

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ТА АПАРАТИ

УДК 621.313.322

КВАЗИТРИВИМІРНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ У ТОРЦЕВІЙ ЗОНІ ТУРБОГЕНЕРАТОРА

О.Г. Кенсицький, докт. техн. наук, **Д.І. Хвалін**, асп.

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна
e-mail: denis_h@bigmir.net

На основі сформульованої розрахункової моделі проведено аналіз магнітного поля турбогенератора в торцевій зоні. Розглянуто середні та максимальні значення магнітної індукції в пакетах осердя статора та елементах торцевої зони, розподіл індукції по аксіальних та радіальних лініях поперечного та поздовжнього перетинів генератора. Представлений метод можна вважати квазитривимірним, оскільки він враховує взаємопов'язані магнітні поля двох перетинів турбогенератора. Бібл. 13, рис. 11.

Ключові слова: турбогенератор, торцева зона, крайні пакети осердя, електромагнітне поле.

Зі зростанням одиничної потужності турбогенераторів (ТГ), що неможливо без підвищення питомого електромагнітного навантаження, у торцевих зонах (ТЗ) виникає низка негативних явищ, що впливають на надійність машини в цілому. Перш за все це стосується нагрівань окремих елементів і вузлів, таких як натискна плита, кінцеві пакети осердя статора тощо.

Проблеми дослідження електромагнітних процесів у ТЗ вивчаються вже давно [1, 2, 6, 8, 10]. Але до цього часу частіше використовувались аналітичні методи. Основними ж їх недоліками є спрощене представлення конструкції кінцевих частин ТГ, а також використання низки припущень, що у підсумку дає змогу оцінити суть фізичних процесів у ТЗ тільки якісно. А визначення кількісних параметрів розподілу магнітного поля через неврахування наявних нелінійностей (перш за все, властивостей матеріалів) або взагалі неможливе, або пов'язане зі значними похибками.

Тільки з розвитком чисельних методів моделювання з'явилась можливість часткового врахування реальної геометрії та нелінійностей властивостей матеріалів елементів і вузлів ТЗ ТГ. Чисельне вирішення системи диференціальних рівнянь, які описують електромагнітне поле у кінцевій зоні, може бути здійснене методом скінченних різниць або методом скінченних елементів у дво- або у тривимірній постановці. Двовимірний варіант дає можливість врахувати геометричну структуру конструкції, але тільки в певному перерізі. Варіант тривимірної постановки описує об'ємну структуру конструкції, але через надмірну складність розв'язування доводиться спрощувати або навіть ігнорувати низку факторів, які впливають на рішення.

У роботі [7] з метою проведення чисельних варіаційних розрахунків на базі тривимірної моделі розроблена уточнена двовимірна. На думку авторів, такий підхід дає змогу спростити розрахунки, і похибка між дво- і тривимірною моделями складає не більше 0,1 %.

У цій роботі запропоновано компромісний квазитривимірний варіант моделювання електромагнітного поля у ТЗ ТГ, що займає проміжне положення між дво- і тривимірним рішеннями. Він ґрунтується на розрахунках магнітного поля в поперечному та поздовжньому перетинах ТГ, які взаємопов'язані між собою за допомогою комплексу граничних умов (ГУ).

Магнітне поле розраховується не тільки на поверхні деталей і вузлів, але й у всій ТЗ генератора, включаючи крайні та основні пакети осердя статора. При цьому враховуються геометрія ротора й статора, анізотропія осердя статора, дискретність зубцево-пазової струк-

тури та реальне насичення осердя статора. Окрім того, через ГУ в повітряному проміжку враховується динамічний ефект, пов'язаний із рухом джерела магнітного поля (обмотки збудження ротора) відносно обмотки статора.

