

Энергетические показатели торцевых дугостаторных асинхронных двигателей с биметаллическими дисковыми роторами

Представлен метод расчета энергетических показателей торцевого дугостаторного асинхронного двигателя (ТДАД) с биметаллическим дисковым ротором. Метод расчета базируется на математической модели электромагнитных параметров двигателя с принятыми допущениями. Модель разработана на основе системы уравнений Максвелла с учетом линейной скорости вращения. Выполнен аналитический расчет полной комплексной мощности путем использования вектора Умова-Пойнтинга и трехмерного представления индукции магнитного поля в зазоре между статором и ротором. Разработаны выражения для расчета главного комплексного сопротивления электрической схемы двигателя, которые включают взаимную межфазную индуктивность. Представлены выражения для расчета электромагнитного момента, полезной мощности, коэффициента полезного действия, коэффициента мощности. Метод позволяет рассчитать энергетические показатели при заданных комплексных амплитудах и тока, и напряжения. Библиография: 5, рисунок, таблица.

Ключевые слова: торцевой дугостаторный асинхронный двигатель, биметаллический дисковый ротор, энергетические показатели.

O. Karlov, I. Kondratenko, R. Kryshchuk, A. Rashchepkin

Institute of Electrodynamics The National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

Energy parameters of axial arc-stator motors with bimetallic disk rotors

The method of calculating the energy indicators of an axial arc-stator induction motor (AAIM) with a bimetal disk rotor is presented. The mathematical model of the motor with accepted assumptions is presented. The model is developed on the basis of Maxwell's equations, takes into account linear speed of rotation. Using the Poynting theorem and three-dimensional representation of the magnetic field induction in the gap of motor, the analytical calculation of complete integrated power was performed. Expressions for calculating the main complex resistance of the engine, which includes the mutual interphase inductance, are done. Expressions for calculating the electromagnetic moment, the useful power, the efficiency factor, the power factor are presented. The method allows calculating energy indices both at given complex amplitudes of a current, and a voltage. References 5, figure, table.

Key words: axial arc-stator motor, bimetallic disk rotor, power parameters.

Надійшла 23.10.2017

Received 23.10.2017

УДК 621.313

МЕХАНІЧНІ ТА ВІБРОМЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАТИСКНИХ ПАЛЬЦІВ І ПЛИТ ОСЕРДЯ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА

К.А. Кучинський, докт. техн. наук, **В.О. Тітко**, канд. техн. наук, **М.С. Гуторова**, канд. техн. наук, **В.А. Мистецький**, інж.

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03057, Україна
e-mail: misteckiyviktork@ukr.net

Розроблено модель для розрахунку механічних характеристик у натискних пальцях і плитах при дефектах пресування осердя статора турбогенератора в зубцевій зоні, в тому числі при відгині пальців. Модель дає змогу визначити частоту коливань системи у початковий момент раптового виникнення дефектів, а також характеристики при сталому режимі роботи. Проведено тестові розрахунки механічних характеристик у пальцях і плитах на ділянці їх дотику при відгині пальця. Бібліографія: 10, рис. 6, таблиця.

Ключові слова: турбогенератор, моделювання, шихтований магнітопровід, осердя статора, зубцева зона, натискні пальці, механічні напруження, зусилля, лінійне видовження.

Постановка задачі. Відомо, що майже все генеруюче обладнання ТЕС морально і фізично застаріле. Надійність такого обладнання зменшується. Найбільш проблемним вузлом є шихтоване осердя статора генератора, яке має складну систему кріплення і в процесі експлуатації внаслідок дії термомеханічних сил ця система змінює свій механічний стан, ослаблюючи чи, навпаки, посилюючи зусилля пресування листів заліза осердя статора.

Зі збільшенням долі АЕС у сумарній кількості генерованої в країні електроенергії та невеликої встановленої потужності ГАЕС турбогенератори ТЕС будуть працювати в маневрених, динамічних режимах, в яких надійність генеруючого обладнання значно нижча. Виникає необхідність розробки засобів підвищення, перш за все, механічної стійкості елементів конструкції генераторів до цих режимів. Особливо це стосується зубцевої зони шихтованого магнітопроводу, яка пресується окремими натискними пальцями. Зміна навантаження призводить до зміни нерівномірності їх нагрівання, що викликає змінні термомеханічні сили, під дією яких пальці можуть відгинатися. У результаті відбуваються локальне розпресування, механічні руйнування під дією електромагнітних сил, що призводять до важких аварійних відключень генераторів і, зрештою, до недовироблення електроенергії.

