

## ОСОБЛИВОСТІ ТЕПЛОВОГО РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА З ЯВНОПОЛЮСНИМ СТАТОРОМ І ЗОВНІШНІМ ПАСИВНИМ РОТОРОМ

© Ткачук В.І., Біляковський І.Є., Продиус В.М., Вайда Б.Р., 2007

**Запропонована методика теплового розрахунку вентильних реактивних двигунів оберненої конструкції, що дає змогу з достатньою для інженерної практики точністю здійснювати відповідні розрахунки цих двигунів, які доцільно застосовувати для прямих приводів механізмів.**

**Methodic of thermal calculation switched reluctance motors with unscrewed construction is given. It allows to perform projects calculations with engineering precision, which are advisable to apply in direct-drive mechanism.**

**Постановка проблеми.** Вентильний двигун (ВД) з явнополюсним статором і пасивним ротором, характеризується простотою конструкції та технологією виготовлення і є дешевшим та економічнішим за найпростіші асинхронні електричні машини, у той самий час забезпечує якісні споживчі характеристики.

Для безредукторного приводу деяких механізмів виникає необхідність застосування конструкції із зовнішнім ротором. Синтез та аналіз вентильних двигунів з зовнішнім ротором вимагає простого і надійного методу теплового розрахунку, оскільки від цього залежить працездатність спроектованої машини.

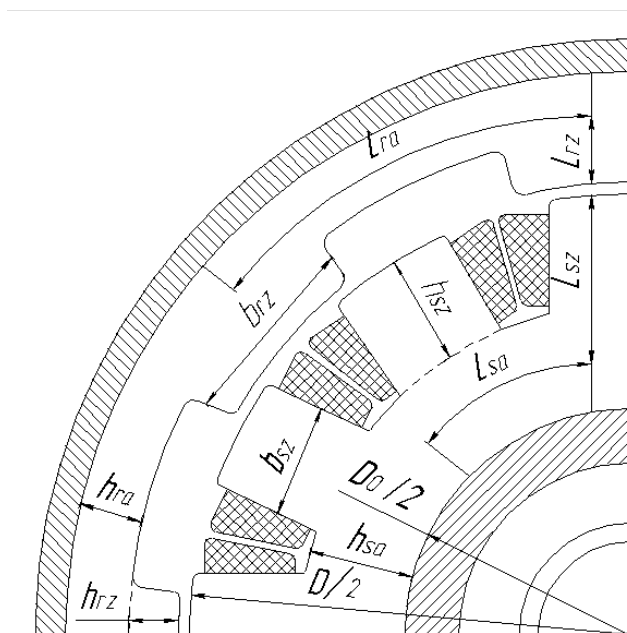


Рис. 1. Електромеханічний перетворювач з явнополюсним внутрішнім статором і пасивним зовнішнім ротором

Явнополюсний внутрішній статор, зосереджені котушки його обмотки та відсутність обмотки на зовнішньому роторі (рис. 1) зумовлюють відмінність методики теплового розрахунку ВД з пасивним ротором від відомих, висвітлених в літературі [1–3].

У статті наведено методику теплового розрахунку електромеханічного перетворювача з явнополюсним статором й зовнішнім пасивним ротором.

**Задачі досліджень.** До задач теплового розрахунку зараховують визначення середньої температури активних частин машини, визначення максимальних значень температури залежно від параметрів режиму навантаження, обчислення теплових потоків між суміжними елементами конструкції тощо.

Вихідними даними є розподіл втрат енергії по об'єму машини, значення фізичних величин, насамперед теплопровідності і теплоємності, та умови охолодження на межових поверхнях.

**Виклад основного матеріалу.** У вентильних двигунах з пасивним ротором джерелами тепла є втрати в міді обмотки статора  $\Delta P_m$ , втрати в сталі статора  $\Delta P_{sts}$  та ротора –  $\Delta P_{str}$  та механічні втрати, що передбачають втрати на тертя в підшипниках та тертя зубців ротора до повітря  $\Delta P_{mex}$ .

