

УДК 621.313.322-752.001.4

М. І. Войтович*, Р. В. Лампіка**

*Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного,
кафедра інженерної механіки,

**Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра проектування і експлуатації машин

ВПЛИВ ЛОКАЛЬНИХ ПЕРЕГРІВІВ НА ТЕМПЕРАТУРНЕ ПОЛЕ РОТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА

О Войтович М. І., Лампіка Р. В., 2017

Запропонована методика визначення інтегральних характеристик температурного поля ротора турбогенератора у разі локальних перегрівів стосовно дослідження його прогинів і рівня вібрації; досліджено вплив теплофізичних і геометричних параметрів ротора ТГВ-500-4 на його температурне поле.

Ключові слова: ротор турбогенератора, вібрації, температурне поле, рівняння теплопровідності.

The method of determining the integral characteristics of the temperature field of a turbine generator rotor in the case of local overheating is proposed in relation to the study of its deflections and the level of vibration; Influence of thermophysical and geometrical parameters of rotor ТГВ-500-4 on its temperature field is investigated.

Key words: rotor of turbogenerator, vibration, temperature field, heat equation.

Вступ. У процесі експлуатації турбогенераторів виникають локальні перегриви роторів, зумовлені асиметрією охолодження, анізотропією поковки, внутрішнім тертям та іншими причинами, які призводять до появи температурних прогинів і підвищення рівня вібрацій, що, своєю чергою, може призвести до аварійних ситуацій [1, 2]. У зв'язку з цим питання діагностики і вироблення способів усунення теплової незрівноваженості роторів є доволі актуальним. Ефективність розроблених при цьому заходів істотно залежить від повноти оцінок впливу різних термодфектів на температурне поле, прогини і вимушені коливання ротора [2–4]. У [5] отримані рівняння теплопровідності прямолінійного стрижня багатозв'язного поперечного перерізу, тобто рівняння на величини, які входять у рівняння термомеханіки стрижнів як складові навантаження. Нижче ці рівняння використані для визначення інтегральних характеристик температурного поля турбогенератора.

Мета роботи – визначити параметричний аналіз температурного поля бочки ротора турбогенератора на основі рівнянь, отриманих у [5], з подальшим використанням знайдених розв'язків для визначення прогинів ротора; дослідження впливу кількості перегрітих пазів, їх орієнтації на температурні аналоги згинальних моментів.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо ротор турбогенератора. Зарахуємо його до Декартової системи координат $хуz$: $ох$, $оу$ – головні центральні осі його поперечного перерізу, z – осьова координата; на рис. 1 схематично показано поперечний переріз бочки (середньої частини) ротора ТГВ-500-4. На зовнішній і внутрішній поверхнях (яким відповідають контури L_0 і L_{57}) відбувається конвективний теплообмін з омиваючими середовищами. На поверхні i -го паза відбувається неідеальний тепловий контакт із заповнювачем, температуру якого позначимо через $t_c^{(i)}$, тобто відбувається теплообмін через проміжковий шар завтовшки d_i і з коефіцієнтом теплопровідності $I_n^{(i)}$ ($i=1; 56$). Далі вважатимемо параметри d_i і $I_n^{(i)}$ однаковими для усіх шарів:

$$d_i = d, I_n^{(i)} = I \quad (i = \overline{1; 56}). \tag{1}$$

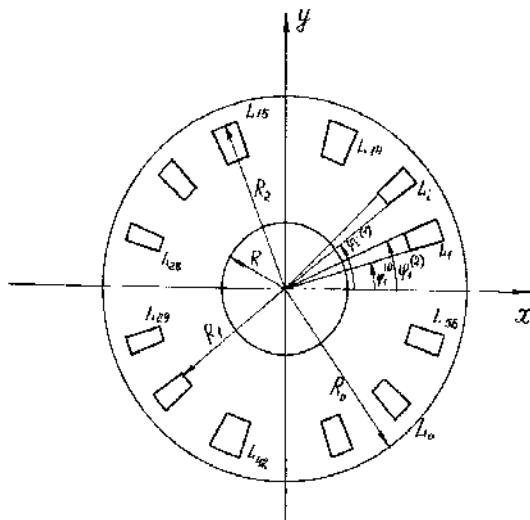


Рис. 1. Схематичне зображення поперечного перерізу ротора ТТВ-500-4

За відсутності перегріву однаковими вважаються і температури $t_c^{(i)}$. Якщо в одному або кількох пазах відбувається перегрів, то вважатимемо, що температура у них підвищилася до деякого значення $t_0(z)$. Визначимо і проведемо параметричний аналіз інтегральних характеристик температурного поля бочки ротора з метою подальшого їх використання під час дослідження температурних прогинів ротора.