У роботі досліджується магнітне поле ТГ типу ТГВ-500, який в аксіальному напрямку складається із трьох частин – центральної та двох кінцевих. Осердя статора включає 138 шихтованих пакетів, набраних із листів високолегованої холоднокатаної електротехнічної сталі марки Е330 завтовшки 0,5 мм. Два крайніх пакети, завтовшки 20 мм кожен, розділені п'ятиміліметровими радіальними вентиляційними каналами. Пакети, починаючи з третього, мають товщину 40 мм. Зубці двох крайніх пакетів виконано скороченими. На першому ступені скорочення зубців складає 24 мм, на другому пакет виконано у вигляді двох сходинок скорочення: перша – на 16 мм, друга – на 8 мм. Тобто зубцева зона на торці має три сходинки. У 48-ми пазах статора розміщена трифазна двошарова стержнева обмотка. Натискні фланці виготовлені з поковок немагнітної сталі і за геометрією є плоскими кільцями. Під натискними фланцями встановлені мідні екрани та немагнітні пальці.

Створена модель відповідає реальним розмірам ТГ у цілому, а також його окремих вузлів. Для кожного вузла задані фізичні параметри матеріалу, з якого він виготовлений. Для феромагнетиків врахована нелінійність кривої намагнічування.

Далі наведено результати розрахунків магнітного поля для ТЗ генератора з боку турбіни для режиму холостого ходу при номінальній швидкості обертання ротора (3000 об/хв). Бік турбіни вибрано тому, що тут магнітне поле не спотворюється впливом струмів з'єднувальних шин і виводів (як це має місце з боку контактних кілець) [6].

Спочатку виконується статичний розрахунок – розглядаються фіксовані положення ротора та значення струмів у обмотках. Результати статичного розрахунку є окремим випадком (початковими умовами) динамічного розрахунку. Обмотка статора ТГ однієї фази складається з двох груп стержнів у відповідних фазних зонах, напрямки струму в яких протилежні. При розподіленні обмотки по пазах враховуються полюсне ділення, число пазів на полюс і фазу, крок обмотки та коефіцієнт скорочення.

В обмотці статора задана симетрична система фазних струмів:

$$\begin{cases} i_A = I_m \sin(\omega t + \beta); \\ i_B = I_m \sin(\omega t + \beta - 120^\circ); \\ i_C = I_m \sin(\omega t + \beta + 120^\circ), \end{cases} \quad (1)$$

де I_m – амплітуда струму статора; $\omega = 2\pi f_s$ – кутова частота; β – кутове зміщення осі, вздовж якої діє магніторушійна сила трифазної обмотки статора по відношенню до поздовжньої осі ротора d .

Густина струмів у обмотках статора і ротора, а також фази струмів фаз статора визначаються режимом турбогенератора – холостий хід (ХХ), режим короткого замикання, навантаження тощо.

У цьому разі, як приклад, розглядається режим ХХ. Електромагнітне поле в активних зонах ТГ збуджується обмоткою ротора і у центральній (активній) частині ТГ розглядається двовимірним у поперечному перерізі. У декартовій системі координат поле описується рівнянням Пуассона через аксіальну складову вектора магнітного потенціалу (ВМП) A_z [3]:

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = -\mu J_{z\text{стоп}}, \quad (2)$$

де $J_{z\text{стоп}}$ – густина сторонніх струмів, що задана у перерізах обмоток статора та ротора.

Оскільки задача є нелінійною, що обумовлено нелінійною залежністю магнітної проникності, рівняння можуть бути розв'язані лише чисельними методами. У такому випадку було застосовано метод скінченних елементів.

Рівняння (2) доповнюється однорідними ГУ першого роду, які відображають затухання поля за межами розрахункової області G :

