

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ТЕПЛОВЫХ И ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО КОНСТРУКТИВНОЙ СХЕМЕ ДАС

Парфенович О.Н., к. т. н., проф., Третьяков А.С.
ГУВПО "Белорусско-Российский университет"
Республика Беларусь, 212008, Могилёв, пр-т Мира, 43, ГУВПО "БРУ", кафедра "Электропривод и АПУ",
тел. 31-14-44

Викладено основи теорії теплових і вентиляційних процесів електродвигунів по конструктивній схемі ДАС, розглядаються теплові схеми заміщення і розрахунки теплових процесів на їх основі, розглядаються узагальнені схеми заміщення електродвигунів для розрахунку вентиляційних характеристик. Також представлені дослідні дані вентиляційних і теплових характеристик.

Излагаются основы теории тепловых и вентиляционных процессов электродвигателей по конструктивной схеме ДАС, рассматриваются тепловые схемы замещения и расчёты тепловых процессов на их основе, рассматриваются обобщённые схемы замещения электродвигателей для расчёта вентиляционных характеристик. Также представлены опытные данные вентиляционных и тепловых характеристик.

Электродвигатели по конструктивной схеме ДАС специально предназначены для работы с регулятором напряжения в цепи статора. Особенности конструкции данного типа электродвигателя приведены на рис. 1.

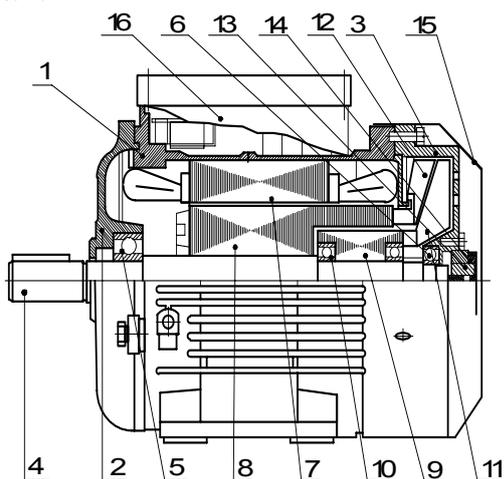


Рис. 1. Особенности конструкции специального асинхронного электродвигателя ДАС

На рисунке 1 приняты следующие обозначения: 1 – станина электродвигателя; 2, 3 – подшипниковые щиты; 4 – вал ротора; 5, 6 – подшипники силового ротора; 7 – магнитопровод статора; 8 – удлиненный магнитопровод силового ротора; 9 – малый ротор; 10 – подшипники малого ротора; 11 – вентилятор, закрепленный на малом роторе; 12 – лопасти теплорассеивателя силового ротора; 13 – ротор тахогенератора; 14 – статор тахогенератора; 15 – кожух; 16 – клеммная коробка со встроенным электронным блоком регулирования.

Во время работы электродвигателя обеспечивается интенсивный отвод тепловых потерь от силового ротора 8, имеющего стержневую обмотку, в торцевую часть в которой расположены лопасти теплорассеивателя ротора 12. Лопасти теплорассеивателя выполне-

ны таким образом, что бы обеспечивался максимальный отвод тепла от силового ротора. Принудительная вентиляция при работе электродвигателя на естественной и регулировочных характеристиках осуществляется при помощи автономного вентилятора, закрепленного на малом роторе, который вращается с постоянной частотой, независимой от частоты вращения силового ротора [1]. Вращающий момент малого ротора 9 обеспечивается благодаря потокоцеплению ротора 9 и выступающей части силового ротора 8.

Среди известных, в настоящее время, методов теплового расчета электродвигателей [2, 3, 4, 5] наиболее приемлемым (по причине оригинальности рассматриваемой конструкции электродвигателя) является метод экспериментального моделирования. В этом случае на моделях или макетах экспериментально определяются перепады температур на отдельных узлах электродвигателя, которые проявляются на пути движения тепловых потоков от источников теплоты к окружающей среде затем, чтобы экспериментальные данные можно было использовать; для широкого класса однотипных поверхностей, их обычно выражают с помощью безразмерных чисел. Данный метод, однако, весьма трудоемкий и целесообразен в том случае, если модель электродвигателя конструктивно и по электрическим параметрам уже отработана и оптимизирована. Именно такая задача перед нами пока только стоит.