Для визначення температурного поля бочки ротора під час його перегрівів використаємо систему рівнянь теплопровідності стрижня багатозв'язного поперечного перерізу [5]. Із симетрії поперечного перерізу бочки ротора щодо осей ox і oy , а також враховуючи припущення (1), впливає, що у вищевказаних рівняннях [5]

$$a_{12} = a_{12} = a_{12} = a_{12} = a_{12} = a_{12} = 0.$$

Тоді у стаціонарному випадку система рівнянь теплопровідності бочки ротора набуває такого вигляду:

$$\begin{aligned} \Lambda \frac{d^2 T}{dz^2} - a_{11} T &= T_{00}^{(c)}; \\ \Lambda \frac{d^2 \Theta_x}{dz^2} - a_{33} \Theta_x &= T_{01}^{(c)}; \\ \Lambda \frac{d^2 \Theta_y}{dz^2} - a_{22} \Theta_y &= T_{10}^{(c)}. \end{aligned} \tag{2}$$

де T , Θ_x і Θ_y – температурні аналоги поздовжньої сили і згинальних моментів бочки ротора; Λ – площа її поперечного перерізу $\Lambda = I A$;

$$\begin{aligned} T_{00}^{(c)} &= - \left[\int_{L_0} a_0 t_c^{(0)} dl + \int_{L_{57}} a_0 t_c^{(57)} dl + \sum_{i=1}^{56} \int_{L_i} \frac{I_n}{d_i} t_c^{(i)} dl \right]; \\ T_{10}^{(c)} &= - \left[\int_{L_0} a_0 t_c^{(0)} x dl + \int_{L_{57}} a_0 t_c^{(57)} x dl + \sum_{i=1}^{56} \int_{L_i} \frac{I_n}{d_i} t_c^{(i)} x dl \right] \frac{A \cdot x_{max}}{y_y}; \\ T_{01}^{(c)} &= - \left[\int_{L_0} a_0 t_c^{(0)} y dl + \int_{L_{57}} a_0 t_c^{(57)} y dl + \sum_{i=1}^{56} \int_{L_i} \frac{I_n}{d_i} t_c^{(i)} y dl \right] \frac{A \cdot y_{max}}{y_x}. \end{aligned}$$

Якщо теплообмін з омиваючими середовищами приєднаних до бочки частин ротора можна вважати осесиметричним (що відповідає реальним умовам експлуатації), то граничні умови на торцях бочки ротора ($z = 0, z = l_2$) можуть бути зведені до:

$$\begin{aligned}
 T &= T_c^{(1)}, \quad \frac{d\Theta_y}{dz} = 0, \quad \frac{d\Theta_x}{dz} = 0 \quad \text{при } z = 0; \\
 T &= T_c^{(2)}, \quad \frac{d\Theta_y}{dz} = 0, \quad \frac{d\Theta_x}{dz} = 0 \quad \text{при } z = l_2,
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

де $T_c^{(1)}$, $T_c^{(2)}$ – відомі величини; l_2 – довжина бочки ротора.

Розв’язок рівнянь (2), який задовольняє умови (3), знаходимо у такому вигляді:

$$\begin{aligned}
 T &= -2Cshk_1V - T_c^{(1)}e^{k_1V} + \frac{l_2^2}{I_cAk_1} \int_0^V T_{00}^{(c)}(x)shk_1(V-x)dx, \\
 \Theta_y &= \frac{l_2^2}{I_cF} \left[\frac{chk_2V}{k_2shk_2} \int_0^1 T_{10}^{(c)}(x)chk_2(1-x)dx + \frac{1}{k_2} \int_0^V T_{10}^{(c)}(x)chk_2(V-x)dx \right]; \\
 \Theta_x &= -\frac{l_2^2}{I_cF} \left[\frac{chk_3V}{k_3shk_3} \int_0^1 T_{01}^{(c)}(x)chk_3(1-x)dx + \frac{1}{k_3} \int_0^V T_{01}^{(c)}(x)chk_3(V-x)dx \right].
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