Особливо піддаються впливу змінних електродинамічних і термомеханічних сил крайні пакети. Під дією вібрацій руйнуються зубці статора (рис. 1) (фрагмент зруйнованих зубців крайніх пакетів осердя статора турбогенератора типу ТВВ-1000-2 на третьому енергоблоці Південно-Української АЕС (2015 р.) [1]).

Над цією проблемою працюють усі спеціалісти, які виготовляють потужні турбогенератори. Проте застосування усіх методів і заходів, спрямованих на підвищення механічної стійкості, зокрема запікання крайніх пакетів шихтованого магнітопроводу, остаточного вирішення даної проблеми не дали. Не здійснюються контроль і діагностування технічного стану магнітопроводу, особливо в зубцевій зоні, оскільки натискних пальців лише на один бік статора може бути до сотні штук і в кожному не раціонально встановлювати датчики. Отже, стан проблеми такий, що потребує подальшої її розробки і вирішення.

Складності визначаються, перш за все, необхідністю локально контролювати зусилля, а для цього необхідно встановлювати сотні складних датчиків, що в турбогенераторах під час їх експлуатації неможливо.

У цій роботі проведено моделювання механічних процесів у зубцевій зоні для визначення можливості контролю змін механічних характеристик при ослабленні пресування одного чи декількох зубців. Такий підхід дасть можливість контролювати в процесі експлуатації зусилля пресування осердя статора в зубцевій зоні.

Треба зазначити, якщо для зупиненої машини розроблено досить багато методів і засобів технологічного контролю стану пресування осердя статора в зубцевій зоні (наприклад, із основних можна виділити контроль механічними пристроями – вібромеханічний, ультразвуковий, магнітоелектричний контроль та інші), то на працюючій машині контроль пресування осердя статора значно складніший і методи контролю більш складні. Це в основному тензометричні методи, методи вимірювання тиску, ємнісні, електромагнітні, теплові й вібраційні. Ясно, що всі вони передбачають встановлення великої кількості датчиків. Це на практиці робить їх невикористаними і в більшості випадків економічно недоцільними.

Дослідження механічних характеристик в ТГ проводились багатьма авторами в різних аспектах. Наприклад, у роботі [9] розглядаються однібічна n -стержнева розрахункова схема, напруження в зубці осердя, середнє напруження в ярмі осердя, напруження в шийці стяжної призми. В [4] представлено систему диференціальних рівнянь, які описують лінійні, слабонелінійні та сильнонелінійні (віброудари), радіальні й тангенціальні коливання ребра в умовах кінетичного збудження вібрації в проекції на осі нерухомої системи координат.

З іншого боку, розглядаються механічна деформація кручення країв натискних плит, деформації натискних пальців, а також вплив

