

УДК 621.313.333

**Ю. М. ВАСЬКОВСЬКИЙ, О. А. ГЕРАСКІН, Н. В. БЕЛЕНОК****ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СТАРІННЯ СТАЛІ МАГНІТОПРОВОДА СТАТОРА  
ТУРБОГЕНЕРАТОРА НА ЙОГО ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

Методами математичного моделювання досліджено вплив магнітного і електричного старіння електротехнічної сталі магнітопровода статора турбогенератора на величину втрат та ККД турбогенератора. Розроблено математичні моделі для дослідження зазначеного явища. З огляду на імовірнісний характер ушкодження шихтованого магнітопровода, на прикладі турбогенератора типу ТГВ-200-2 отримана оцінка можливого збільшення втрат та зменшення ККД при різних варіантах ушкоджень.

**Ключові слова:** турбогенератор, магнітопровід статора, ушкодження магнітопровода, втрати потужності в статорі, електротехнічна сталь, коефіцієнт корисної дії.

Методами математического моделирования исследовано влияние магнитного и электрического старения электротехнической стали магнитопровода статора турбогенератора на величину потерь и КПД турбогенератора. Разработаны математические модели для исследования указанного явления. Учитывая вероятностный характер повреждения, шихтованного магнитопровода, на примере турбогенератора типа ТГВ-200-2 получена оценка возможного увеличения потерь и уменьшения КПД при различных вариантах повреждений.

**Ключевые слова:** турбогенератор, магнитопровод статора, повреждения магнитопровода, потери мощности в статоре, электротехническая сталь, коэффициент полезного действия.

**Purpose.** The aim of the paper is an estimate using mathematical modeling reducing the efficiency of turbogenerator in the foreseeable deterioration in magnetic and electrical properties of steel stator magnetic conductor. By the methods of mathematical modeling of the influence of magnetic and electric aging electrical stator steel of magnetic conductor turbogenerator losses on the value and efficiency of the turbogenerator were investigated.

**Mathematical models.** Mathematical field model is formulated in two-dimensional formulation based on the equations of the electromagnetic field relatively to the complex amplitude of a single axial component of the vector magnetic potential in the stator coordinate system. Results of the modeling processes of losses in steel laminated magnetic conductor of stator turbogenerator type TGV - 200 - 2 due to the joint influence of magnetic and electric aging magnetic showed that depending on the nature and extent of aging steel losses in the stator core can increase by 280 ... 430 kW, which will an additional overheating of the stator and reduce the efficiency of the turbogenerator in nominal mode. **Originality.** The mathematical models for the study of these phenomena were developed. **Practical value.** Given the probabilistic nature of laminated magnetic conductor damage, on example of turbogenerator type TGV-200-2 estimated the possible increasing of costs and reduce efficiency in different variants damage.

**Keywords:** turbogenerator, stator magnetic conductor, magnetic conductor damage, losses of power in the stator, electrical steels, efficiency.

**Вступ.** Досвід експлуатації потужних турбогенераторів (ТГ) засвідчив, що фізичні характеристики феромагнітної електротехнічної сталі (ЕТС) шихтованого магнітопровода статора при тривалій експлуатації ТГ поступово погіршуються (наприклад, [4]). Це явище, яке має незворотний характер і називається *старінням* магнітопровода ТГ, веде до зниження енергетичних показників ТГ, перш за все його ККД.

Розділяють *магнітне і електричне* старіння магнітопровода. Магнітне старіння ЕТС виникає в результаті тривалого впливу фізичних чинників високої інтенсивності, що мають різну природу: значних механічних напружень в елементах конструкції, температурних перепадів і термомеханічних деформацій, які виникають при цьому, змінних магнітних полів, вібрації та інших явищ. При цьому магнітне старіння ЕТС відбувається нерівномірно за об'ємом магнітопровода. Досвід експлуатації ТГ показує, що більш інтенсивно цей процес відбувається в зубцево-пазовій зоні статора, яка має меншу механічну жорсткість і більше нагрівається. Більш швидко погіршуються магнітні властивості ЕТС крайніх пакетів магнітопровода статора, які піддаються впливу магнітних полів

розсіювання торцевих зон ТГ.

Достовірний опис фізичного процесу магнітного старіння феромагнітної ЕТС в умовах комплексного впливу зовнішніх факторів різної природи являє складну поки ще не вирішену задачу. Встановлено, що з плином часу змінюється доменна структура металу, змінюються міжтомні відстані в кристалічній решітці, з'являються дислокації і ін. [1, 2, 5, 6]. Однак точно описати зміну магнітних властивостей ЕТС після деякого періоду її старіння поки не є можливим. Проте вплив погіршення магнітних властивостей ЕТС на показники ТГ встановлено експериментально [4, 7]. Магнітне старіння супроводжується зменшенням магнітної проникності ЕТС. Зменшення ККД ТГ відбувається за рахунок збільшення струму обмотки збудження, необхідного для створення номінального магнітного потоку в повітряному проміжку при заданому режимі роботи ТГ, а також за рахунок збільшення втрат на перемагнічування (гістерезис). Іншою причиною старіння магнітопровода ТГ є руйнування міжлистової ізоляції шихтованих пакетів. При цьому збільшуються вихрові струми, втрати і нагрівання магнітопровода. Цей процес і пов'язані з ним зміни характеристик шихтованого магнітопровода називається *електричним старінням*

магнітопровода. Це явище також не має строгого математичного опису з урахуванням випадкового характеру його виникнення.