У формулах (4) введені такі позначення:

$$\begin{aligned}
 C &= -shk_1 \left[T_c^{(1)}e^{k_1} - T_c^{(2)} + \frac{l_2^2}{I_cAx_1} \int_0^V T_{00}^{(c)}(x)shk_1(1-x)dx \right]; \\
 k_i^2 &= \frac{b_0^2 l_*^2 a_{ii}}{p \left[(1-b^2)b_0^2 - \frac{112}{294}(1-b_1^2) \right]}, \quad (i=1, 2, 3); \\
 a_{11}^0 &= B_i + 112(1-b_1)l_*d_0^{-1} + l_*d_0^{-1}(1+b_1) \frac{224}{294}; \\
 a_{22}^0 &= \frac{1}{2}b_0d_0l_*B_i + b_0^{-1} \sum_{i=1}^{56} \left\{ \frac{1}{2}(1-b_1^3)(\cos^2 j_i^{(1)} + \cos^2 j_i^{(2)}) + \frac{1}{2}(1+b_1^3)[j_i^{(2)} - j_i^{(1)}] + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{2}(\sin 2j_i^{(2)} - \sin 2j_i^{(1)}) \right\} + p(1-b^2)b_0 - \frac{112}{294}p(1-b_1^2)b_0^{-1}; \\
 a_{33}^0 &= \frac{1}{2}b_0d_0l_*^{-1}B_i + b_0^{-1} \sum_{i=1}^{56} \left\{ \frac{1}{2}(1-b_1^3)(\sin^2 j_i^{(1)} + \cos^2 j_i^{(2)}) + \frac{1}{2}(1+b_1^3)[j_i^{(2)} - j_i^{(1)}] - \right. \\
 &\quad \left. - \frac{1}{2}(\sin 2j_i^{(2)} - \sin 2j_i^{(1)}) \right\} + p(1-b^2)b_0 + \frac{112}{294}p(1-b_1^2)b_0^{-1}; \\
 l_* &= \frac{l_n}{l_c}, \quad B_i = \frac{a_0}{l_c} 2pR_0, \quad R_0R_2^{-1} = b_0, \quad R_1R_2^{-1} = b_1; \\
 RR_0^{-1} &= b; \quad dR_2^{-1} = d_0, \quad l_* = l_2R_0^{-1}, \quad V = \frac{z}{l_2} \quad (0 \leq V \leq 1).
 \end{aligned}$$

Для ротора ТГВ-500-4 (рис. 1) кути $j_i^{(1)}$ і $j_i^{(2)}$, які визначають розміщення i -го паза, для першої ($i = \overline{1;14}$), другої ($i = \overline{15;28}$), третьої ($i = \overline{29;42}$) і четвертої ($i = \overline{43;56}$) чвертей набувають таких значень:

$$\begin{aligned}
 j_i^{(1)} &= \frac{26p}{294} + (i-1)\frac{7p}{294}; & j_i^{(2)} &= \frac{30p}{294} + (i-1)\frac{7p}{294}; & (i = \overline{1;14}); \\
 j_i^{(1)} &= \frac{173p}{294} + (i-15)\frac{7p}{294}; & j_i^{(2)} &= \frac{177p}{294} + (i-15)\frac{7p}{294}; & (i = \overline{15;28}); \\
 j_i^{(1)} &= \frac{320p}{294} + (i-29)\frac{7p}{294}; & j_i^{(2)} &= \frac{324p}{294} + (i-29)\frac{7p}{294}; & (i = \overline{29;42}); \\
 j_i^{(1)} &= \frac{467p}{294} + (i-43)\frac{7p}{294}; & j_i^{(2)} &= \frac{471p}{294} + (i-43)\frac{7p}{294}; & (i = \overline{43;56}).
 \end{aligned}$$

Нехай зовнішнє середовище має нульову температуру $t_c^{(0)} = 0$, внутрішня циліндрична поверхня бочки ротора теплоізолювана ($a_{57} = 0$), температури у пазах ротора змінюються за лінійним законом

$$t_c^{(i)} = b_0 V. \quad (5)$$

Розглянемо спочатку випадок, коли перегрів відбувається в одному із пазів, які мають номери $i = \overline{1;7}$. Конструктивне виконання ротора ТГВ-500-4 таке, що при цьому відбудеться перегрів і в одному із пазів, які мають номери, відповідно, $i = \overline{50;56}$, а саме в пази, який симетричний до осі ox i -го паза ($i = \overline{1;7}$). Внаслідок вказаної симетрії температурний аналог згинального моменту Θ_x дорівнюватиме нулю, а для Θ_y із формул (4) після відповідних обчислень отримаємо такий вираз:

$$\Theta_y = (a_{22}^0)^{-1} \left\{ A_j + bA_2 k_2^{-1} \left[(chk_2 - 1) sh^{-1} k_2 chk_2 V - shk_2 V + k_2 V \right] \right\} t_0. \quad (0 \leq V \leq 1), \quad (6)$$