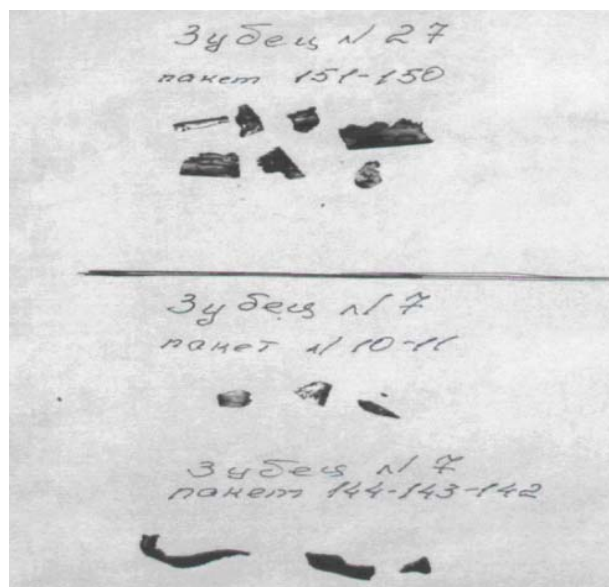


Рис. 1

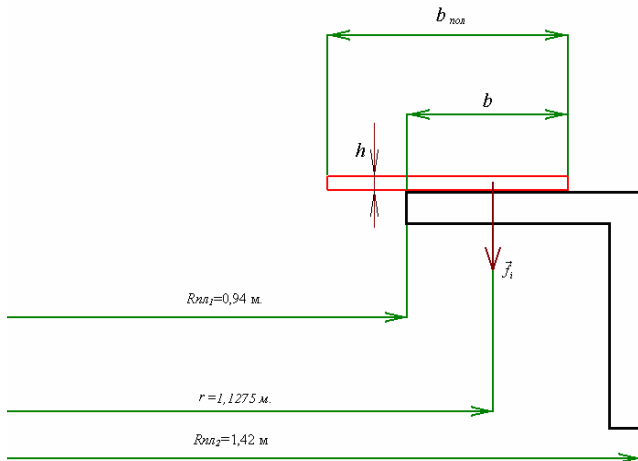


Рис. 2

цих деформацій на шихтовані листи активно-го заліза статора турбогенератора. Також у роботі враховано вплив деформації в натискних плитах під дією стяжних призм. Проте у відомих працях не досліджується вплив розвитку дефектів у вигляді розпресування на механічні характеристики всієї системи закріплення осердя статора ТГ.

У цій роботі розв'язана задача дослідження впливу дефектів на перерозподіл механічних та вібромеханічних характеристик. Під час її розв'язання використовували як аналітичні, так і чисельні методи.

Розглянуто механічну систему, яка складається з плити, натискних пальців, стяжних призм.

При цьому враховано вплив натискних пальців на шихтоване залізо зубцевої зони осердя статора. Методика враховує зміну механічних характеристик і параметрів у натискних пальцях, стяжних призмах, зубцевої зони в часі за умови, що рівнодійна усіх сил і всіх моментів дорівнює нулю [3, 7, 8].

При ослабленні пресування осердя статора ТГ, перш за все зубцевої зони, виникає механічний зсув листів шихтованого магнітопроводу статора, а також тріщини листів активно-го заліза статора турбогенератора за умови, що генератор працює певний час при розпресованому осерді. Щоб не допустити цього, потрібна неперервна діагностика [2]. Для доведення засобів контролю на більш досконалий рівень розвитку дуже важливо знайти закон розподілу та перерозподілу механічних сил, механічних моментів сил, лінійних видовжень та деформацій стяжних призм, натискних пальців, натискних призм, а також їх кутові переміщення за умови наявності дефектів [3, 7, 8]. На базі цих параметрів та процесів можна розробити досконали засоби контролю і діагностування [2].

Мета роботи. Дослідження механічних характеристик у натискних плитах і пальцях осердя статора ТГ, як найбільш вразливого вузла генераторів, при дефектах пресування в процесі експлуатації, особливо в динамічних режимах.

Результати досліджень. Дослідження проведено для турбогенератора типу ТГВ-300.

Модель для розрахунку механічних характеристик елементів торцевої зони осердя статора ТГ (натискна плита, активне залізо та натискні пальці) представлено на рис. 2, де