Нельзя, в нашем случае применить для теплового расчета электродвигателя и достаточно простой метод эквивалентных греющих потерь, поскольку коэффициенты, применяемые при расчетах по этому методу, получены на типовых отработанных конструкциях электродвигателей.

Сложным, но более логичным, применительно к новой оригинальной конструкции электродвигателя ДАС, является метод расчета с помощью тепловых схем замещения. Тепловая схема замещения составляется на основе анализа тепловых потоков в отдель-

ных узлах электродвигателя. Относительно полная картина тепловых потоков электродвигателя по конструктивной схеме ДАС показана на рис. 2.

На указанном рисунке в окружностях условно обозначены температуры узлов и участков электродвигателя - соответствующих "однородных тел", где выделяются тепловые потери работающего электродвигателя. В сдвоенных окружностях обозначены температуры "однородных тел" - конструктивных элементов электродвигателя, через которые проходят тепловые потоки; в частности:

θ_M^1 - температура пазовой части статорной обмотки, где выделяются потери ΔP_M^1 ; θ_z^1 - температура в зубцах статора, где выделяются потери ΔP_z^1 ; θ_c^1 - температура в ярме статора, где выделяются потери ΔP_c^1 ; θ_n^1, θ_n^2 - температуры в лобовых частях обмотки статора, где выделяются потери $\Delta P_n^1, \Delta P_n^2$; θ_a^1 - температура в пазовой части токопроводящих стержней ротора, где выделяются потери ΔP_a^1 ; θ_z^2 - температура в зубцах силового ротора, где выделяются потери ΔP_z^2 ; θ_c^2 - температура в железе силового ротора, где выделяются потери ΔP_c^2 ; θ_a^3 - температура в пазовой части токопроводящих стержней ротора вентилятора, где выделяются потери ΔP_a^3 ; θ_c^3 - температура в железе ротора вентилятора, где выделяются потери ΔP_c^3 ; $\theta_n^1, \theta_n^2, \theta_n^3, \theta_n^4$ - температуры подшипников, где выделяются механические потери $\Delta P_n^1, \Delta P_n^2, \Delta P_n^3, \Delta P_n^4$.

Потери от трения лопастей роторов о воздух следует учесть в потерях в стержнях соответствующих роторов.

Тепловые потоки распространяются в электродвигателе в следующих направлениях. Тепловой поток пазовой части статорной обмотки передается лобовым частям с тепловой проводимостью $\lambda_{лм}$; зубцам и в ярмо статора - с тепловой проводимостью λ_{zm} и λ_{cm} , от зубцов в ярмо статора - λ_{zc}^1 . Тепловой поток с лобовых частей обмотки статора передается внутреннему воздуху с тепловой проводимостью $\lambda_{л2}$ и $\lambda_{л3}$. Тепловой поток от пазовой части токопроводящих стержней силового ротора передается на лопасти вентилятора-радиатора (проводимость λ_{aa}^1) в зубцовую зону ротора (проводимость λ_{za}), в железо ротора (проводимость λ_{ac}^1), от зубцов в железо ротора (проводимость λ_{zc}^2). Тепловые потоки от ротора через тепловую проводимость λ_{zz} передаются в ярмо

статора и дальше через тепловую проводимость λ_{ck} в станину электродвигателя. Внутренний воздух в левой части электродвигателя с температурой θ_2 , принимая также через проводимость λ_{n2} тепло от механических потерь ΔP_n^1 через проводимость $\lambda_{и2}$ передает тепловой поток подшипниковому щиту, через проводимость λ_{2k} - станине, подшипниковый щит через проводимость $\lambda_{оц}$ передает тепло в охлаждающую среду - с температурой θ_0 . Станина через проводимость $\lambda_{к1}$ передает тепло нагретому воздуху с температурой θ_1 , и дальше через проводимость λ_{o1} тепловой поток рассеивается в окружающей среде с температурой θ_0 .

Внутренний воздух в правой части электродвигателя с температурой θ_3 через проводимость $\lambda_{кз}$ передает тепло в станину, через проводимость $\lambda_{и3}$ - в кольцевую перегородку, далее через проводимость $\lambda_{и4}$ в воздушную зону вентиляторного охлаждения с температурой θ_4 , далее нагретый воздух через проводимости λ_{14} и λ_{o1} охлаждается окружающей средой θ_0 .