де

$$\begin{aligned}
 A_{j,r} &= (1 - b_1^2) (\cos j_{j,r}^{(1)} + \cos j_{j,r}^{(1)}) + 2(1 + b_1^2) (\sin j_{j,r}^{(2)} - \sin j_{j,r}^{(1)}); \\
 j &= 1 + k, \quad r = 28 - k; \quad k = \overline{0;6}; \\
 b &= b_0 t_0^{-1}.
 \end{aligned}$$

Якщо перегрів на температуру t_0 відбувається в одному із пазів, які мають номери $i = \overline{8;14}$, то нагріватися буде і один із пазів з номерами, відповідно, $i = \overline{15;21}$, так що площиною симетрії буде площина hoz ; тоді $\Theta_y = 0$, а для Θ_x отримаємо таку формулу:

$$\begin{aligned}
 \Theta_x &= (a_{33}^0)^{-1} \left\{ A_l + bA_3 k_3^{-1} \left[(\cos k_3 - 1) sh^{-1} k_3 chk_3 V - shk_3 V + k_3 V \right] \right\} t_0, \quad (0 \leq V \leq 1); \\
 A_{l,s} &= (1 - b_1^2) (\sin j_{l,s}^{(1)} + \sin j_{l,s}^{(1)}) + 2(1 + b_1^2) (\cos j_{l,s}^{(2)} - \cos j_{l,s}^{(1)}).
 \end{aligned} \quad (7)$$

Розв'язок для випадків, коли перегрів відбувається у кількох пазах, отримаємо відповідну суперпозицію розв'язків (6) і (7) (внаслідок лінійності задачі, що розглядається).

Був проведений параметричний аналіз характеристик температурного поля ротора у разі місцевих перегрівів. Обчислення проводились для ротора ТГВ-500-4 з такими характеристиками:

$$\begin{aligned}
 R_0 &= 0,9 \text{ м}; \quad R = 0,2 \text{ м}; \quad d_n = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad R_1 = 0,73 \text{ м}; \quad R_2 = 0,87 \text{ м}; \\
 l_1 &= 1,46 \text{ м}; \quad l_2 = 5,5 \text{ м}; \quad l_3 = 1,46 \text{ м}; \quad a_0 = 600 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}.
 \end{aligned}$$

Відповідно для нерозмірних параметрів, які входять у розрахункові формули, отримаємо:

$$\begin{aligned}
 b_0 = 1,04; \quad b = 0,2222; \quad b_1 = 0,843; \quad d_0 = 0,2307 \cdot 10^{-2}; \\
 l_* = 6,11; \quad V_1 = 0,2655; \quad V_3 = 1,2655; \quad Bi = 234.
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

На рис. 2 показано залежність температурного аналога згинального моменту Θ_y від орієнтації (номера) паза, у якому відбувається перегрів; тут розглядається випадок, коли перегрів відбувається в одному з пазів з номерами $n = \overline{1;7}$; нагадаємо, що при цьому $\Theta_x = 0$. Графіки побудовані для різних (вказаних біля відповідних кривих) значень параметра I_* , який характеризує відношення коефіцієнтів теплопровідності матеріалів проміжкових шарів і ротора. На цьому графіку по осі ординат відкладена відповідно величина

$$\Theta = 10 \Theta_y \cdot t_0^{-1}, \tag{9}$$

а по осі абсцис відкладені номери перегрітих пазів. Отримані графіки показують, що зі збільшенням теплопровідності проміжкового шару збільшується і температурний аналог згинального моменту Θ_y .

На рис. 3 показаний розподіл величини Θ вздовж осі ротора ($V = z \cdot l_2^{-1}$) у випадку, коли в пазу з номером $n = 1$ (і йому, симетричному стосовно площини хоз з номером $n = 56$), температура дорівнює t_0 , а в решта пазів температура змінюється за лінійним законом $t_c^{(i)} = b_0 V$ ($i = \overline{2;55}$).