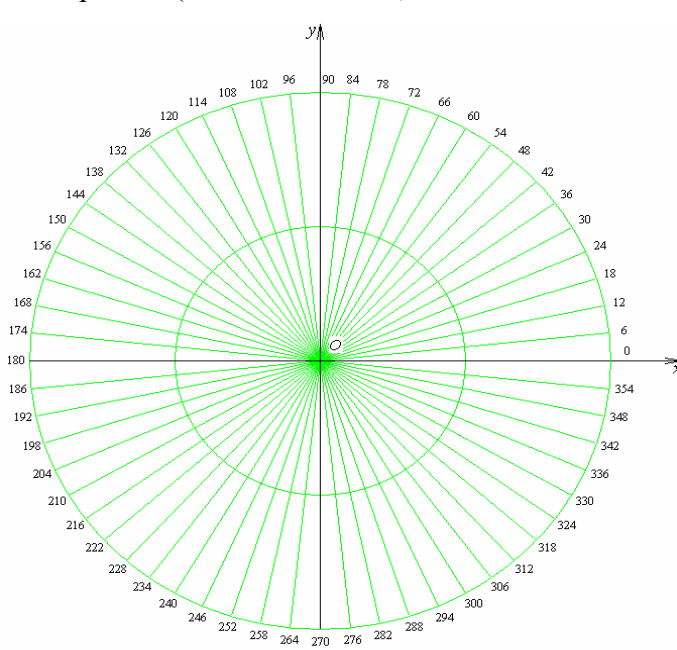


Рис. 3

показано сили \vec{f}_i , які діють на i -й натискний палець осердя статора синхронного генератора [Н], а також [6, 8] відстань $b_{пов}=0,6$ м – повна довжина натискного пальця; $b=0,375$ м – відрізок ділянки натискного пальця, який контактує з натискною плитою; висота пальця $h=0,05$ м; ширина натискного пальця $a=0,028$ м; площа дотику пальця з плитою $s=a \cdot b=0,0105$ м²; значення внутрішнього і зовнішнього радіусів натискної плити статора ТГ: $R_{пл1} = 0,94$ м і $R_{пл2} = 1,42$ м; $r=1,1275$ м – радіус кола, який проходить через середину контактної зони натискних пальців з натискною плитою.

При статичній рівновазі натискної плити рівнодійна всіх механічних сил дорівнює нулю [3, 7]. Розглянемо зміни ме-

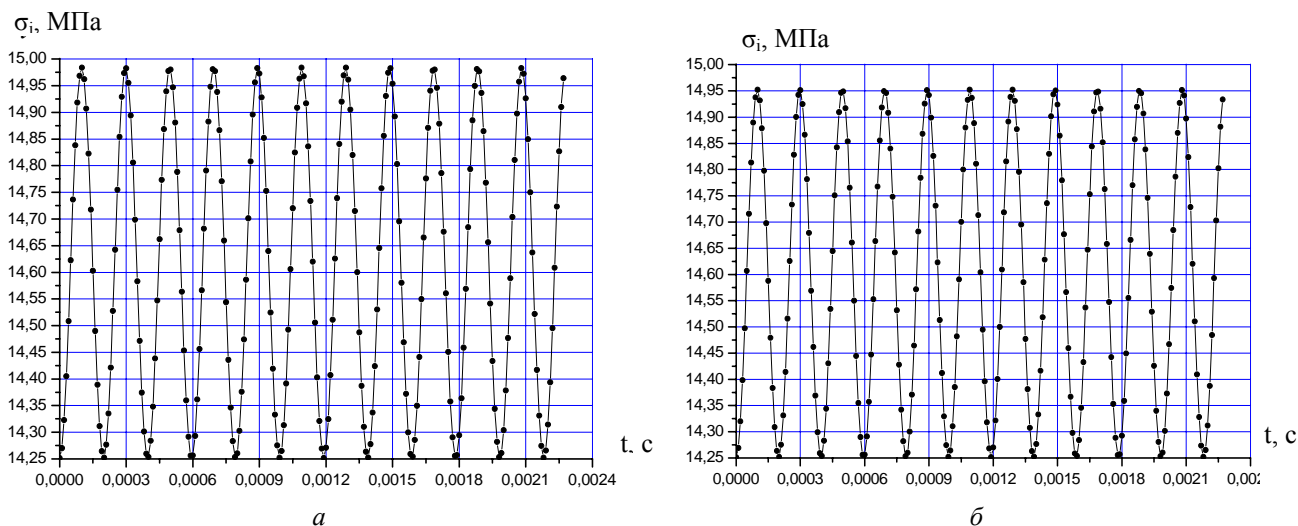


Рис. 4

ханічних характеристик при раптовому повному розпресуванні одного зубця при відгині натискного пальця під номером 60 (рис. 3).

На основі рівнянь, що описують модель розпресування статора ТГ [8], отримано вирази для визначення механічних характеристик елементів осердя. При раптовому розпресуванні одного зубця використовувалась система рівнянь динамічної рівноваги [5, 7, 10]. Після перетворення статичних рівнянь [3] у динамічні [7] розв’язується система двох лінійних звичайних диференціальних рівнянь другого порядку з двома невідомими аналітичним методом за допомогою характеристичних рівнянь [6].