$$A_z|_G = 0. \quad (3)$$

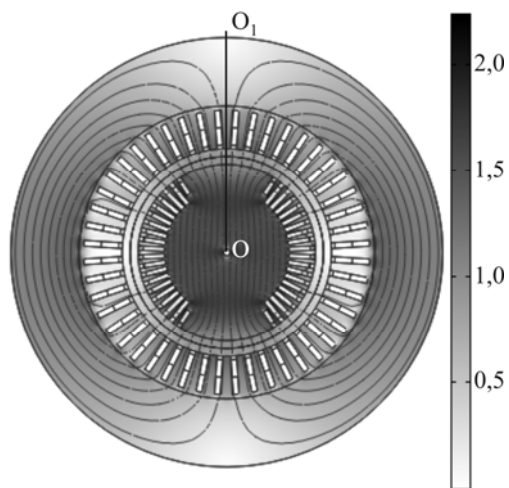


Рис. 1

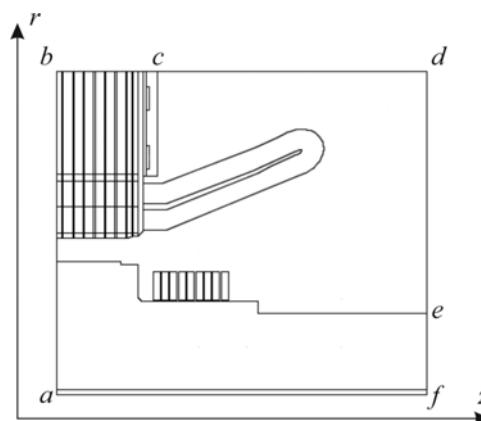


Рис. 2

Отримана в результаті моделювання картина поля в активній зоні статора і ротора в режимі ХХ ТГ показана на рис. 1 у вигляді ліній рівного магнітного потенціалу. Фоновим розфарбуванням показано значення магнітної індукції (МІ) відповідно до наведеної шкали.

Маючи розподіл поля у центральній зоні, можна перейти до розрахунку магнітного поля у поздовжньому перетині ТГ (рис. 2). З урахуванням симетрії конструкції вздовж осьового та радіального напрямків, розрахункова область ТЗ може бути обрана як половина перерізу вздовж осі ротора та перерізу зубця статора у тангенціальному напрямку (вздовж напрямку по колу) [13]. Цей перетин співпадає з циліндричною координатною площиною rz (рис. 2) і є площиною симетрії ротора (на рис. 1 вона проходить по радіусу OO_1).

З урахуванням впливу вихрових струмів у листах осердя статора від аксіальних магнітних потоків використовується рівняння відносно комплексної амплітуди тангенціальної складової ВМП:

$$\frac{\partial^2 \dot{A}_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \dot{A}_\varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \dot{A}_\varphi}{\partial z^2} - j\omega\mu\gamma \dot{A}_\varphi = -\mu \dot{J}_{\varphi\text{стоп}}, \tag{4}$$

де γ – електропровідність сталі листів статора.

У розрахунковій моделі структура силових ліній магнітного поля формується за допомогою комплексу ГУ, які встановлюються на зовнішніх межах області $abcdef$ (рис. 2).

На лінії bc встановлюється умова Неймана, яка імітує перехід («нирок») магнітного поля по осердю статора з поворотом у тангенціальному напрямку:

$$\left. \frac{\partial A_\varphi}{\partial r} \right|_{bc} = 0. \tag{5}$$

Аналогічна умова встановлюється на лінії af , але вже через симетрію магнітного поля відносно осі ротора:

$$\left. \frac{\partial A_\varphi}{\partial r} \right|_{af} = 0. \tag{6}$$

Вздовж межі ab задано розподіл напруження магнітного поля, аналогічний розподілу радіальної складової по лінії OO_1 у поперечному перетині (рис. 1):

$$H_\varphi|_{ab} = H_{\varphi OO_1}(r). \tag{7}$$

На інших границях встановлюється умова Діріхле:

$$A_\varphi|_{cdef} = 0. \tag{8}$$

Одночасно задається розподіл магнітної проникності за радіусом $OO_1 - \mu(r)|_{OO_1}$, яка змінюється внаслідок різного насичення відрізків магнітопроводу основним магнітним потоком. Тим самим встановлюється взаємозв'язок електромагнітних полів у активній і торцевій зонах ТГ.

Скінченно-елементна сітка, сформована при розрахунку поля, складалася з близько 90 000 трикутників. Отримана в результаті розрахунку структура магнітного поля (Тл) у поздовжньому перетині ТГ в режимі ХХ з урахуванням усіх наведених ГУ показана на рис. 3.

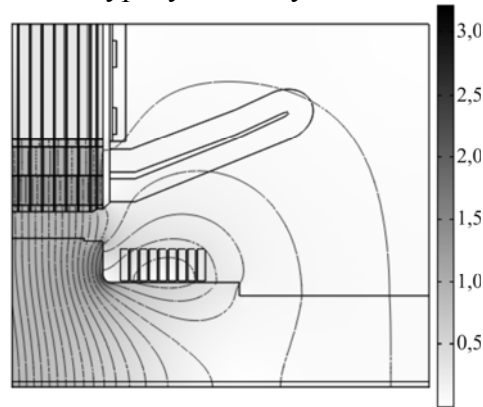


Рис. 3

Розподіл МІ вздовж радіуса OO_1 показаний на рис. 4. На рис. 5 зображена функція значень магнітної проникності вздовж того ж радіуса, що враховується при моделюванні поля у поздовжньому перетині.