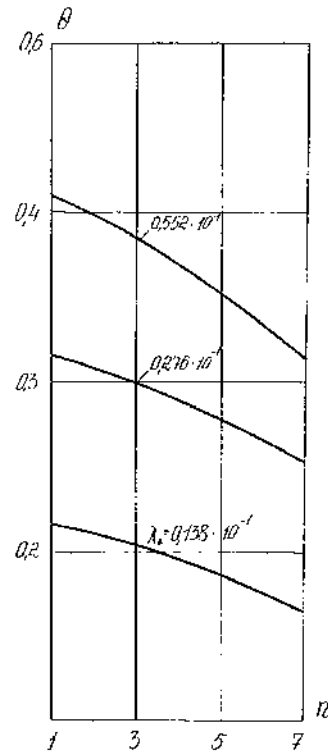


Рис. 2. Залежність температурного аналога згинального моменту Θ від орієнтації (номера) перегрітого паза

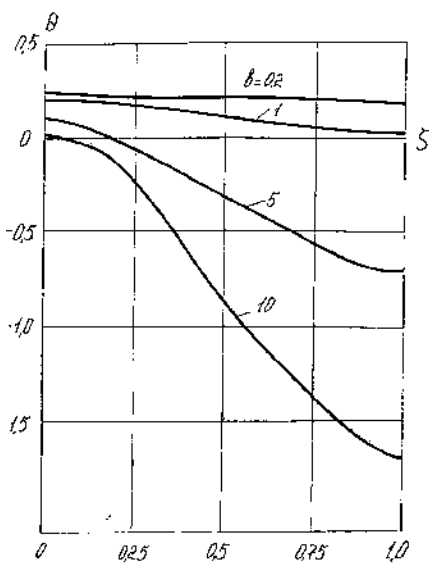


Рис. 3. Розподіл температурного аналога згинального моменту Θ вздовж осі ротора

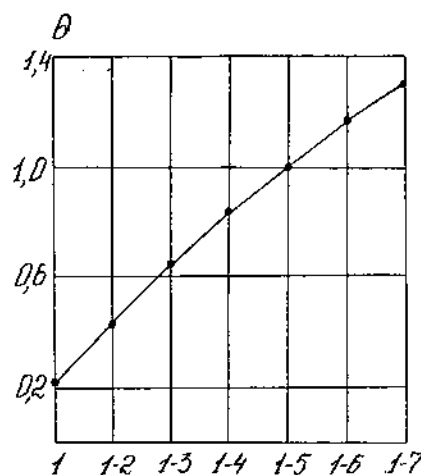


Рис. 4. Залежність температурного аналога згинального моменту Θ від кількості перегрітих пазів

Криві на цьому рисунку побудовані для різних значень параметра b ($b = b_0 t_0^{-1}$).

На рис. 4 показаний температурний аналог згинального моменту Θ залежно від кількості перегрітих пазів. При цьому по осі ординат відкладені значення Θ . А по осі абсцис – кількість перегрітих пазів, вказана на рисунку їх номерами. Цей графік отриманий для випадку, коли температура у перегрітих пазах приймається нульовою. Із графіка бачимо, що температурний аналог згинального моменту Θ із збільшенням кількості перегрітих пазів зростає.

Отримані формули (6) і (7) дають змогу визначити (подібно до того, як це було описано вище) температурне поле ротора у разі перегріву будь-якої кількості пазів і в будь-якій їх комбінації.

Висновки. На основі отриманих раніше рівнянь теплопровідності прямолінійного стрижня багатозв'язного поперечного перерізу [5] запропонована методика визначення температурних аналогів поздовжньої сили і згинальних моментів ротора турбогенератора у разі локальних перегрівів з метою подальшого використання цих величин як складових навантаження під час визначення прогинів і рівня вібрацій.

Досліджено вплив орієнтації перегрітих пазів, їх кількості, відношення коефіцієнтів теплопровідності матеріалів проміжкових шарів (поковки) і ротора на характеристики температурного поля ротора ТГВ-500-4.

1. *Термопрочность деталей машин; под ред. И. А. Биргера и Б. Ф. Шара. – М.: Машиностроение, 1975. – 455 с.* 2. *Брановский М. А. устранение тепловой неуравновешенности роторов с форсированным охлаждением обмоток / М. А. Брановский, А. П. Сивков // Электрические станции. – 1964. – № 9. – С.28–33.* 3. *Rublle G. Mechanical problem of turbogenerators / Rublle G. // Electra. – 1983. – Vol. 86. – P. 5–21.* 4. *Lok H. Thermal stresses in multi-layered curved bars / H. Lok, H. Conway // Fibre Sci and Technol. – 1976. – Vol. 9, № 2. – P. 135–151.* 5. *До розрахунку термонапруженого стану стрижневих елементів багатозв'язних поперечних перерізів // М. І. Войтович, Р. В. Лампіка // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Динаміка, міцність та проектування машин і приладів”. – 2016. – № 838. – С. 17–22.*