Для проведення теплового розрахунку скористаємось методикою теплового розрахунку асинхронного короткозамкнутого двигуна, яка викладена в [3], і прийнемо такі допущення:

- втрати в міді зосереджені в центральній частині котушок обмотки статора, втрати в сталі статора зосереджені в центральних аксіальних лініях зубців і центральному циліндрі ярма;
- коефіцієнти теплопровідності матеріалів та повітря постійні і дорівнюють їхнім значенням при розрахунковій температурі  $\theta = 115^\circ\text{C}$ ;
- осердя статора та ротора проводять тепло тільки в радіальному напрямку.

Теплові потоки розповсюджуються в таких напрямках:

- від обмотки статора до зубців та спинки статора;
- від зубців статора через повітряний проміжок до ротора;
- від ротора до внутрішнього повітря;
- від обмотки статора через міжвиткову ізоляцію до внутрішнього повітря;
- від внутрішнього повітря до торцевих поверхонь ротора, які віддають тепло зовнішньому повітрю.

Отже, тепла заступна схема (рис. 2) складатиметься з п'яти елементів:

- обмотка статора ( $M$ ) з втратами  $\Delta P_m$  та середньою температурою  $\theta_m$ ;
- статор ( $S$ ) з втратами  $\Delta P_{sts}$  та середньою температурою  $\theta_s$ ;
- ротор ( $R$ ) з втратами  $\Delta P_{str}$  та середньою температурою  $\theta_r$ ;
- внутрішнє повітря ( $P$ ) з втратами  $\Delta P_{mex}$  та середньою температурою  $\theta_p$ ;
- корпус ротора  $K_r$  з середньою температурою  $\theta_{kr}$ .

Елементи заступної теплової схеми зв'язані між собою тепловими провідностями. Температура зовнішнього повітря  $\theta_3$ .

За заступною схемою складемо систему лінійних алгебричних рівнянь.

$$\begin{bmatrix} \Lambda_{11} & -\Lambda_{ms} & 0 & -\Lambda_{mp} & 0 \\ -\Lambda_{ms} & \Lambda_{22} & -\Lambda_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & -\Lambda_{sr} & \Lambda_{33} & -\Lambda_{pr} & -\Lambda_{rkr} \\ -\Lambda_{mp} & 0 & -\Lambda_{pr} & \Lambda_{44} & -\Lambda_{pkr} \\ 0 & 0 & -\Lambda_{kr} & -\Lambda_{pkr} & \Lambda_{55} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta_m \\ \theta_s \\ \theta_r \\ \theta_p \\ \theta_{kr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta P_{sts} \\ \Delta P_{str} \\ \Delta P_{mex} \\ \theta_3 \cdot \Lambda_{kr3} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де

$$\Lambda_{11} = \Lambda_{mp} + \Lambda_{ms};$$

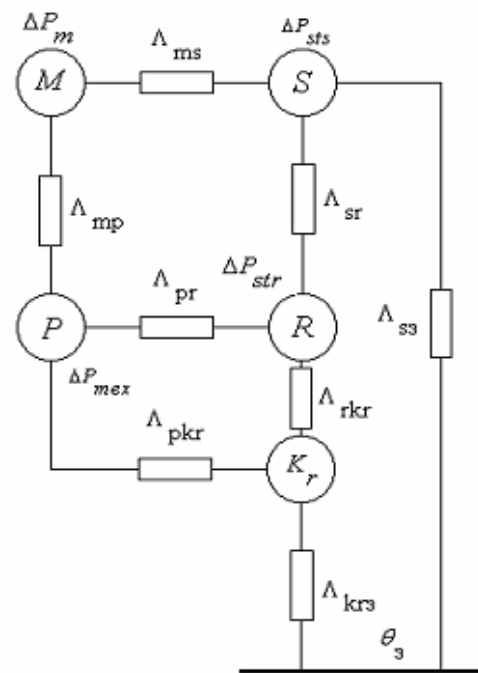


Рис. 2. Заступна тепла схема ЕМП з явнополюсним статором і пасивним зовнішнім ротором