Середнє значення залежності механічного напруження від часу для i -го натискного пальця дорівнює [6]

$$\sigma_i(t) = f_i(t) / s, \text{ Н/м}^2. \tag{1}$$

Залежність числового значення середнього розподілу механічної сили (відношення механічної сили до довжини) від часу на i -му натискному пальці

$$q_i(t) = f_i(t) / b, \text{ кН/м}. \tag{2}$$

Результати розрахункових досліджень показано на рис. 4, 5 – графіки залежностей механічного напруження σ та механічної сили q від часу в початковий час відгину 60-го пальця, діючих відповідно на 1-й та 59-й (а), 3-й та 57-й (б) натискні пальці.

Рис. 6 а відображає залежність середнього механічного видовження від часу $\Delta l(t)$ 5- та 55-го натискних пальців у початковий момент відгину 60-го пальця, рис. 6 б – відповідно 9- та 51-го пальців. Наведені залежності показують, що вібраційна складова складає десяти долі мікрон. Розповсюджується хвиля вібрації майже на всю кромку натискної плити по колу. Звичайно, максимальні зміни механічних характеристик спостерігаються в пальцях, що знаходяться ближче до відгину 60-го пальця.

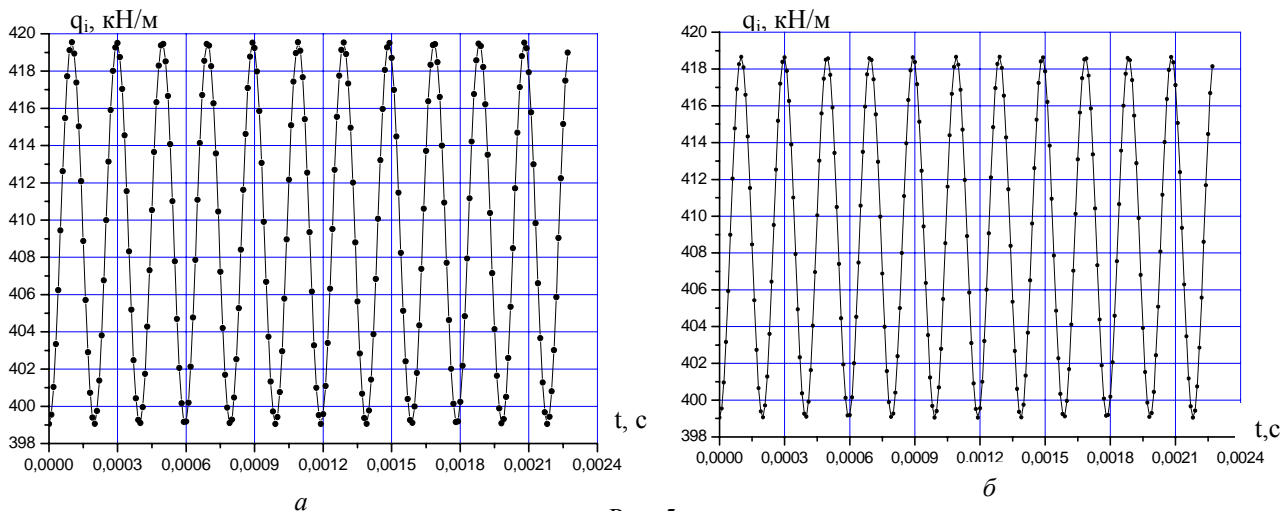


Рис. 5

Але в подальшому при віддаленості по колу від відгину 60-го пальця параметри механічних характеристик зменшуються повільніше. Отже, якщо встановлювати датчики контролю параметрів механічних характеристик будь-де по колу в зоні контакту плити і пальців, то можна контролювати зміни незалежно від місця дефекта. Проте ці зміни незначні, а отже, виникає складність, яка полягає в необхідності встановлення датчиків високої чутливості або забезпечення складної обчислювально-виміральної апаратури високої інформативності.