Воздушная зона вентиляторно-радиаторного охлаждения имеет достаточно высокую температуру θ_4 от тепловых потоков через проводимость λ_{aa}^1 и зависимость от частоты вращения ротора проводимость λ_{a4} , которые вытягивают потери скольжения силового ротора в зону интенсивного вентиляторно-радиаторного охлаждения.

Часть тепла воздушной зоны (θ_4) через проводимость $\lambda_{и4}^1$ переходит к правому подшипниковому щиту, который также принимает на себе через проводимость $\lambda_{ип}$ тепло от механических потерь ΔP_n^2 трения в подшипнике. Тепловые потоки от потерь в малом роторе вентилятора через проводимости $\lambda_{nc}, \lambda_c^2, \lambda_{aa}^2, \lambda_{a4}^1$ выделяются в воздушной зоне вентиляторно-радиаторного охлаждения (θ_4).

В воздушной зоне вентиляторно-радиаторного охлаждения устанавливается температура θ_4 за счет подачи вентилятором охлаждающего воздуха с температурой θ_0 через проводимость λ_{o4} и передачи вышеобозначенными проводимостями энергии потерь от различных частей электродвигателя.

На основании приведенной на рис. 2 тепловой картины электродвигателя может быть составлена тепловая схема замещения. Для снижения порядка системы уравнений электродвигатель ДАС можно представить состоящим из 8 "однородных тел": статор с обмоткой (температура θ_c), ротор силовой со стержне-

вой обмоткой и вентилятором-радиатором (θ_p), ротор вентилятора со стержневой обмоткой и лопастями вентилятора (θ_r), воздушная зона левой лобовой части (θ_2), воздушная зона правой лобовой части (θ_3); воздушная зона вентиляторно-радиаторного охлаждения (θ_4), станина (θ_k), подшипниковый щит левый ($\theta_{щ}$). Упрощенная тепловая схема замещения электродвигателя представлена на рис. 3.