$$\begin{aligned}
\Lambda_{22} &= \Lambda_{ms} + \Lambda_{sr} + \Lambda_{sz} ; \\
\Lambda_{33} &= \Lambda_{sr} + \Lambda_{pr} + \Lambda_{rkr} ; \\
\Lambda_{44} &= \Lambda_{mp} + \Lambda_{pr} + \Lambda_{pkr} ; \\
\Lambda_{55} &= \Lambda_{rkr} + \Lambda_{pkr} ;
\end{aligned}
\tag{2}$$

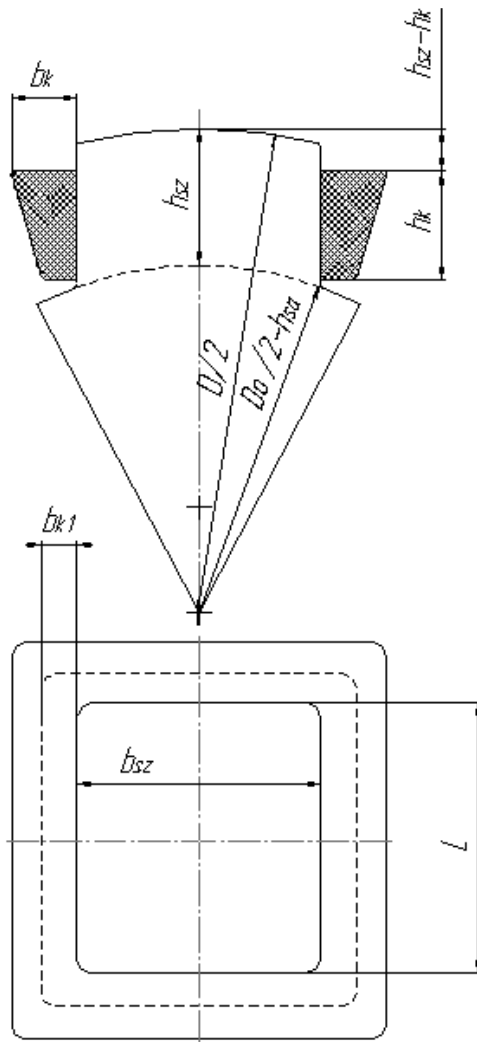


Рис. 3. До розрахунку площ охолодження

контактують з ярмом статора, цих самих торців, які контактують з внутрішнім повітрям відповідно (рис. 3);  $b_{sz}$  – ширина зубця статора;  $h_k$  – висота котушки;  $b_k$ ,  $b_{k1}$  – одностороння ширина котушки (верхня й нижня);  $b_{ks}$  – середнє значення односторонньої ширини котушки.

$$b_{k1} = \sqrt{\frac{D_0^2}{4} + D_0 \cdot h_{sa} + h_{sa}^2 - \frac{D^2}{4} - D \cdot h_{sz} + h_{sz}^2} - \frac{b_{sz}}{2} ; \quad b_{ks} = \frac{1}{2} \cdot (b_k + b_{k1}) .$$

**Розрахунок теплових провідностей. 1. Тепловий потік від міді до зубців і ярма** долає тепловий опір виткової ізоляції провідників, лаку та повітряних проміжків між провідниками, тепловий опір повітряного проміжку між каркасом та зубцем, тепловий опір зубця. Отже, тепла провідність від міді до зубців