**Мета досліджень.** Метою роботи є приблизна оцінка за допомогою математичного моделювання зменшення ККД ТГ при передбачуваному погіршенні магнітних і електричних властивостей сталі магнітопровода статора.

**Математичні моделі.** Математична модель для визначення впливу зміни магнітної проникності ЕТС. Математична польова модель формулюється в двовимірній постановці на основі рівняння електромагнітного поля відносно комплексної амплітуди єдиної осьової складової векторного магнітного потенціалу  $\underline{A}_z$  в статорній системі координат, яке має наступний вигляд:

$$\Delta \underline{A}_z - j\omega\mu\gamma \Delta \underline{A}_z = -\mu \underline{J}_{\text{стор}}, \quad (1)$$

де  $\underline{J}_{\text{стор}}$  – густина сторонніх струмів (густина струмів в пазах статора, яка задається відповідно до схеми обмотки статора, і густина струму в пазах ротора, в яких покладена обмотка збудження);

$\omega$  – кутова частота зміни в часі векторного магнітного потенціалу;

$\mu$  – магнітна проникність;

$\gamma$  – електропровідність.

Еквівалентні щільності струмів в пазах статора з трифазної обмоткою і в пазах ротора з обмоткою збудження виражаються наступним чином:

$$\begin{cases} J_A = I_m u_S / S_{\text{ПС}}, \\ J_B = I_m u_S \cos(-2\pi/3) / S_{\text{ПС}}, \\ J_C = I_m u_S \cos(-4\pi/3) / S_{\text{ПС}}, \end{cases} \quad (2)$$

$$J_R = I_f u_R / S_{\text{ПР}}, \quad (3)$$

де  $I_m, I_f$  – амплітуда номінального струму в фазі обмотки статора і постійний струм в обмотці збудження;

$u_S, u_R$  – число послідовно з'єднаних провідників в пазах статора і ротора;

$S_{\text{ПС}}, S_{\text{ПР}}$  – площі перетину пазів статора і ротора.

Рівняння (1) доповнюється однорідними граничними умовами першого роду на лінії зовнішньої поверхні яра статора, яка обмежує розрахункову область G:

$$\underline{A}_z|_G = 0. \quad (4)$$

Величина  $\mu$  в кожній точці розрахункової області, де знаходяться феромагнітні матеріали, визначається відповідними кривими намагнічування. Складові вектора магнітної індукції в декартовій системі координат визначаються за співвідношеннями:

$$\underline{B}_x = \partial \underline{A}_z / \partial y, \quad \underline{B}_y = \partial \underline{A}_z / \partial x. \quad (5)$$

Математична модель для визначення вихрових струмів і втрат в шихтованому магнітопроводі. При руйнуванні електричної ізоляції листів шихтованого магнітопровода зростають вихрові струми і втрати. Такий процес можна розглядати як збільшення товщини листів шихтовки  $d$ . З метою визначення впливу товщини листів з урахуванням фізичних характеристик ЕТС далі представлена відповідна математична модель. На рис. 1 представлена розрахункова область, що відображає шихтований магнітопровід статора.

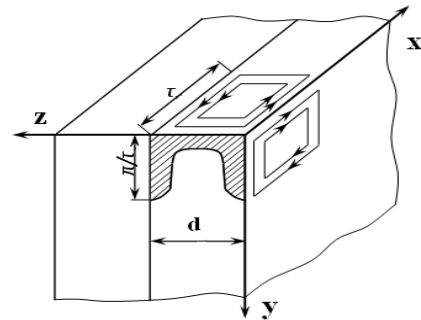


Рис.1 – Розрахункова область шихтованого магнітопровода статора

Ця область являє собою напівпростір, який складається з електропровідних листів товщиною  $d$ , що мають параметри: магнітну проникність  $\mu$  і питомий опір  $\rho$ . Між листами є нескінченно тонка ідеальна ізоляція, така, що аксіальна складова щільності струму на границях листів дорівнює нулю. На поверхні півпростору задано значення нормальної складової магнітної індукції  $B_0 = \text{const}$ , тобто заданий змінний у часі магнітний потік, який падає на електропровідне шихтоване середовище і викликає в ньому вихрові струми і втрати.

Рішення задачі складається з двох етапів:

1. Використовуючи правдоподібні припущення про те, що в листі тонкої шихтовки  $\delta_z \approx 0$  і  $B_z \approx 0$

(або  $\frac{\partial B_z}{\partial z} = 0$ ), вирішується допоміжна задача по визначенню характеру проникнення поля в шихтоване середовище.