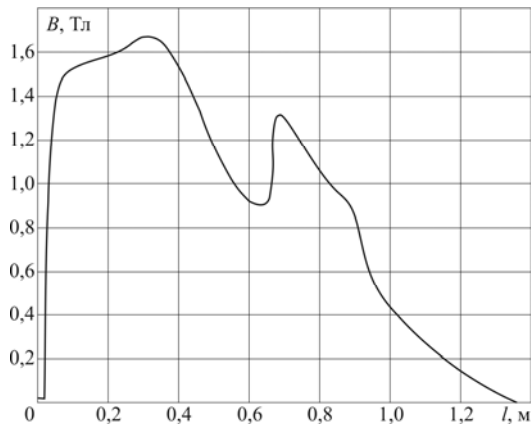


Рис. 4

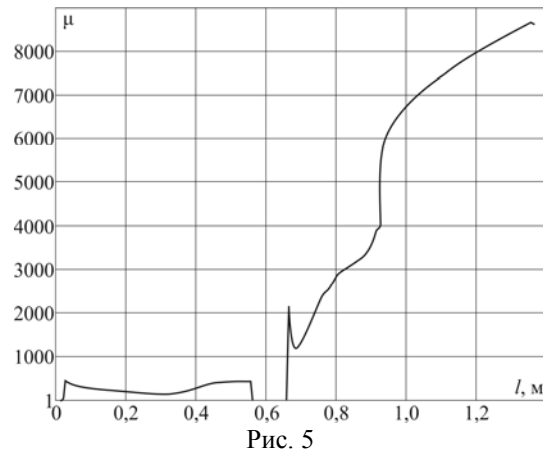


Рис. 5

Максимальне значення МІ у зубцях пакетів центральної зони осердя статора в режимі ХХ складає 1,7 Тл на осі великого зуба ротора (рис. 6). Значення МІ у натискних пальцях нижчі, максимальне значення складає 0,16 Тл (рис. 7). В обох елементах магнітне поле є симетричним відносно осі великого зуба ротора.

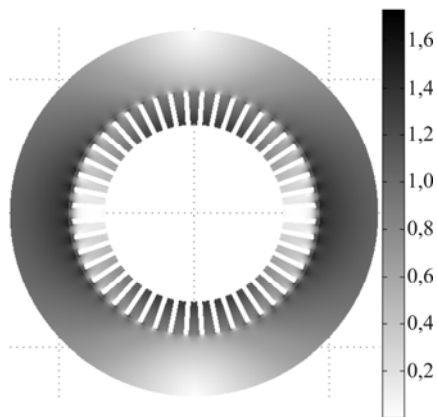


Рис. 6

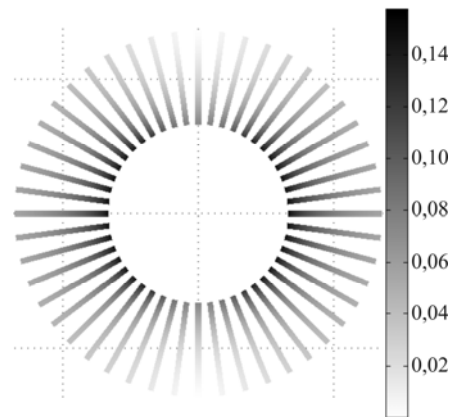


Рис. 7

Максимальні значення МІ у натискній плиті (рис. 8) та мідному екрані (рис. 9) складають відповідно 0,12 і 0,08 Тл.