$\Lambda_{ms}$  – теплопровідність від обмотки статора до зубців і спинки статора;  $\Lambda_{mp}$  – теплопровідність від обмотки статора через міжвиткову ізоляцію до внутрішнього повітря;  $\Lambda_{sr}$  – теплопровідність від зубців статора через повітряний проміжок до ротора;  $\Lambda_{pr}$  – теплопровідність від ротора до внутрішнього повітря;  $\Lambda_{rkr}$  – теплопровідність від ротора до корпусу ротора;  $\Lambda_{pkr}$  – теплопровідність від внутрішнього повітря до підшипникових щитів та корпусу ротора;  $\Lambda_{krz}$  – теплопровідність від корпусу ротора до зовнішнього повітря;  $\Lambda_{sz}$  – теплопровідність від статора до зовнішнього повітря.

Для знаходження невідомих температур необхідно попередньо обчислити теплові провідності, які входять в (1).

Позначимо:

$$\begin{aligned}
S_1 &= (2 \cdot b_{sz} + 2 \cdot L) \cdot h_k \cdot Z_s ; \\
S_2 &= (2 \cdot b_{sz} + 2 \cdot L + 2 \cdot \pi \cdot b_{ks}) \cdot h_k \cdot Z_s ; \\
S_3 &= \left[ (2 \cdot (b_{sz} + L) \cdot b_{k1} + \pi \cdot b_{k1}^2) \right] \cdot Z_s ; \\
S_4 &= (2 \cdot b_{k1} \cdot L) \cdot Z_s ; S_5 = S_3 - S_4 ,
\end{aligned}$$

де  $S_1, S_2, S_3, S_4$  – площі контакту котушок обмотки статора з зубцями, площа контакту котушок обмотки статора з внутрішнім повітрям, торців котушок, які

$$\Lambda_{m.z} = \frac{1}{\frac{1}{\Lambda_{e.m.z}} + \frac{1}{\Lambda_{k.m.z}} + \frac{1}{\Lambda_{\delta.m.z}} + \frac{1}{\Lambda_{z.m.z}}}, \quad (3)$$

де  $\Lambda_{e.m.z}$  – еквівалентна теплопровідність виткової ізоляції, лаку і повітряних проміжків;  
 $\Lambda_{k.m.z}$  – теплопровідність каркаса;  $\Lambda_{\delta.m.z}$  – теплопровідність повітряного проміжку між каркасом і зубцем;  $\Lambda_{z.m.z}$  – теплопровідність зубця статора.

$$\Lambda_{e.m.z} = \frac{2 \cdot (d_{i.p} + \delta_p) \cdot \lambda_e \cdot S_1}{b_k \cdot (\Delta_{i.p} + \delta_p)}, \quad (4)$$

де  $d_{i.p}$  – діаметр ізолюваного провідника;  $\delta_p$  – повітряний проміжок між провідниками;  $\lambda_e$  – коефіцієнт еквівалентної провідності обмотки з провідників типу ПЭТВ або ПЭТ;  $\Delta_{i.p}$  – одностороння товщина ізоляції провідника.

$$\delta_p = d_{i.p} \cdot \left[ 0.022 + 0.5 \left( \frac{1}{\sqrt{K_3}} - 1 \right) \right], \quad (5)$$

де  $K_3$  – коефіцієнт заповнення котушки провідниками.

$$\lambda_e = 0.178 \cdot \left[ 1 - 320 \cdot d_{i.p} \cdot \left( 1 - 9.2 \cdot K_p + 5.2 \cdot K_p^2 \right) + 81 \cdot 10^4 \cdot d_{i.p}^2 \right], \quad (6)$$

де  $K_p$  – коефіцієнт просочування.

$$\Lambda_{k.m.z} = \frac{(S_1 \cdot \lambda_k)}{\Delta_{kark}}, \quad (7)$$

де  $\lambda_k$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу каркаса;  $\Delta_{kark}$  – товщина каркаса.

$$\Lambda_{\delta.m.z} = \frac{(S_1 \cdot \lambda_{\delta})}{\delta_{zk}}, \quad (8)$$

де  $\lambda_{\delta}$  – коефіцієнт теплопровідності повітря при температурі 115 °С;  $\delta_{zk}$  – величина повітряного проміжку між каркасом котушки і зубцем статора.

$$\Lambda_{z.m.z} = 4 \cdot h_k \cdot Z_s \cdot \lambda_s \cdot \left( \frac{L}{b_{zs}} + \frac{b_{sz}}{L} \right), \quad (9)$$

де  $\lambda_s$  – коефіцієнт теплопровідності сталі.