2. Результати вирішення допоміжної задачі використовуються як граничні умови на границях листа  $z = 0, z = d$ , тобто в тих місцях, де умови,  $\delta_z \approx 0$  і  $\partial B_z / \partial z = 0$  є справедливими. При цьому загальна задача розрахунку електромагнітного поля в листі може бути коректно сформульована і вирішена. Далі, знаючи струми і індукцію в листі шихтовки, можна отримати формули для розрахунку втрат.

Вирішення допоміжної задачі дає наступний результат. З умови  $\text{rot}_z \underline{B} = 0$  ( $\delta_z = 0$ ) витікає:

$$\frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} = 0, \quad (6)$$

а з умови  $\frac{\partial B_z}{\partial z} = 0$  і  $\text{div} B = 0$  – співвідношення:

$$\frac{\partial B_y}{\partial y} - \frac{\partial B_x}{\partial x} = 0. \quad (7)$$

Вирази (6) і (7) дають рівняння:

$$\frac{\partial^2 B_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 B_x}{\partial x^2} = 0. \quad (8)$$

Оскільки усі вектори поля вважаються синусоїдально розподіленими уздовж полюсної поділки по осі  $OX$ , тобто  $B_y \equiv \exp(-j\pi x / \tau)$ , то отримаємо рівняння:

$$\frac{\partial^2 B_y}{\partial y^2} + \left(\frac{\pi}{\tau}\right)^2 \cdot B_y = 0, \quad (9)$$

яке має наступний розв'язок:

$$\underline{B}_y = \underline{B}_0 \cdot e^{-\left(\frac{\pi}{\tau}\right)y}. \quad (10)$$

Співвідношення (10) використовується як граничні умови на границях листа шихтовки при постановці задачі для нормальної складової індукції. Воно показує, що на границях листів, в тих місцях, де відсутні вихрові струми, електромагнітне поле проникає в шихтоване середовище таким же чином, як і в неелектропровідне середовище. Такий результат дозволяє наочно уявити фізичні особливості поверхневого ефекту в шихтованому середовищі. Можна показати, що і для тангенціальної складової індукції існує аналогічна умова.

Загальна задача розрахунку електромагнітного поля в листі шихтованого середовища формулюється в такий спосіб:

$$\frac{\partial^2 B_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 B_i}{\partial z^2} = \left[ \frac{j\omega\mu}{\rho} + \left(\frac{\pi}{\tau}\right)^2 \right] B_i, \quad i = x, y; \quad (11)$$

$$\underline{B}_y \Big|_{z=0} = \underline{B}_0 \cdot e^{-\left(\frac{\pi}{\tau}\right)y}, \quad \underline{B}_y \Big|_{y=0} = \underline{B}_0, \quad \underline{B}_y \Big|_{y=\infty} = 0;$$

$$\underline{B}_x \Big|_{z=d} = j \cdot \underline{B}_0 \cdot e^{-\left(\frac{\pi}{\tau}\right)y}, \quad \underline{B}_x \Big|_{y=\infty} = 0.$$

Розв'язання поставленої задачі методом інтегральних перетворень в скінченних межах дає наступні вирази:

$$\underline{B}_y = \underline{B}_0 \cdot \left[ e^{-\left(\frac{\pi}{\tau}\right)y} + \frac{\pi}{4} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sin \frac{(2k+1) \cdot \pi \cdot z}{d}}{(2k+1) \cdot (1+\alpha_k)} \cdot \left( e^{-\gamma_k \cdot y} - e^{-\left(\frac{\pi}{\tau}\right)y} \right) \right];$$

$$\underline{B}_x = j\underline{B}_0 \cdot \left[ e^{-\left(\frac{\pi}{\tau}\right)y} + \frac{\pi}{4} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sin \frac{(2k+1) \cdot \pi \cdot z}{d}}{(2k+1) \cdot (1+\alpha_k)} \cdot \left( \frac{\beta_k + \tau \cdot \frac{\gamma_k}{\pi}}{1+\beta_k} \cdot e^{-\gamma_k \cdot y} - e^{-\left(\frac{\pi}{\tau}\right)y} \right) \right];$$

$$\underline{B}_z = \underline{B}_0 \cdot \frac{\tau}{d} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\cos \frac{(2k+1) \cdot \pi \cdot z}{d}}{(1+\alpha_k) \cdot (1+\beta_k)} \cdot \left( 1 - \gamma_k \cdot \frac{\tau}{\pi} \right) \cdot e^{-\gamma_k \cdot y};$$

$$\underline{\delta}_y = \frac{j\underline{B}_0}{\mu} \cdot \frac{4}{d} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\cos \frac{(2k+1) \cdot \pi \cdot z}{d}}{1+\alpha_k} \cdot \left( e^{-\gamma_k \cdot y} + e^{-\frac{\pi \cdot y}{\tau}} \right);$$

$$\underline{\delta}_x = \frac{j\underline{B}_0}{\mu} \cdot \frac{4}{d} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\cos \frac{(2k+1) \cdot \pi \cdot z}{d}}{1+\alpha_k} \cdot \left( \left( \frac{\beta_k}{\alpha_k} \cdot \frac{\gamma_k \tau}{\pi} \right) / (1+\beta_k) \cdot e^{-\gamma_k \cdot y} + e^{-\frac{\pi \cdot y}{\tau}} \right);$$