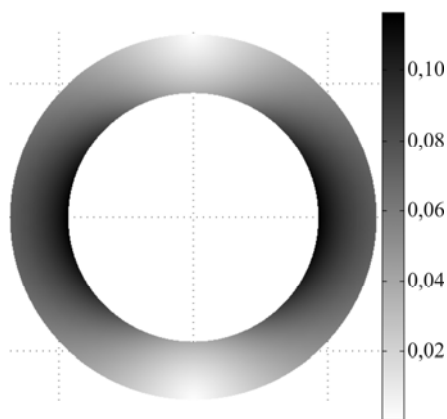


Рис. 8

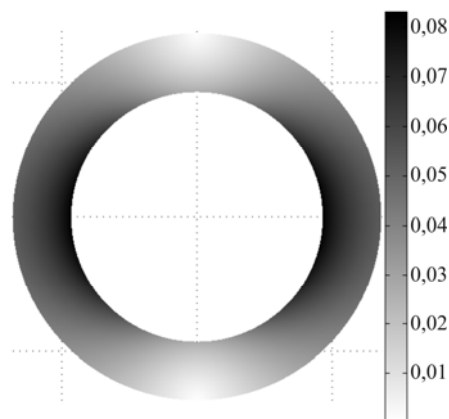


Рис. 9

Розподіл МІ по осі z вздовж повітряного проміжку ТГ наведений на рис. 10. Максимальні значення індукції у трьох крайніх пакетах осердя статора (3,25 Тл) спостерігаються на торцевих поверхнях сходинок, тобто вони є шунтами магнітного потоку [9, 11], на яких зосереджується аксіальний потік.

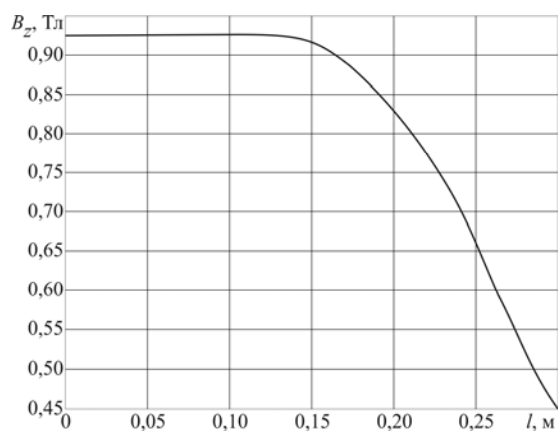


Рис. 10

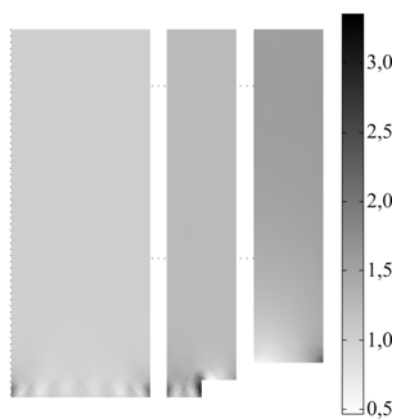


Рис. 11

Запропонована квазітривимірна модель електромагнітного поля потужного ТГ може бути використана для оцінки ефективності технічних рішень щодо удосконалення елементів ТЗ, визначення додаткових теплових втрат і максимальних локальних нагрівань у крайніх пакетах осердя статора та вузлах ТЗ.

Висновки. 1. Натискні плита і пальці, крайні пакети та інші конструктивні вузли і деталі кінцевої зони перебувають під впливом магнітних полів розсіювання обмоток статора і ротора. Найбільші значення магнітної індукції в цих вузлах спостерігаються в місцях, що знаходяться поблизу лобових частин обмоток. Розподіл індукції та відповідно втрат і локальних нагрівань деталей ТЗ є нерівномірним.

2. У центральній частині осердя статора найбільші значення індукції отримані у коронках зубців (1,7 Тл) та в ярмі поблизу дна паза (1,5 Тл). Внаслідок екрануючого впливу натискної плити та мідного екрана індукції у спинці осердя статора невеликі (0,8 Тл).

3. Найбільш навантаженими електромагнітним полем є сходинки крайніх пакетів осердя статора. На торцевій поверхні сходинки другого пакета індукція сягає 3,25 Тл.

4. Розроблена модель адекватно описує розподіл магнітного поля в зоні лобових частин обмоток статора і ротора і дає змогу отримати його кількісні параметри в різних режимах навантаження ТГ.