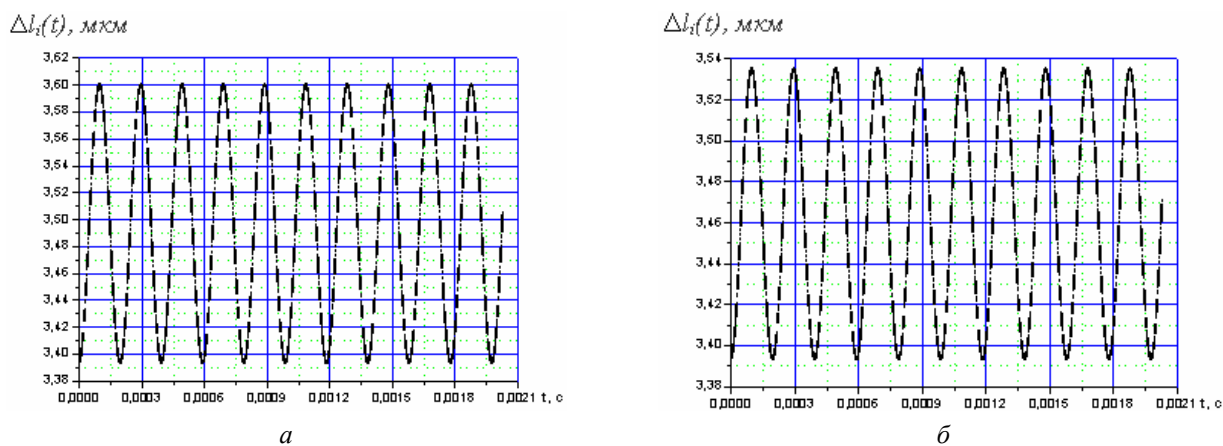


Рис. 6

У таблиці наведено механічні характеристики по колу (φ_i – кут розташування i -го натискного пальця в статорі синхронного турбогенератора) у зоні контакту натискних пальців з плитою при відгині одного (60-го) пальця i , для порівняння, при нормальному стані пресування осердя статора в зубцевій зоні. Механічні характеристики в таблиці наведені після закінчення коливального процесу, тобто для сталого режиму.

№	φ_i , град	При відгині 60-го пальця				Бездефектний стан			
		q_{i2} , кН/м	σ_{i2} , МПа	f_{i2} , кН	Δl_2 , мкм	q_{i2} , кН/м	σ_{i2} , МПа	f_{i2} , кН	Δl_2 , мкм
1	6	409,300	14,618	153,49	3,480	392,4	14,0143	147,15	3,337
2	12	409,134	14,612	153,43	3,479	392,4	14,0143	147,15	3,337
3	18	408,859	14,602	153,32	3,477	392,4	14,0143	147,15	3,337
4	24	408,479	14,589	153,18	3,473	392,4	14,0143	147,15	3,337
5	30	407,998	14,571	153,00	3,469	392,4	14,0143	147,15	3,337
....
55	330	407,998	14,571	153,00	3,469	392,4	14,0143	147,15	3,337
56	336	408,479	14,589	153,18	3,473	392,4	14,0143	147,15	3,337
57	342	408,859	14,602	153,32	3,477	392,4	14,0143	147,15	3,337
58	348	409,134	14,612	153,43	3,479	392,4	14,0143	147,15	3,337
59	354	409,300	14,618	153,49	3,480	392,4	14,0143	147,15	3,337
60	360	0	0	0,00	0	392,4	14,0143	147,15	3,337

Отже, при відгині пальців параметри механічного процесу в зоні контакту плити і пальців підвищуються, що є фундаментальним результатом.

Висновки. 1. Визначено, що відгин натискних пальців осердя статора потужних турбогенераторів призводить до розпресування осердя в області зубцевої зони.

2. Розроблено механічну модель для моменту раптового відгину натискних пальців, коли система закріплення шихтованого осердя статора входить на деякий час у коливальний процес. Модель не враховує релаксаційні процеси, тому вона дає змогу розраховувати механічні характеристики на початку коливального процесу і на етапі статичної рівноваги.

3. Проведено розрахункові дослідження механічних характеристик у натискних плитах і пальцях статора турбогенераторів потужністю 300 МВт при механічних дефектах пальців. Розраховано механічні напруження, сили та видовження в натискних пальцях.

4. Встановлено, що при відгині одного натискного пальця на початку коливального

процесу з'являються вібрації в натискних плитах у декілька десятих мікрон, які в умовно бездефектній машині відсутні. Це явище можна використати для діагностування розпресування зубцевої зони осердя статора. Зміни механічних сил і напружень при відгині одного із пальців складають одиниці відсотків. Тому для контролю таких змін треба використовувати дуже чутливі вимірювально-обчислювальні засоби контролю, що дещо ускладнює застосування методу діагностування розпресування зубцевих зон осердя статора на основі контролю механічних характеристик у зоні натискних пальців.