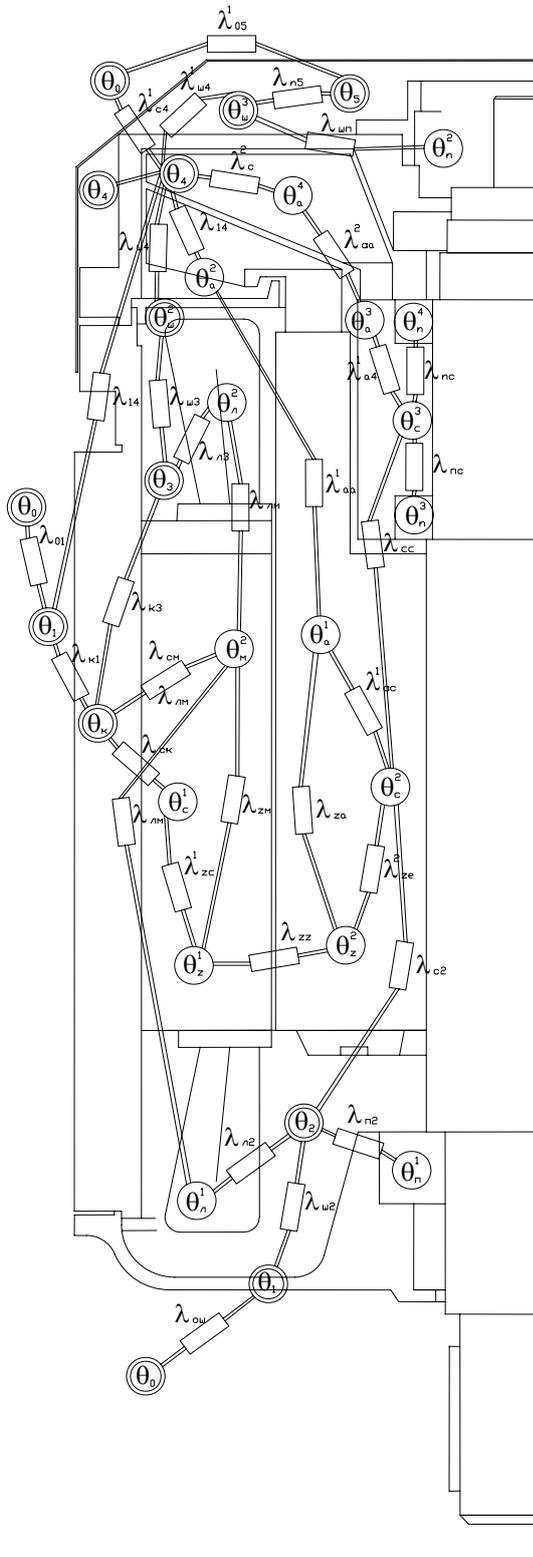


Рис. 2. Тепловая картина электродвигателя ДАС

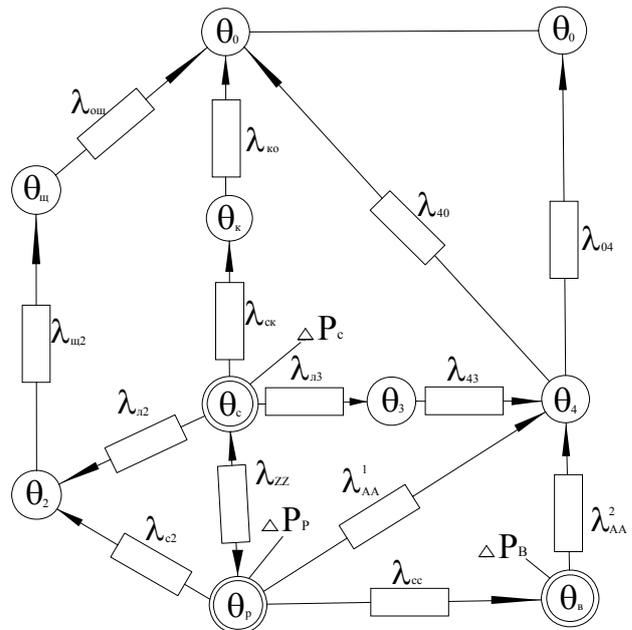


Рис. 3. Упрощенная тепловая схема замещения электродвигателя ДАС

Данная тепловая схема описывается системой уравнений теплообмена:

$$\begin{aligned}
 \Delta P_c &= \theta_c \cdot (\lambda_{r2} + \lambda_{r3} + \lambda_{zz} + \lambda_{ck}) - \theta_2 \cdot \lambda_{r2} - \\
 &\quad - \theta_k \cdot \lambda_{ck} - \theta_p \cdot \lambda_{zz} - \theta_3 \cdot \lambda_{r3}; \\
 \Delta P_p &= \theta_p \cdot (\lambda_{c2} + \lambda_{cc} + \lambda_{zz} + \lambda_{aa}^1) - \theta_2 \cdot \lambda_{c2} - \\
 &\quad - \theta_4 \cdot \lambda_{aa}^1 - \theta_c \cdot \lambda_{zz} - \theta_b \cdot \lambda_{cc}; \\
 \Delta P_b &= \theta_b \cdot (\lambda_{cc} + \lambda_{aa}^2) - \theta_4 \cdot \lambda_{aa}^2 - \theta_p \cdot \lambda_{cc}; \\
 0 &= \theta_4 \cdot (\lambda_{aa}^2 + \lambda_{aa}^1 + \lambda_{40} + \lambda_{43}) - \\
 &\quad - \theta_b \cdot \lambda_{aa}^2 - \theta_p \cdot \lambda_{aa}^1 - \theta_3 \cdot \lambda_{43}; \\
 0 &= \theta_{щ} \cdot (\lambda_{щ1} + \lambda_{щ2}) - \theta_2 \cdot \lambda_{щ2}; \\
 0 &= \theta_k \cdot (\lambda_{ko} + \lambda_{ck}) - \theta_c \cdot \lambda_{ck}; \\
 0 &= \theta_3 \cdot (\lambda_{43} + \lambda_{r3}) - \theta_4 \cdot \lambda_{43} - \theta_c \cdot \lambda_{r3}; \\
 0 &= \theta_2 \cdot (\lambda_{r2} + \lambda_{c2} + \lambda_{щ2}) - \theta_c \cdot \lambda_{r2} - \theta_p \cdot \lambda_{c2} - \\
 &\quad - \theta_{щ} \cdot \lambda_{щ2}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

В системе уравнений (1) параметры θ означают превышение температуры над температурой окружающей среды ($\theta_0=0^\circ\text{C}$), параметры ΔP определяют потери в соответствующих "однородных телах":

$$\begin{aligned}
 \Delta P_c &= \Delta P_m^1 + \Delta P_z^1 + \Delta P_c^1 + \Delta P_n^1 + \Delta P_n^2; \\
 \Delta P_p &= \Delta P_a^1 + \Delta P_z^2 + \Delta P_c^2 + \Delta P_n^2; \\
 \Delta P_b &= \Delta P_a^3 + \Delta P_n^4 + \Delta P_c^3 + \Delta P_n^3 + \Delta P_n^2;
 \end{aligned} \tag{2}$$