1. Брынский Е.А., Данилевич Я.Б., Яковлев В.И. Электромагнитные поля в электрических машинах. – Л.: Энергия. – 1979. – 176 с.
2. Вольдек А.И., Данилевич Я.Б., Косачевский В.И. и др. Электромагнитные процессы в торцевых частях электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат. – 1983. – 216 с.

3. Дубініна О.М. Чисельне моделювання магнітного поля і вихрових струмів у кінцевих частинах турбогенератора з метою підвищення його надійності: Автореф. ... дис. канд. техн. наук / НТУ «ХПІ». – Харків, 2007. – 20 с.
4. Мильх В.И., Полякова Н.В. Система направлений и фазовых соотношений электромагнитных величин при численных расчетах магнитных полей в турбогенераторе // Электротехника і електромеханіка. – 2011. – № 5. – С. 33–38.
5. Мильх В.И., Полякова Н.В. Численно-полевой анализ режимов возбуждения и разных видов реакции якоря в мощном турбогенераторе // Электротехника і електроенергетика. – 2013. – № 1. – С. 61–69.
6. Постников И.М., Станиславский Л.Я., Счастливый Г.Г. и др. Электромагнитные и тепловые процессы в концевых частях мощных турбогенераторов. – К.: Наук. думка, 1971. – 360 с.
7. Сахнов М.Ю., Лелеков А.Т., Галочкин С.А. Распределённая энерготепловая модель никель-водородной аккумуляторной батареи 40НВ-70 // Вестник Сибирского гос. аэрокосмического ун-та им. акад. М.Ф. Решетнева. – 2010. – С. 114–120.
8. Титко А.И., Счастливый Г.Г. Математическое и физическое моделирование электромагнитных полей в электрических машинах переменного тока. – К.: Наук. думка, 1976. – 200 с.
9. Титко О.І., Мишастий М.Д., Воронін А.І., Хвалін Д.І. Експериментальні дослідження ефективності екранів зубцево-пазової конструкції статорів турбогенераторів // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2017. – Вип. 46. – С. 34–42.
10. Титов В.В., Хуторецкий Г.М., Загородная Г.А. и др. Турбогенераторы. – Л.: Энергия. – 1967. – 895 с.
11. Пат. 111154 Україна, МПК Н02К 3/42. Осердя статора електричної машини змінного струму / Титко О. І., Кобзар К. О., Хвалін Д. І.; Заявл. 21.12.2015; Опубл. 10.11.2016, Бюл. № 21.
12. Comsol Multiphysics modeling and simulation software. <http://www.comsol.com/>
13. Fujita M., Ueda T., Tokumasu T. and al. Eddy current analysis in the stator end structures of large capacity turbine generators // Proc. Int. Conf. Electr. Mach. Syst. – Nov. 2009. – P. 1–6.

УДК 621.313.322

О.Г. Кенсыцкий, докт. техн. наук, **Д.И. Хвалин**, асп.

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

Квазитрёхмерная модель электромагнитного поля в торцевой зоне турбогенератора

На основе сформированной расчетной модели проведен анализ магнитного поля турбогенератора в его торцевой зоне. Рассмотрены средние и максимальные значения магнитной индукции в пакетах сердечника статора и элементах торцевой зоны, распределение индукции по аксиальным и радиальным линиям поперечного и продольного сечений генератора. Представленный метод можно считать квазитрёхмерным, так как он учитывает взаимосвязанные магнитные поля двух сечений турбогенератора. Библиограф. 13, рис. 11.

Ключевые слова: турбогенератор, торцевая зона, крайние пакеты сердечника, электромагнитное поле.

O.G. Kensitytskiy, D.I. Hvalin

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

A quasi-three-dimensional model of electromagnetic field in the turbo-generator end zone

Based on the calculated model, was made a magnetic field analysis of the turbo generator in its end zone. The average and maximum values of the magnetic induction in the stator core packages and end zone elements, the distribution of induction along axial and radial lines the transverse and longitudinal sections of the generator are considered. The presented method can be considered quasi-three-dimensional, since it takes into account the interrelated magnetic fields of two sections the turbo generator. References 13, figures 11.

Key words: turbo generator, end zone, end core packages, electromagnetic field.

Надійшла 11.07.2017

Received 11.07.2017