$$\underline{\delta}_z = \frac{j\underline{B}_0}{\mu} \cdot \frac{4}{d} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\cos \frac{(2k+1) \cdot \pi \cdot z}{d}}{(1+\alpha_k)(2k+1)} \cdot \left( \beta_k \left( \frac{1}{\alpha_k} - \frac{\gamma_k \tau}{\pi} \right) / (1+\beta_k) \cdot e^{-\gamma_k \cdot y} \right),$$

$$\text{де: } \gamma_k^2 = \left[ \frac{(2k+1) \cdot \pi}{d} \right]^2 + \frac{j \cdot \omega \cdot \mu}{\rho} + \left( \frac{\pi}{\tau} \right)^2;$$

$$\alpha_k = \frac{\left[ \frac{(2k+1) \cdot \pi}{d} \right]^2}{\frac{j \cdot \omega \cdot \mu}{\rho}}; \quad \beta_k = \frac{\left[ \frac{(2k+1) \cdot \pi}{d} \right]^2}{\left( \frac{\pi}{\tau} \right)^2}.$$

Використовуючи вираз вектора Пойнтінга, можна визначити втрати в листі як потік електромагнітної потужності, що впадає в лист через його бічні грані:

$$P_z = \text{Re} \left[ 2 \cdot \int_0^{\infty} \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho}{\mu} \cdot \left( \underline{\delta}_x \cdot \underline{B}_y - \underline{\delta}_y \cdot \underline{B}_x \right) \Big|_{z=0} dy \right]. \quad (12)$$

Питомі втрати на одиниці поверхні шихтованого напівпростору визначаються як  $P = P_z / d$  [Вт/см<sup>2</sup>]. Отримані вирази дозволяють проаналізувати явище поверхневого ефекту в шихтованому середовищі при падінні на неї періодичної електромагнітної хвилі уздовж осі  $OX$ . Магнітний потік проникає в середовище уздовж границь листів на глибину, яка визначається значенням  $\tau / \pi$ , тобто величину, яка не залежить від частоти струму і електромагнітних параметрів листів [3, 9]. З самих листів магнітний потік витісняється вихровими струмами до їх стінок. Величина і характер зміни втрат при зміні параметрів середовища істотно залежить від співвідношення товщини листа і глибини проникнення поля в лист  $\Delta = \sqrt{2\rho / \mu\omega}$ .

**Результати моделювання.** Розрахунки проводилися на прикладі серійного ТГ типу ТГВ-200-

2, що працює в номінальному режимі з потужністю 200 МВт, струмі статора  $I_{1н} = 8625$  А, лінійній напрузі  $U_{1н} = 15750$  В і при  $\cos\varphi = 0,85$  (перезбудження). Номінальний струм збудження дорівнює 1880 А, втрати в обмотці збудження – 846,59 кВт. Магнітопровід статора виконаний з шихтованої сталі марки 3413 (Е330) з товщиною листів 0,5 мм. Розрахункові втрати в сталі статора складають 422 кВт, у тому числі, в зубцях статора – 179 кВт, в ярмі статора – 243 кВт. Номінальний ККД – 98,68 %. Повні втрати в номінальному режимі – 2640 кВт.

**Магнітне старіння сталі.** Для оцінки меж зміни властивостей ЕТС в результаті її старіння можна звернутися до роботи [7], в якій проведено досліді штучного старіння ЕТС марки 2212 шляхом нагрівання (відпалювання) зразків ЕТС протягом 120 годин при температурі 120°. Оцінка змін властивостей ЕТС проводилися за характеристиками – величиною магнітної індукції насичення  $B_S$  та питомих втрат.

Визначено, що у порівнянні з вихідними характеристиками ЕТС 2212 величина  $B_S$  в результаті штучного старіння сталі зменшилася на 7,21 %, причому встановлено, що максимальне зменшення  $B_S$  не перевищує 25,7 %. Питомі втрати в ЕТС збільшилися на 4,34 %, але максимальна межа збільшення втрат не перевищує 43,3 %. Щодо збільшення втрат, то вони відносяться до втрат на гістерезис. Таке збільшення обумовлено, напевно, збільшенням площі петлі гістерезису. Інша складова втрат в ЕТС – втрати на вихрові струми, обумовлені, перш за все, станом міжлистової ізоляції шихтованого магнітопровода ЕТС. Для відокремлення втрат на гістерезис від втрат на вихрові струми можна скористатися приведеними в роботі [8] експериментальними даними щодо втрат в ЕТС залежності від товщини листів сталі. На рис. 2 наведено такі дані для двох типів ЕТС: 1 – для ЕТС типу 4313; 2 – для ЕТС типу 3414.