Поскольку основным контрольным параметром теплового расчета электродвигателя является температура перегрева обмотки статора, то на основании расчетов по уравнениям (1) определяются температурные поля $\theta_2, \theta_k, \theta_p, \theta_3, \theta_c$ в зависимости от тока статора в номинальном режиме и при работе электро-

двигателя на регулировочных характеристиках, затем в соответствии с картиной теплопередачи рис. 2 строится структурная тепловая схема замещения статора электродвигателя (рис. 4) и на основании этой схемы составляется система уравнений теплового баланса в статоре электродвигателя:

$$\begin{aligned} \Delta P_c^1 &= \theta_c^1 \cdot (\lambda_{ck} + \lambda_{zc} + \lambda_{cm}) - \theta_k \cdot \lambda_{ck} - \\ &\quad - \theta_z^1 \cdot \lambda_{zc} - \theta_m^1 \cdot \lambda_{cm}; \\ \Delta P_m^1 &= \theta_m^1 \cdot (\lambda_{cm} + \lambda_{zm} + 2 \cdot \lambda_{lm}) - \theta_z^1 \cdot \lambda_{zm} - \\ &\quad - \theta_c^1 \cdot \lambda_{cm} - \theta_l^2 \cdot \lambda_{lm} - \theta_l^1 \cdot \lambda_{lm}; \\ \Delta P_z^1 &= \theta_z^1 \cdot (\lambda_{zm} + \lambda_{zc} + \lambda_{zz}) - \theta_m^1 \cdot \lambda_{zm} - \\ &\quad - \theta_c^1 \cdot \lambda_{zc} - \theta_p \cdot \lambda_{zz}; \\ \Delta P_l^1 &= \theta_l^1 \cdot (\lambda_{lm} + \lambda_{l2}) - \theta_2 \cdot \lambda_{l2} - \theta_m^1 \cdot \lambda_{lm}; \\ \Delta P_l^2 &= \theta_l^2 \cdot (\lambda_{l3} + \lambda_{lm}) - \theta_3 \cdot \lambda_{l3} - \theta_m^1 \cdot \lambda_{lm}. \end{aligned} \quad (3)$$

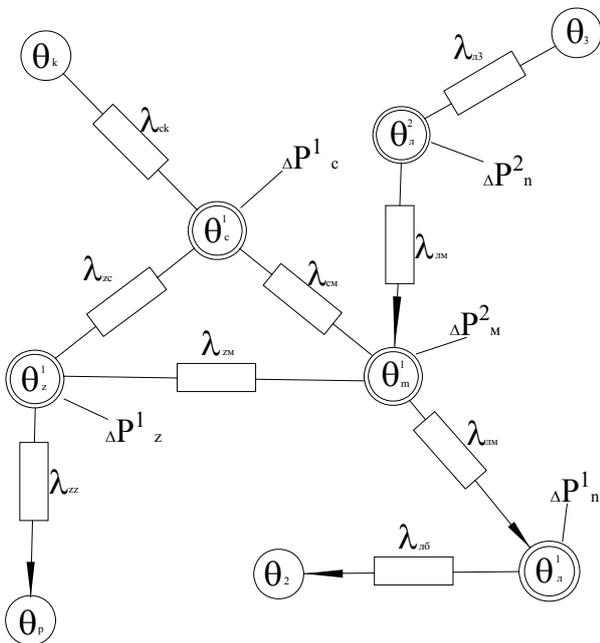


Рис. 4. Тепловая схема замещения статора электродвигателя ДАС

Решение этих уравнений позволяет определить температуру перегрева обмотки статора электродвигателя в функции потерь тока статора, потребляемой и полезной мощности электродвигателя. Естественно, подобные расчеты целесообразно производить на ПЭВМ. В частности, по рассмотренной методике была разработана программа и просчитана тепловая модель электродвигателя по конструктивной схеме ДАС. При этом получены следующие результаты расчета температур перегрева отдельных узлов электродвигателя при работе его в номинальном режиме (ток статора $I_n = 7.1$ А):