## 2. Теплопровідність від міді до ярма статора

$$\Lambda_{ms} = \frac{1}{\frac{1}{\Lambda_{e.m.a}} + \frac{1}{\Lambda_{k.m.a}} + \frac{1}{\Lambda_{\delta.m.a}} + \frac{1}{\Lambda_{a.m.a}}}, \quad (10)$$

де  $\Lambda_{e.m.a}$  – еквівалентна теплопровідність виткової ізоляції, лаку і повітряних проміжків;  
 $\Lambda_{k.m.a}$  – теплопровідність каркаса;  $\Lambda_{\delta.m.a}$  – теплопровідність повітряного проміжку між каркасом і ярмом;  $\Lambda_{a.m.a}$  – теплопровідність ярма статора.

$$\Lambda_{e\_m.a} = \frac{2 \cdot (d_{i.p} + \delta_p) \cdot \lambda_e \cdot S_4}{h_k \cdot (\Delta_{i.p} + \delta_p)} ; \quad (11)$$

$$\Lambda_{k\_m.a} = \frac{S_4 \cdot \lambda_k}{\Delta_{kark}} ; \quad (12)$$

$$\Lambda_{\delta\_m.a} = \frac{S_4 \cdot \lambda_{\delta}}{\delta_{zk}} ; \quad (13)$$

$$\Lambda_{a\_m.a} = \frac{4 \cdot S_4 \cdot \lambda_s}{h_{sz}} . \quad (14)$$

### 3. Теплопровідність від міді до внутрішнього повітря

$$\Lambda_{mp} = \frac{\Lambda_{m\_m\delta} \cdot \Lambda_{\delta\_m\delta}}{\Lambda_{m\_m\delta} + \Lambda_{\delta\_m\delta}} , \quad (15)$$

де  $\Lambda_{m\_m\delta}$  – теплопровідність від центра до зовнішньої поверхні котушки;  $\Lambda_{\delta\_m\delta}$  – теплопровідність поверхні котушки, яка межує з внутрішнім повітрям.

Еквівалентна теплопровідність виткової ізоляції, лаку і повітряних проміжків у напрямку до зовнішньої поверхні котушки

$$\Lambda_{e\_m\delta} = \frac{2 \cdot (d_{i.p} + \delta_p) \cdot \lambda_e \cdot S_2}{b_k \cdot (\Delta_{i.p} + \delta_p)} . \quad (16)$$

Еквівалентна теплопровідність виткової ізоляції у напрямку до торцевих поверхонь

$$\Lambda_{em\_mz} = \frac{2 \cdot (d_{i.p} + \delta_p) \cdot \lambda_e \cdot (S_3 + S_5)}{h_k \cdot (\Delta_{i.p} + \delta_p)} . \quad (17)$$

Теплова провідність зовнішньої відкритої частини катушок

$$\Lambda_{em\_m\delta} = \frac{\lambda_{em} \cdot S_2}{\Delta_{i.p}} , \quad (18)$$

де  $\lambda_{em} = 0.143 \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ \text{C}} \right]$  – коефіцієнт теплопровідності емальової ізоляції зовнішніх провідників в катушках.