1. Васильовський Ю.Н., Шумилов Ю.А., Штогрин А.В. Моделирование процесса усталостного разрушения зубцов крайних пакетов сердечника статора мощных турбогенераторов // Вісник ХПІ. – 2009. – С. 22–28.
2. Кузнецов Д.В. Развитие методов исследования процессов в узлах крепления сердечников статоров к корпусам турбогенераторов и совершенствование их диагностики в условиях эксплуатации: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 2009. – 25 с.
3. Мистецкий В.А. Математическая модель и методика расчета усилий в стержневых призмах сердечника статора турбогенератора при наличии дефектов на основе метода абсолютно твердого тела // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ. – 2013. – Вип. 34. – С. 34–41.
4. Назолин А.Л. Обнаружение дефектов машин и механизмов циклического действия по временным и виброакустическим параметрам: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Москва, 2013. – 32 с.
5. *Определение моментов инерции тел, имеющих простейшую геометрическую форму.* – Режим доступу: <http://genphys.phys.msu.ru/rus/lab/mech/opis7/i2.htm>.
6. *Розроблення засобів підвищення механічної стійкості зубчато-пазового шихтованого магнітопроводу статорів турбогенераторів ТЕС і АЕС для забезпечення високої надійності роботи в експлуатаційних режимах: Звіт про НДР (проміжний) / Ін-т електродинаміки НАН України; № ДР 0116U006640.* – К., 2016. – 46 с.
7. Титко О.І., Крамарський В.А., Мистецкий В.А. Математичне моделювання вібраційних процесів у системі кріплення осердя статора турбогенератора при раптовому обриві стержневих призм // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ. – 2016. – Вип. 44. – С. 43–50.
8. Титко О.І., Мистецкий В.А. Аналіз впливу кількості зруйнованих шпильок статора турбогенератора на механічні характеристики стержневих призм // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ. – 2015. – Вип. 40. – С. 85–90.
9. *Фурсанов Е.П. Исследование термомеханических процессов в одномерной системе прямолинейных механически связанных стержней.* – Режим доступу: <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/11226.html>
10. *Electrical Machines, Drives, and Power Systems 5E* Theodore Wildi Professor Emeritus, Laval University. New Jersey Columbus, Ohio – 2002. – Vol. 5. – 907 p.

УДК 621.313

К.А. Кучинский, докт. техн. наук, **В.О. Титко**, канд. техн. наук, **М.С. Гуторова**, канд. техн. наук, **В.А. Мистецкий**
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03057, Украина

Механические и вибромеханические характеристики нажимных пальцев и плит сердечника статора турбогенератора

Разработана модель для расчета механических характеристик в нажимных пальцах и плитах при дефектах прессования сердечника статора турбогенератора в зубцовой зоне, в том числе при отгибе пальца. Модель позволяет определить частоту колебаний системы в начальный момент внезапного появления дефектов, а также характеристики при установившемся режиме работы. Проведены тестовые расчеты механических характеристик в пальцах и плитах на участке их соприкосновения при отгибе пальца. Библ. 10, рис. 6, таблица.

Ключевые слова: турбогенератор, моделирование, шихтованный магнитопровод, сердечник статора, зубцовая зона, нажимные пальцы, механические напряжения, усилия, линейное удлинение.

K.A. Kuchynskiy, V.O. Titko, M.S. Hutorova, V.A. Mystetskiy

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

Mechanical and vibromechanical characteristics of the pressure fingers and plates of the stator core of the turbogenerator

A model is developed for calculating the mechanical characteristics in pressure fingers and plates for defects in pressing the stator core of a turbogenerator in the tooth zone, incl. when the finger is bent. The model makes it possible to determine the frequency of oscillation of the system at the initial moment of the sudden appearance of defects, as well as the characteristics in the steady-state operating mode. Test calculations of mechanical characteristics in the fingers and in the slabs at the area of their contact when the finger is bent. References. 10, figures 6, table.

Key words: turbogenerator, modeling, laminated magnetic circuit, stator core, tooth zone, pressure fingers, mechanical stresses, forces, linear elongation.

Надійшла 25.09.2017

Received 25.09.2017