- 1) Температура перегрева обмотки статора - $\theta_n = 82^\circ\text{C}$;
- 2) температура перегрева статора - $\theta_c = 69^\circ\text{C}$;
- 3) температура перегрева силового ротора -

$$\theta_p = 71,5^\circ\text{C};$$

- 4) температура перегрева ротора вентилятора - $\theta_n = 71,6^\circ\text{C}$;

- 5) температура перегрева станины - $\theta_k = 54,2^\circ\text{C}$,

- 6) температура перегрева воздушной зоны левой лобовой части - $\theta_2 = 65,5^\circ\text{C}$;

- 7) температура перегрева воздушной зоны правой лобовой части - $\theta_3 = 65^\circ\text{C}$;

- 8) температура перегрева воздушной зоны вентиляторно-радиаторного охлаждения - $\theta_4 = 17,5^\circ\text{C}$.

На основании полученных расчетных значений температур перегрева на рис. 5 построена картина распределения температур перегрева по поперечному сечению электродвигателя ДАС, на рис. 6 построена картина распределения температур перегрева по продольному сечению электродвигателя ДАС.

Достаточная корректность тепловых расчетов электродвигателя ДАС по разработанной методике была подтверждена результатами тепловых исследований электродвигателя в условиях испытательной лаборатории Могилевского завода "Электродвигатель", проведенных в соответствии с ГОСТ 183-74.

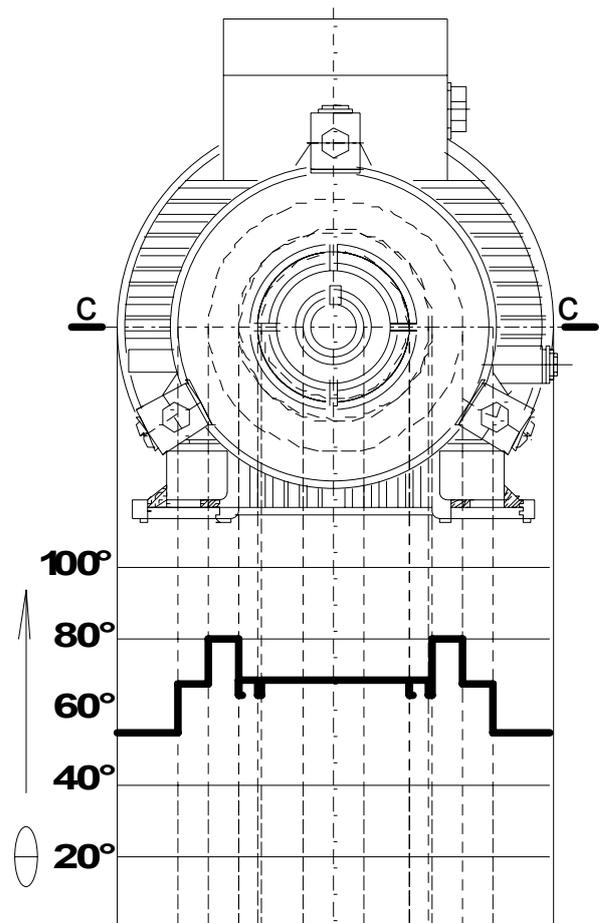


Рис. 5. Картина распределения температур по поперечному сечению электродвигателя ДАС:

— - Распределение температур по сечению с - с

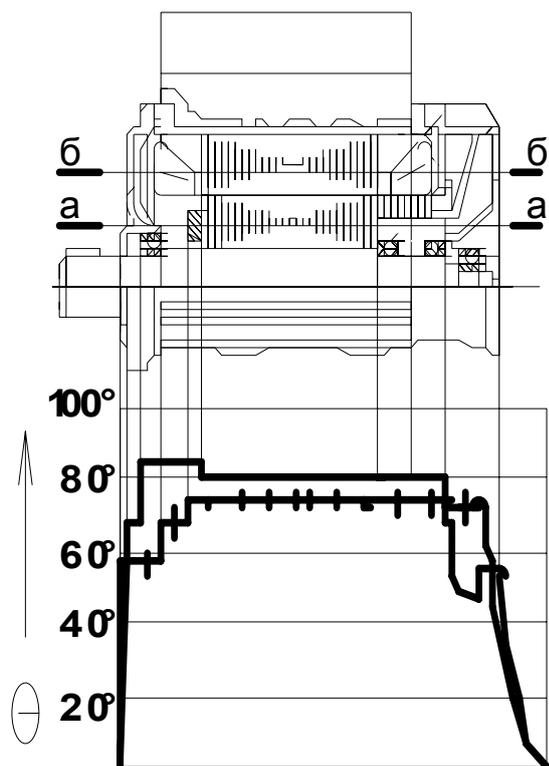


Рис. 6. Картина распределения температур по продольному сечению электродвигателя ДАС:

— - Распределение температур по сечению а – а
 - - - - - Распределение температур по сечению б – б

Результаты испытаний показали, что номинальный режим электродвигателя, определяемый при ПВ-100%, характеризуется следующими параметрами: напряжением - 220/380 В, током - 7.1 А, частотой - 50 Гц, мощностью - 2.5 кВт, моментом на валу - 17.6 Н*м; при этом температура перегрева обмотки статора электродвигателя - $\theta_n = 80^\circ\text{C}$.

Вентиляционную модель рассматриваемого электродвигателя ДАС можно изобразить в виде схемы замещения, содержащей сопротивления воздушному потоку, соединенные между собой отрезками каналов, не имеющих сопротивления.

В соответствии с конструктивной реализацией электродвигателя ДАС логично рассматривать две схемы замещения: одну - при работе электродвигателя в номинальном режиме, когда вращаются с одинаковыми скоростями оба ротора: силовой и вентилятора (рис. 7), другую - при работе электродвигателя с заторможенным силовым ротором, когда вращается только ротор вентилятора (рис. 8). В схемах замещения приведены обозначения: Z_{1B} - сопротивление входа воздуха в кожух через решетку крышки вентилятора; Z_{2B} - сопротивление входа в отверстие подшипникового щита; Z_{3B} - сопротивление выхода воздуха из отверстий щита; Z_{4B} - сопротивление пово-

рота потока при входе в вентилятор силового ротора; Z_{5B} - сопротивление поворота потока при выходе с лопаток вентилятора силового ротора; Z_{6B} - сопротивление поворота потока перед входом в межреберные каналы; Z_{7B} - сопротивление косоугольного входа в межреберные каналы; Z_{8B} - сопротивление выхода потока из межреберных каналов в свободное пространство; Z_{9B} - сопротивление поворота потока при выходе за лопатки вентилятора малого ротора; Z_{10B} - сопротивление сужения канала перед входом в межреберные каналы; Z_{11B} - сопротивление сужения канала перед вентилятором малого ротора.

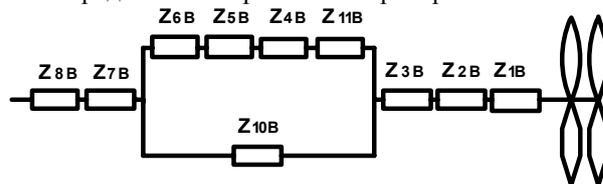


Рис. 7. Вентиляционная схема замещения электродвигателя ДАС в номинальном режиме

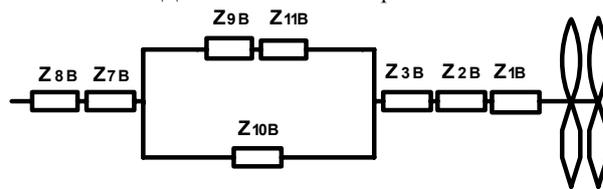


Рис. 8. Вентиляционная схема замещения электродвигателя ДАС при работе электродвигателя с заторможенным силовым ротором

Применяя операции последовательного и параллельного сложения сопротивлений, можно упростить схему замещения вентиляционной модели электродвигателя в номинальном режиме (рис. 9).

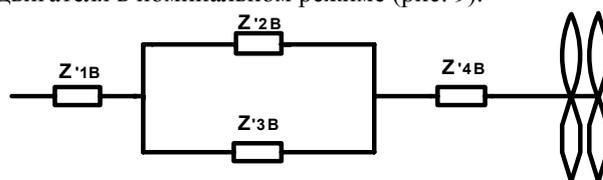


Рис. 9. Обобщенная схема замещения электродвигателя ДАС для расчета вентиляционных характеристик