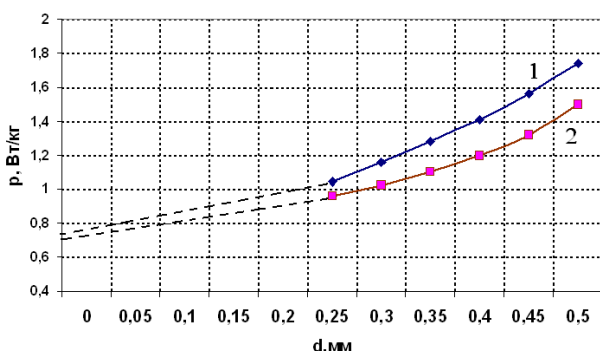


Рис.2 – Експериментальні дані щодо втрат в ЕТС залежності від товщини листів сталі

Апроксимуючи зазначені залежності до значення  $d=0$  (показано пунктирною лінією), можна отримати частку втрат в ЕТС, яка припадає на гістерезис. Для

сталі товщиною 0,5 мм вона складає 40 ... 45 % від повних втрат. Наприклад, для ТГВ – 200 – 2 втрати на гістерезис дорівнюють  $422 \cdot 0,45 \approx 190$  кВт. Таким чином, верхня межа збільшення втрат в ЕТС на гістерезис внаслідок старіння сталі для ТГВ-200-2 може бути оцінена величиною  $190 \cdot 0,433 \approx 82$  кВт.

Оцінку впливу зменшення величини магнітної проникності ЕТС на втрати ТГ виконаємо за допомогою представленої вище математичної моделі (1–5). Оскільки точний опис зміни магнітних властивостей сталі магнітопровода статора з урахуванням реальних умов і тривалості експлуатації ТГ у даний час відсутній, оцінку збільшення втрат в обмотці збудження генератора виконаємо на основі інтегрального підходу з використанням передбачуваних залежностей відносної магнітної проникності від магнітної індукції.

На рис. 3 представлені такі залежності для сталі 3413 (позначено цифрою 1), а також при відносному зменшенні  $\mu$  у всьому діапазоні індукції в 2 і 3 рази (позначено цифрами 2, 3). З урахуванням отриманих в роботі [8] експериментальних даних щодо погіршення магнітних властивостей ЕТС більш істотна зміна  $\mu$  дозволяє при моделюванні оцінити допустимі межі погіршення характеристик ТГ. На рис. 4 показана картина магнітного поля ТГ в режимі номінального навантаження при вихідних характеристиках сталі.

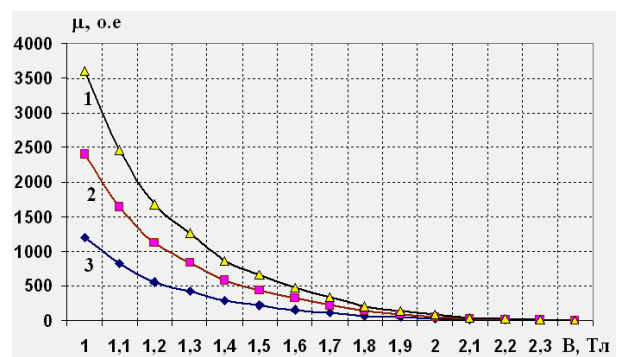


Рис. 3 – Залежності магнітної проникності від індукції

Внаслідок дії реакції якоря вісь магнітного поля повернута відносно поздовжньої вісі ротора на кут навантаження  $\theta = 22,8^\circ$ , і частина магнітного потоку проходить через малі зубці ротора, викликаючи їх насичення. При моделюванні магнітні характеристики поковки ротора залишалися незмінними.

Результуючий магнітний потік в зазорі визначається інтегруванням нормальної (направленої уздовж вектора нормалі до поверхні) складової магнітної індукції по поверхні полюса ротора між точками А і В:

$$\Phi_{\delta} = \frac{l_2}{R_2} \int_F^B (B_x x + B_y y) da \quad (13)$$

де  $l_2, R_2$  – активна довжина і радіус ротора;  
 $x, y$  – координати поточної точки інтегрування.

У варіанті № 1 потік полюса дорівнює 5,89 Вб. У варіанті № 3 спостерігається зниження потоку полюса до величини 5,81 Вб, тобто потік зменшується всього на 1,014 %.

Як показують розрахунки, для збереження вихідної величини магнітного потоку в зазорі ТГ його струм збудження необхідно збільшити з 1880 А до 1903 А. При цьому втрати в обмотці збудження зростають на  $\approx 2,5$  % або на 21 кВт.

Такий результат пояснюється тим, що в ТГ основна частка намагнічуючої сили обмотки збудження, яка необхідна для створення номінального магнітного потоку, витрачається на подолання великого повітряного проміжку між ротором і статором ( $\delta = 100$  мм). Тому навіть помітне зниження магнітної проникності сталі статора, викликане її старінням, не потребує значного збільшення струму і втрат на збудження для підтримки заданого номінального режиму роботи генератора. Лише при більш істотному зменшенні магнітної проникності ( $\mu_{\max} < 1000$ ) спостерігається швидке зростання струму і втрат на збудження, однак таке зниження магнітної проникності сталі осердя статора є маловірогідним.