Провідність торцевих частин каркасів катушок

$$\Lambda_{k\_m.\delta} = \frac{\lambda_k \cdot (s_3 + s_5)}{\Delta_{i.p}} ; \quad (19)$$

$$\Lambda_{m\_m\delta} = \frac{\Lambda_{e\_m\delta} \cdot \Lambda_{em\_m\delta}}{\Lambda_{e\_m\delta} + \Lambda_{em\_m\delta}} + \frac{\Lambda_{em\_m\delta} \cdot \Lambda_{k\_m\delta}}{\Lambda_{em\_m\delta} + \Lambda_{k\_m\delta}} ; \quad (20)$$

$$\Lambda_{\delta\_m\delta} = \alpha_1 \cdot (S_3 + S_5) , \quad (21)$$

де  $\alpha_1$  – коефіцієнт тепловіддачі з поверхні котушки, який, згідно з [3], обчислюють як

$$\alpha_1 = 12 \cdot \left( 1 + 0.5 \cdot \sqrt{0.45 \cdot \pi \cdot D \cdot \frac{n}{60}} \right). \quad (22)$$

#### 4. Теплопровідність від ротора до зубців статора

$$\Lambda_{sr} = \frac{\Lambda_{z_r.s} \cdot \Lambda_{\delta_r.s}}{\Lambda_{z_r.s} + \Lambda_{\delta_r.s}}, \quad (23)$$

де  $\Lambda_{z_{rs}} = \frac{b_{sz} \cdot L \cdot Z_s \cdot \lambda_s}{2 \cdot h_{zs}}$  – теплопровідність зубців зовнішнього статора;  $\Lambda_{\delta_{rs}} =$   
 $= \pi \cdot D \cdot L \cdot \frac{0.276 \cdot \lambda_{\delta}}{\delta} \cdot \left( \frac{2 \cdot \delta}{D - 2 \cdot \delta} \right)^{0.25} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot D \cdot n \cdot \delta}{1.134 \cdot 10^{-3}}}$  – теплопровідність повітряного проміжку.

#### 5. Теплопровідність від ярма статора до зовнішнього повітря

$$\Lambda_{s3} = \frac{1}{\frac{1}{\Lambda_{a.s3}} + \frac{1}{\Lambda_{bs3}}}, \quad (24)$$

де  $\Lambda_{a.s3}$  – теплопровідність від сталі ярма статора;  $\Lambda_{bs3}$  – теплопровідність від сталі ярма статора до зовнішнього повітря;

$$\Lambda_{a.s3} = \frac{\pi \cdot (D - b_{sz}) \cdot L \cdot \lambda_s}{2 \cdot b_{zs}};$$

$$\Lambda_{bs3} = \frac{\pi \cdot D_0 \cdot L \cdot \lambda_{\delta}}{0.025 \cdot 10^{-3}}.$$

#### 6. Провідність бічної поверхні ротора до внутрішнього повітря

$$\Lambda_{pr} = \left[ \pi \left( \frac{D}{2} + \delta + h_{rz} + h_{ra} \right)^2 - \pi \left( \frac{D}{2} + \delta \right)^2 - (b_{rz} \cdot h_{rz}) Z_r \right] \cdot 2 \cdot \lambda_{\delta}. \quad (25)$$

#### 7. Провідність від внутрішнього повітря до торцевих поверхонь ротора

$$\Lambda_{\delta.p.} = \alpha_{rtp} \cdot S_{rtp}, \quad (26)$$

де  $S_{rtp} = 2 \cdot \left( \frac{\pi \cdot D_z^2}{4} - \frac{\pi \cdot D_r^2}{4} \right)$ ;  $D_r$  – зовнішній діаметр ротора;

$$\alpha_{rtp} = \begin{cases} 15 + 6.5 \cdot V_r^{0.7} & \Leftarrow D_z \leq 0.225 \text{ м}; \\ 3.89 \cdot V_r^{1.02} & \Leftarrow D_z > 0.225 \text{ м} \end{cases}; \quad V_r = \frac{\pi \cdot (D - 2 \cdot \delta) \cdot n}{60}.$$