В обобщенной схеме замещения:

$$Z'_{1B} = Z_{7B} + Z_{8B} \quad (4)$$

$$Z'_{2B} = Z_{11B} + Z_{4B} + Z_{5B} + Z_{6B}, \quad (5)$$

$$Z'_{3B} = Z_{10B}, \quad (6)$$

$$Z'_{4B} = Z_{1B} + Z_{2B} + Z_{3B} \quad (7)$$

Суммарное сопротивление вентиляционной сети электродвигателя при работе в нормальном режиме:

$$Z'_{HB} = Z'_{1B} + Z'_{2B} + Z'_{4B}, \quad (8)$$

где
$$Z_{ЭВ} = \frac{Z'_{2В} \cdot Z'_{3В}}{(\sqrt{Z'_{2В}} + \sqrt{Z'_{3В}})^2} \quad (9)$$

Далее задача расчета вентиляционной модели электродвигателя сводится к расчету аэродинамических характеристик вентиляторов и характеристики воздухопроводящей сети. Окружная скорость на наружном диаметре вентиляторов:

$$u_2 = \frac{\pi \cdot D_2 \cdot n}{60}, \quad (10)$$

где D_2 - наружный диаметр лопаток вентиляторов; n - частота вращения вентиляторов.

Расход воздуха при заторможенном роторе:

$$\theta_3 = \theta^* \cdot \pi \cdot D_2 \cdot b'_2 \cdot u_2, \quad (11)$$

где θ^* - относительный расход воздуха; b'_2 - ширина лопатки вентилятора силового ротора.

Расход воздуха при номинальном режиме работы:

$$\theta_n = \theta^* \cdot (\pi \cdot D_2 \cdot b'_2 \cdot u_2 + \pi \cdot D_2 \cdot b_2 \cdot u_2), \quad (12)$$

где b_2 - ширина лопатки вентилятора малого ротора.

Относительные радиусы вентиляторов силового и малого роторов, соответственно:

$$r_c^* = \frac{D_2 - 2 \cdot L_c}{D_2}, \quad r_m^* = \frac{D_2 - 2 \cdot L_m}{D_2}, \quad (13)$$

где L_c, L_m - длина лопаток вентиляторов, соответственно силового и малого роторов.

Давление воздуха, создаваемое вентиляторами, определяется внешней характеристикой вентиляционной системы в относительных единицах:

- для номинального режима:

$$p_n^* = 1 - (r_c^{*2} - r_m^{*2}) \cdot (0.5 - \theta^{*2}) + k, \quad (14)$$

- для режима с заторможенным ротором:

$$p_3^* = 0.5 \cdot (1 - r_m^{*2}) - r_m^{*2} \cdot \theta^{*2} + 0.5 \cdot k, \quad (15)$$

где k - коэффициент восстановления статического момента, можно принять равным 0.4.

Реальное давление воздуха, создаваемое вентиляторами для номинального режима и режима с заторможенным ротором, соответственно:

$$p_n = p_n^* \cdot \rho \cdot u_2^2, \quad p_3 = p_3^* \cdot \rho \cdot u_2^2, \quad (16)$$

где ρ - плотность охлаждающей среды.

Потери давления в сети при работе в номинальном режиме:

$$\Delta p_n = Z_{нев} \cdot \theta_n^2, \quad (17)$$

Потери давления в сети при работе с заторможенным ротором:

$$\Delta p_3 = Z'_{3в} \cdot \theta_3^2 \quad (18)$$

Используя приведенные выше формулы, можно рассчитать и построить внешние аэродинамические характеристики вентиляторов электродвигателя при номинальном режиме работы и при работе с заторможенным ротором:

$$P_n, \Delta P_n = f(\theta_n); \quad P_3, \Delta P_3 = f(\theta_3).$$

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Парфенович О.Н., Соколов И.В. Энергосберегающий асинхронный с короткозамкнутым ротором электродвигатель в электромехатронном исполнении – Вестник НТУ ХПИ, - Харьков, 42' 2004, - с.97 – 101.
- [2] Асинхронные электродвигатели общего назначения/ Под ред. В.М. Петрова, А.Э. Кравчика. – М.: Энергия, 1980. - 346 с.: ил.
- [3] Гольдберг О.Д. Проектирование электрических машин / О.Д. Гольдберг, Я.С. Гурин, И.С. Свириденко. – М.: Высш. Шк., 1984. – 390 с.: ил.
- [4] Филипов И.Ф. Основы теплообмена в электрических машинах. – Л.: Энергия, 1974. - 0312 с.: ил.
- [5] Филипов И.Ф. Теплообмен в электрических машинах. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. -260 с.: ил.

Поступила 28.08.2005