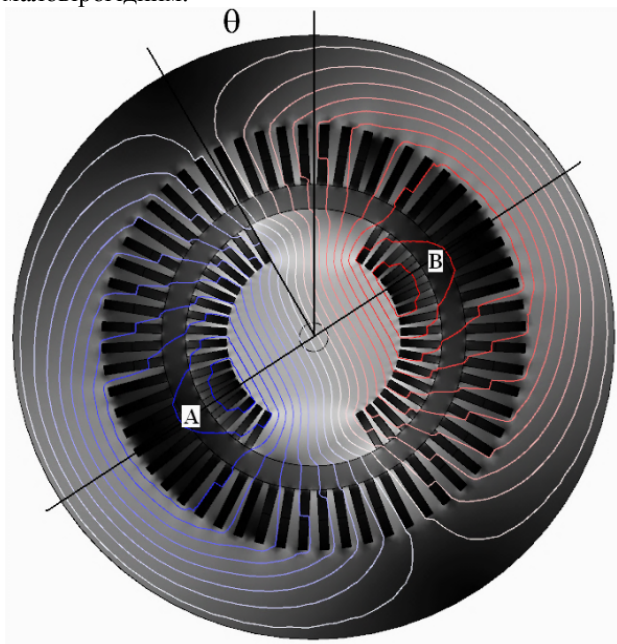


Рис. 4 – Картина магнітного поля ТГ в режимі номінального навантаження

Слід зазначити, що в інших типах електричних машин, наприклад, в асинхронних двигунах, які виконуються з мінімальною величиною повітряного проміжку, фактор магнітного старіння ЕТС магнітопровода статора проявляється більш суттєво.

Таким чином, «оцінка зверху» сумарного збільшення втрат в ТГВ-200-2 внаслідок магнітного старіння сталі дає величину  $82 + 21 = 103$  кВт. При цьому сумарні втрати ТГ збільшуються до величини 2743 кВт, а ККД ТГ зменшується з 98,68 % до 98,63 %.

*Електричне старіння сталі.* Електричне старіння сталі призводить до збільшення втрат в магнітопроводі на вихрові струми внаслідок ушкодження міжлистової ізоляції шихтованих пакетів. Це явище має випадковий характер, обумовлений цілою низкою чинників різного походження, пов'язаних з технологією виготовлення ТГ, умовами і тривалістю його експлуатації, аварійними випадками, тощо.

Ушкодження міжлистової ізоляції можна врахувати шляхом збільшення товщини  $d$  листів шихтованого магнітопровода. На рис. 5 зображені розраховані згідно з моделлю (6) – (12) втрати на вихрові струми в залежності від товщини листів  $d$  (крива позначена цифрою 1). Втрати дані у відносних одиницях, причому за базову одиницю прийняті втрати при товщині  $d = 0,5$  мм. На цьому ж рис. 5 для порівняння представлені експериментальні дані з рис. 3 щодо втрат при збільшенні товщини листів шихтовки в два рази з 0,25 мм до 0,5 мм, коли втрати на вихрові струми збільшуються в 3,66 разів – з 0,261 до 0,957 Вт/кг (крива позначена цифрою 2). Видно, що на даному відрізку товщин криві 1 і 2 добре збігаються.

Очевидно, що однакове ушкодження ізоляції листів по усьому об'єму магнітопровода статора є мало імовірним. Більша імовірність ушкодження характерна для зубців, ніж для ярма статора, а також для крайніх пакетів осердя статора, ніж пакетів, розташованих в середині статора. Тому й загальна оцінка збільшення втрат має імовірний характер. Наприклад, якщо б збільшення товщини листа в два рази відбулося в усьому магнітопроводі статора, то повні втрати в сталі збільшилися би приблизно до величини  $422 \cdot 0,55 \cdot 3,66 = 849$  кВт.

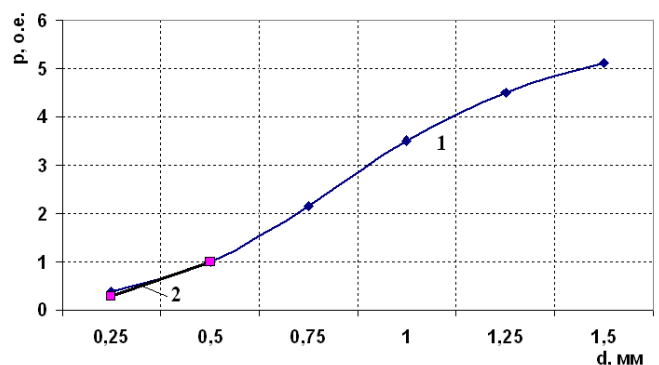


Рис.5 – Залежності втрат від товщини листів шихтовки  $d$

Тут враховано зростання тільки складової втрат на вихрові струми, що відображено коефіцієнтом 0,55, а втрати на гістерезис приймаються незмінними. Але ушкодження таких обсягів, особливо в ярмі статора, є практично нереальним. Якщо б ушкодження ізоляції між кожними листами шихтовки відбулося тільки в зубцевій зоні статора, а ярмо статора залишалось неушкодженим, то загальні втрати в сталі статора збільшилися би до величини  $243 + 179 \cdot 0,55 \cdot 3,66 = 603$  кВт, тобто в 1,43 рази, або зросли на 181 кВт.

