , МПа	101,76	113,06	126,20	142,40	160,73	183,65
Кількість пошкоджених призм, т	6	7	8	9	10	11
F_{max} , т	41,16	47,64	54,72	64,38	74,28	89,04
Максимальне механічне напруження шийки стяжної призми, σ_{max} , МПа	209,63	242,63	278,69	327,88	378,30	453,48
Кількість пошкоджених призм, т	12	13	14	15	16	17
F_{max} , т	103,2	126,54	147,06	185,94	216,36	285,18
Максимальне механічне напруження шийки стяжної призми, σ_{max} , МПа	525,59	644,46	748,97	946,98	1101,91	1452,41

Наведемо дані механічних характеристик і процесів, необхідних для визначення критичної кількості обривів призм.

Як відомо [4, 5], руйнування матеріалу відбувається двома стадіями:

- 1) появою пластичних деформацій;
- 2) появою тріщин.

Тріщини виникають при більших напруженнях, ніж пластичні деформації, тобто $\sigma_{пласт} < \sigma_{тріщ}$ [2, 4, 5]. Напруження, при яких починаються пластичні деформації, називається межею (границею) плинності σ_T . Матеріал при пластичних деформаціях повністю не руйнується, але його початкові геометричні розміри змінюються в незворотному напрямку [2, 4, 5].

Межа витривалості – це циклічне (динамічне) напруження, після досягнення якого виникають тріщини. Стяжні призми виготовлено із сталі марки ст.45.

Таблиця 4

Механічні напруження в призмах для різної кількості пошкоджених призм у номінальному режимі роботи ($P=900$ т)

Кількість пошкоджених призм, t	0	1	2	3	4	5
F_{max} , т	29,97	33,3	37,17	41,94	47,34	54,09
Максимальне механічне напруження шийки стяжної призми, σ_{max} , МПа	152,64	169,60	189,30	213,60	241,10	275,48
Кількість пошкоджених призм, t	6	7	8	9	10	11
F_{max} , т	61,74	71,46	82,08	96,57	111,42	133,56
Максимальне механічне напруження шийки стяжної призми, σ_{max} , МПа	314,44	363,94	418,03	491,83	567,46	680,21
Кількість пошкоджених призм, t	12	13	14	15	16	17
F_{max} , т	154,8	189,81	220,59	278,91	324,54	427,77
Максимальне механічне напруження шийки стяжної призми, σ_{max} , МПа	788,39	966,69	1123,45	1420,47	1652,86	2178,61

Таблиця 5

Механічні напруження в призмах для різної кількості пошкоджених призм при зупинках ТГ ($P=1200$ т)

Кількість пошкоджених призм, t	0	1	2	3	4	5
F_{max} , т	39,96	44,4	49,56	55,92	63,12	72,12
Максимальне механічне напруження шийки стяжної призми, σ_{max} , МПа	203,51	226,13	252,41	284,8	321,47	367,3
Кількість пошкоджених призм, t	6	7	8	9	10	11
F_{max} , т	82,32	95,28	109,44	128,76	148,56	178,08
Максимальне механічне напруження шийки стяжної призми, σ_{max} , МПа	419,25	485,26	557,37	655,77	756,61	906,95
Кількість пошкоджених призм, t	12	13	14	15	16	17
F_{max} , т	206,4	253,08	294,12	371,88	432,72	570,36
Максимальне механічне напруження шийки стяжної призми, σ_{max} , МПа	1051,18	1288,92	1497,94	1893,96	2203,82	2904,81

Таблиця 6

Механічні напруження в призмах для різної кількості пошкоджених призм при навантаженнях ТГ $0,7 P_{ном.}$ (675 т)

Кількість пошкоджених призм, t	0	1	2	3	4	5
F_{max} , т	22,48	24,98	27,88	31,46	35,51	40,57
Максимальне механічне напруження шийки стяжної призми, σ_{max} , МПа	114,48	127,20	141,98	160,20	180,83	206,61
Кількість пошкоджених призм, t	6	7	8	9	10	11
F_{max} , т	46,31	53,6	61,56	72,43	83,57	100,17
Максимальне механічне напруження шийки стяжної призми, σ_{max} , МПа	243,39	272,96	331,05	368,87	462,03	510,16
Кількість пошкоджених призм, t	12	13	14	15	16	17
F_{max} , т	116,1	142,36	165,44	209,18	243,41	320,83
Максимальне механічне напруження шийки стяжної призми, σ_{max} , МПа	591,29	725,02	842,59	1065,36	1239,65	1633,96

Діаметр перерізу шийки стяжної призми становить $d = 0,05$ м. Площа перерізу шийки стяжної призми $S = \pi \cdot d^2 / 4 = 0,001964$ м². Значення σ_{max} для розглянутих варіантів (табл.

3...6) були розраховані за формулою $\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{S}$. Розрахуємо напруження, що діє на шийку стяжної призми, для випадку, коли всі стяжні призми не пошкоджені:

$$\sigma_{кр} = \frac{F}{S} = \frac{4F}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 300\,000}{3,1416 \cdot 0,05^2} = 152,7884 \text{ МПа}.$$

Для матеріалу стяжних призм межа плинності для статичного навантаження матеріалу становить 650 МПа. Тоді запас плинності цієї деталі дорівнює $650/152,7884 = 4,25425$.

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. Библи. 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. Библи. 4, рис. 5, табл. 3.

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