#### 8. Провідність від внутрішнього повітря до корпусу ротора

$$\Lambda_{pkr} = \alpha_k \cdot S_{ikr}, \quad (27)$$

де  $\alpha_k = 4.58 \cdot V_r^{0.74}$ ;

$$S_{ikr} = \pi \cdot D_z \cdot \left( 2 \cdot (L_{ra} - L_{sa}) + 10^{-2} \right).$$

**9. Теплопровідність від поверхні корпусу ротора до зовнішнього повітря**

$$\Lambda_{kr3} = \alpha_{k\Sigma} \cdot \pi \cdot (D_z + 2 \cdot \Delta_{корп}) \cdot k_p, \quad (28)$$

де

$$k_p = \frac{1}{\rho_m \cdot h_p} \left[ \text{th}(\rho_m \cdot h_p) \cdot \frac{2 \cdot h_p}{t_p} \cdot \left( 1 - \frac{\alpha_i}{\alpha_{k\Sigma}} \right) + \rho_m \cdot h_p \cdot \Delta k_p \right];$$

$$\rho_m = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_k}{\lambda_p \cdot b_p}};$$

$$\alpha_{k\Sigma} = \alpha_k + \alpha_i;$$

$$\Delta k_p = \frac{N_p \cdot (t_p - b_p)}{\pi \cdot (D_z + 2 \cdot \Delta_p)};$$

$$\alpha_\mu = 6.8 \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ \text{C}} \right] - \text{коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням поверхні корпусу}; h_p, b_p, t_p, N_p -$$

висота, ширина, крок та кількість ребер на поверхні корпусу ротора;

$$\alpha_k = 0.0056 \frac{1}{d_{ek}} \text{Re}^{0.66} \left( \frac{d_{ek}}{l_p} \right)^{0.08};$$

$$d_{ek} = \frac{4 \cdot h_p \cdot (t_p - b_p)}{2 \cdot h_p + t_p - b_p};$$

$$\text{Re} = \frac{V \cdot d_{ek}}{18.9 \cdot 10^{-6}} - \text{число Рейнольдса.}$$

**10. Провідність від торцевих поверхонь ротора до зовнішнього повітря**

$$\Lambda_{k,23} = \alpha_{rtp} \cdot \pi \cdot (D_z + 2 \cdot \Delta_p), \quad (29)$$

де  $\alpha_{rtp} = 20 + 2.6(0.5 \cdot V)^{0.9}$  – коефіцієнт тепловіддачі торцевих поверхонь ротора;  $V$  – ефективна лінійна швидкість повітря охолодження.

Теплова провідність від міді до сталі статора

$$\Lambda_{m.s} = \Lambda_{m.z} + \Lambda_{m.a}. \quad (30)$$

Теплова провідність від внутрішнього повітря до корпусу ротора

$$\Lambda_{pkr} = \Lambda_{\delta.p.} + \Lambda_{\delta.k}. \quad (31)$$

**Висновки.** Для розрахунку стаціонарного теплового режиму ЕМП ВД з явнополюсним статором і пасивним ротором на основі наведеної методики і формул складена комп'ютерна програма, яка є складовою частиною підсистеми проектування таких двигунів і надає можливість визначати середні значення температур його основних складових частин.

1. Ткачук В. І., Омар Рауті Аль Зубі. Методика теплового розрахунку вентильних реактивних двигунів з явно полюсними полюсами // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – Луганськ, 2003. – № 6 (64). – С. 15–23. 2. Филиппов И.Ф. Теплообмен в электрических машинах. Учеб. пособие для вузов. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 256 с. 3. Алгоритм и программа автоматизированного расчета асинхронных короткозамкнутых двигателей со всыпной обмоткой статора // Сост. Л.И. Глухивский, В.В. Попичко. – Львов: ЛПИ, 1989. – 40 с.