Таблиця 1 – Імовірні варіанти ушкодження осердя і відповідні зростання втрат потужності

Варіант ушкодження	$\Delta P_e$ , кВт	$\Delta P_m$ , кВт	$\Delta P_e + \Delta P_m$ , кВт	$\Delta P_m$ , кВт	ККД
$d_{\text{ярмо}} = 2 d = 1$ мм $d_{\text{зубці}} = 2 d = 1$ мм	427	103	530	$\frac{3170}{2640}$	$\frac{98,42}{98,68}$
$d_{\text{ярмо}} = 1,5 d = 0,75$ мм $d_{\text{зубці}} = 2 d = 1$ мм	335	103	438	$\frac{3078}{2640}$	$\frac{98,46}{98,68}$
$d_{\text{ярмо}} = 1,5 d = 0,75$ мм $d_{\text{зубці}} = 1,5 d = 0,75$ мм	268	103	371	$\frac{3011}{2640}$	$\frac{98,49}{98,68}$
$d_{\text{ярмо}} = d = 0,5$ мм $d_{\text{зубці}} = 2 d = 1$ мм	181	103	283	$\frac{2923}{2640}$	$\frac{98,54}{98,68}$

Деякі імовірні варіанти ушкодження осердя і відповідного зростання втрат приведено в таблиці 1. В першому стовпці таблиці 1 наведено опис варіанта ушкодження міжлистової ізоляції, в другому – величина зростання електричних втрат внаслідок ушкодження ізоляції, в третьому – величина зростання втрат внаслідок магнітного старіння сталі, в четвертому – величина сумарного зростання втрат, в п'ятому – величини сумарних втрат в ушкодженому ТГ (чисельник) і неушкодженому ТГ (знаменник), в шостому – відповідні величини ККД. Але й варіант №4, при якому ушкоджена тільки зубцева зона статора, являє суттєве ушкодження магнітопровода, яке потребує його капітального ремонту або заміни.

Якщо ж на окремих ділянках магнітопровода, наприклад, в зубцях крайніх пакетів ушкодження ізоляції відбувається між більшою кількістю листів, наприклад між 3, 4 і більше листами (внаслідок, наприклад, впливу підвищеної вібрації осердя статора), то це призводить до суттєвого збільшення локальних втрат та нагріву на ушкодженій ділянці, має зовсім інший (аварійний) характер і потребує використання інших технічних і організаційних заходів (навіть зупинки і виводу ТГ в ремонт).

#### Висновки.

Аналіз можливого збільшення втрат в сталі шихтованого магнітопровода статора ТГ типу ТГВ-200-2 внаслідок магнітного і електричного старіння магнітопровода засвідчив, що в залежності від характеру і обсягів старіння втрати в осерді статора можуть збільшитися на 280 ... 430 кВт, що призведе до зменшення ККД турбогенератора в номінальному режимі роботи з 98,68 % до 98,54 ... 98,42 %. Даний результат є «оцінкою зверху» і дає максимальні значення збільшення втрат

#### Список літератури

1. Бернштейн М. Л. *Металловедение и термическая обработка стали* / М. Л. Бернштейн, А. Г. Рахштадт. – М. : Машиностроение, 1983. – 352 с.
2. Гусев А. И. *Нанокристаллические материалы* / А. И. Гусев, А. А. Рempel. – М. : Физматлит, 2001. – 224 с.
3. Данилевич Я. Б. *Добавочные потери в турбогенераторах* / Я. Б. Данилевич. – Л. : Наука, 1973. – 182 с.

4. *Шляхи і методи підвищення економічності та надійності роботи турбогенераторів ТЕС, АЕС, ГЕС, що відпрацювали паркової ресурс: матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції (Славське, 23 – 27.05.2016 р.)*
5. Колбасников Н. Г. *Теория обработки металлов давлением* / Н. Г. Колбасников. СПб. : СПбГТУ, 1991. – 307 с.
6. Лякишев Н. П. *Диаграммы состояния двойных металлических систем* / Н. П. Лякишев. М. : Машиностроение, 1997. – 1024 с.
7. Прус В. В. *Обгрунтування впливу процесу старіння на електричні та магнітні властивості шихтованих осердь електричних машин* / В. В. Прус, О. О. Сьомка, С. Е. Дзеніс // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2016. – № 11(1183). – С. 115-122.
9. *Холоднокатаные электротехнические стали. Справочник под ред. Б. В. Молотилова.* – М. : Металлургия, 1989. – 168 с.
10. Greig J., Murherji K. C. *An experimental investigation of tooth-ripple flux pulsation in smooth laminated pole-shoes* / J. Greig, K. C. Murherji // Proc. IEE. – 1957, № 1, pp. 332-338.

#### References (transliterated)

1. Bernshteyn M. L., Rahtstadt A. G. *Metallvedenie i termicheskaya obrabotka stali* [Metallurgy and heat treatment of steel]. Moscow, Mashinostroenie, 1983. 352 p.
2. Gusev A. I., Rempel A. A. *Nanokristallicheskie materialy* [Nanocrystalline materials]. Moscow, Fizmatlit, 2001. 224 p.
3. Danilevich Ya. B. *Dobavochnyie poteri v turbogeneratorah* [Additional losses in turbogenerators]. Leningrad, Nauka, 1973. 182 p.
4. Shlyahi i metodi pidvischennya ekonomichnosti ta nadiynosti roboti turbogeneratoriv TES, AES, GES, scho vidpratsyuvali parkoviy resurs [Ways and methods to improve the efficiency and reliability of turbogenerators of TPP, NPP, HPP worked park resource]: materialy IV Mizhnarodnoyi naukovopraktichnoyi konferentsiyi (Slavske, 23 – 27.05.2016).
5. Kolbasnikov N. G. *Teoriya obrabotki metallov davleniem* [Theory of metal processing by pressure]. Sankt-Peterburg, SPbGTU, 1991. 307 p.
6. Lyakishev N. P. *Diagrammyi sostoyaniya dvoyniyh metallicheskih sistem* [Diagrams of the state of double metal systems]. Moscow, Mashinostroenie, 1997. 1024 p.
7. Prus V. V., Somka O. O., Dzenis S. E. *Obgruntuвання впливу protsesu starinnya na elektrichni ta magnitni vlastivosti shihtovanih oserd elektrichnih mashin* [Influence of aging rationale on the electrical and magnetic properties of laminated electrical machines cores]. *Visnyk NTU «KhPI»* [Bulletin of the National Technical University «KhPI»]. Kharkov, NTU «KhPI». – Publ. 2016, no. 11(1183), pp. 115-122.
8. *Holodnokatanые elektrotehnicheskie stali* [Cold-rolled electrical steels]. Spravochnik pod red. B. V. Molotilova. Moscow, Metallurgiya, 1989. 168 p.
9. Greig J. and Murherji K.C. *An experimental investigation of tooth-ripple flux pulsation in smooth laminated pole-shoes*, Proc. IEE. 1957, no 1, pp. 332-338.

Надійшла (received) 07.03.2017

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Дослідження впливу старіння сталі магнітопровода статора турбогенератора на його енергетичні характеристики / Ю. М. Васьковський, О. А. Гераскін, Н. В. Беленок** // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 1 (1223). – С. 35–41. – Библиогр.: 9 назв. – ISSN 2409-9295.

**Исследование влияния старения стали магнитопровода статора турбогенератора на его энергетические характеристики / Ю. Н. Васьковский, А. А. Гераскин, Н. В. Беленок** // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 1 (1223). – С. 35–41. – Библиогр.: 9 назв. – ISSN 2409-9295.

**The influence of aging of stator magnetic core of the turbogenerator on its energy performance / Y. N. Vaskovskiy, A. A. Geraskin, N. V. Belenok** // Bulletin of NTU «KhPI». Series: «Electric machines and electromechanical energy conversion.» – Kharkiv : NTU «KhPI», 2017. – No. 1 (1223). – P. 35–41. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2409-9295.

*Відомості про авторів / About the Authors*

**Васьковський Юрій Миколайович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри електромеханіки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; тел.: (050) 10-220-10; e-mail: [vun157@gmail.com](mailto:vun157@gmail.com).

**Васьковський Юрій Николаевич** – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», профессор кафедры электромеханики; тел.: (050) 10-220-10; e-mail: [vun157@gmail.com](mailto:vun157@gmail.com).

**Vaskovskiy Yuriy Nikolaevich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor at the Department of Electromechanics, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kiyv Polytechnic Institute», tel.: (050) 10-220-10; e-mail: [vun157@gmail.com](mailto:vun157@gmail.com).

**Гераскін Олександр Анатолійович** – кандидат технічних наук, асистент кафедри електромеханіки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; тел.: (099) 364-75-94; e-mail: [nirbikalpasamadhi@ukr.net](mailto:nirbikalpasamadhi@ukr.net).

**Гераскин Александр Анатольевич** – кандидат технических наук, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», ассистент кафедры электромеханики; тел.: (099) 364-75-94; e-mail: [nirbikalpasamadhi@ukr.net](mailto:nirbikalpasamadhi@ukr.net).

**Geraskin Alexandr Anatolievich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Lecturer at the Department of Electromechanics, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kiyv Polytechnic Institute», tel.: (099) 364-75-94; e-mail: [nirbikalpasamadhi@ukr.net](mailto:nirbikalpasamadhi@ukr.net).

**Беленок Надія Володимирівна** – старший викладач кафедри теоретичної електротехніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; e-mail: [nv\\_kpi@ukr.net](mailto:nv_kpi@ukr.net).

**Беленок Надежда Владимировна** – старший преподаватель кафедры теоретической электротехники, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»; e-mail: [nv\\_kpi@ukr.net](mailto:nv_kpi@ukr.net).

**Belenok Nadiya Volodimirivna** – Senior Lecturer at the Department of Theoretical electrical Engineering, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kiyv Polytechnic Institute»; e-mail: [nv\\_kpi@ukr.net](mailto:nv_kpi@ukr.net).