

УДК621.314

О. Н. Парфенович, канд. техн. наук, доц., А. С. Третьяков

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПО КОНСТРУКТИВНОЙ СХЕМЕ ДАС С ДВУХРОТОРНОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКОЙ

В статье излагаются краткие сведения о конструкции асинхронного электродвигателя с двухроторной электромеханикой, анализируются методы расчёта тепловых режимов. На основе выбранного метода эквивалентных тепловых схем замещения разработаны схема тепловых потоков рассматриваемого электродвигателя, упрощённые структурные тепловые схемы замещения, представлена методика расчёта тепловых процессов. Приводятся расчётные данные температур отдельных узлов рассматриваемого электродвигателя. Приведены экспериментальные данные тепловых испытаний и технических характеристик асинхронных электродвигателей.

Электродвигатели по конструктивной схеме ДАС специально предназначены для работы с регулятором напряжения в цепи статора.

Особенности конструкции рассматриваемого электродвигателя приведены на рис. 1.

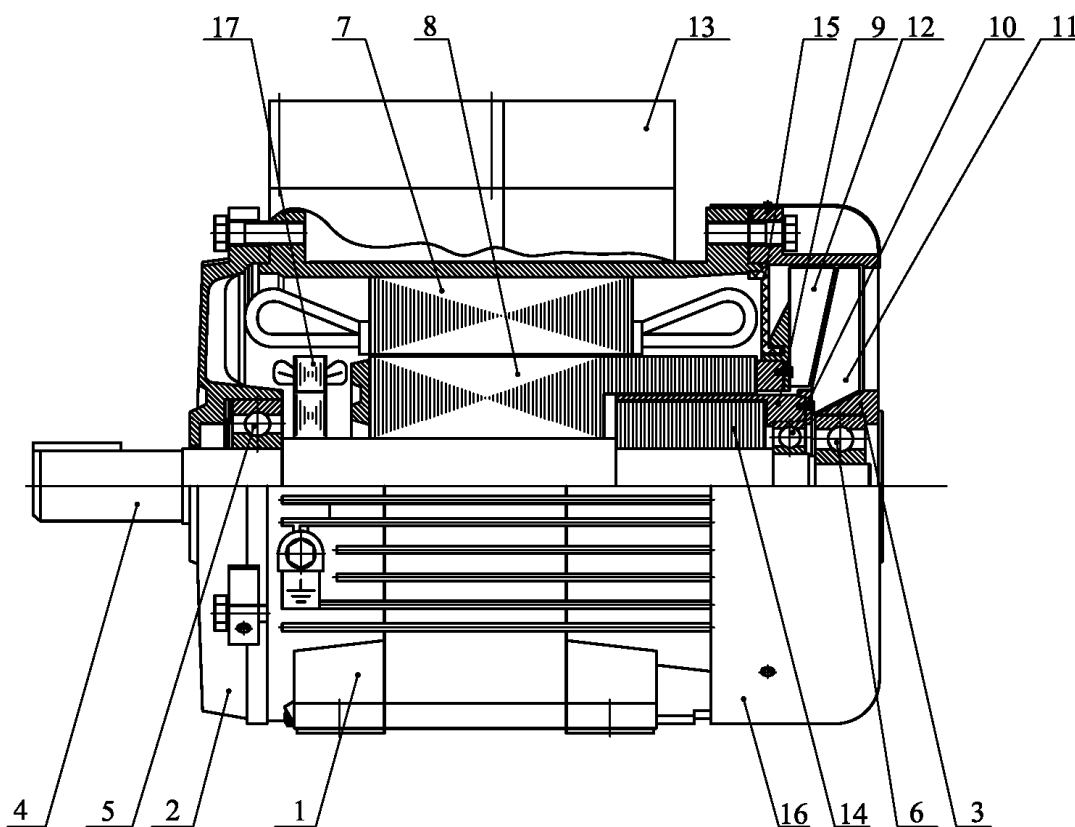


Рис. 1. Особенности конструкции асинхронного электродвигателя по конструктивной схеме ДАС с двухроторной электромеханикой (ДАС – 12): 1 – станина электродвигателя; 2, 3 – подшипниковые щиты; 4 – вал силового ротора; 5, 6 – подшипники силового ротора; 7 – магнитопровод статора с обмоткой; 8 – удлиненный магнитопровод силового ротора со стержневой обмоткой; 9 – малый ротор вентилятора; 10 – подшипник малого ротора вентилятора; 11 – вентилятор, закрепленный на малом роторе; 12 – лопасти теплорассеивателя вентилятора силового ротора; 13 – клеммная коробка со встроенным электронным блоком регулирования; 14 – магнитопровод малого ротора вентилятора; 15 – кольцевая перегородка; 16 – кожух; 17 – датчик скорости

Во время работы электродвигателя обеспечивается интенсивный отвод тепловых потерь от силового ротора 8 через стержневую обмотку к лопастям теплорассеивателя вентилятора 12. Принудительная вентиляция при работе электродвигателя на естественной и регулировочных характеристиках осуществляется также при помощи вентилятора 11, закрепленного на малом роторе 9, который вращается с постоянной частотой, не зависящей от частоты вращения силового ротора. Вращающий момент малого ротора вентилятора 9 обеспечивается благодаря потокосцеплению со стержневой обмоткой выступающей части силового ротора 8.

При работе электродвигателя на регулировочных характеристиках и в пускотормозных режимах имеет место эффект частотного сжатия тока в стержнях выступающей части ротора, что приводит к увеличению $\cos \varphi$, уменьшению пускового тока, увеличению пускового момента электродвигателя и момента, допустимого по условиям нагрева. За счёт улучшения условий теплопроводности и теплоотдачи массогабаритные параметры электродвигателя на 1 кВт полезной мощности используются более эффективно при его работе и на естественной характеристике [1].

Среди известных в настоящее время методов теплового расчета электродвигателей [2–5] наиболее приемлемым (по причине оригинальности рассматриваемой конструкции электродвигателя) является метод экспериментального моделирования. В этом случае на физических моделях или макетах экспериментально определяются перепады температур на отдельных узлах электродвигателя, происходящие на пути движения тепловых потоков от источников теплоты к окружающей среде. Чтобы экспериментальные данные можно было использовать для широкого класса однотипных поверхностей, их обычно выражают с помощью безразмерных чисел. Данный метод весьма трудоемкий и целесообразен в том случае, если модель двигателя кон-

структивно и по электрическим параметрам уже отработана и оптимизирована.

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-12 с двухроторной электромеханикой является метод расчета с помощью тепловых схем замещения. Тепловая схема замещения составляется на основе анализа тепловых потоков в отдельных узлах двигателя. Относительно полная картина тепловых потоков рассматриваемого электродвигателя приведена на рис. 2.

На указанном рисунке в одинарных окружностях условно обозначены температуры узлов и участков электродвигателя – соответствующих «однородных тел», где выделяются тепловые потери работающего электродвигателя, в частности [5]:

– θ_n – температура в пазовой части статорной обмотки, где выделяются потери ΔP_n ;

– 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_l^1, θ_l^2 – температуры в лобовых частях обмотки статора, где выделяются потери $\Delta P_l^1, \Delta P_l^2$;

– θ_a – температура в пазовой части токопроводящих стержней ротора, где выделяются потери ΔP_a ;

– θ_z^2 – температура в зубцах силового ротора, где выделяются потери ΔP_z^2 ;

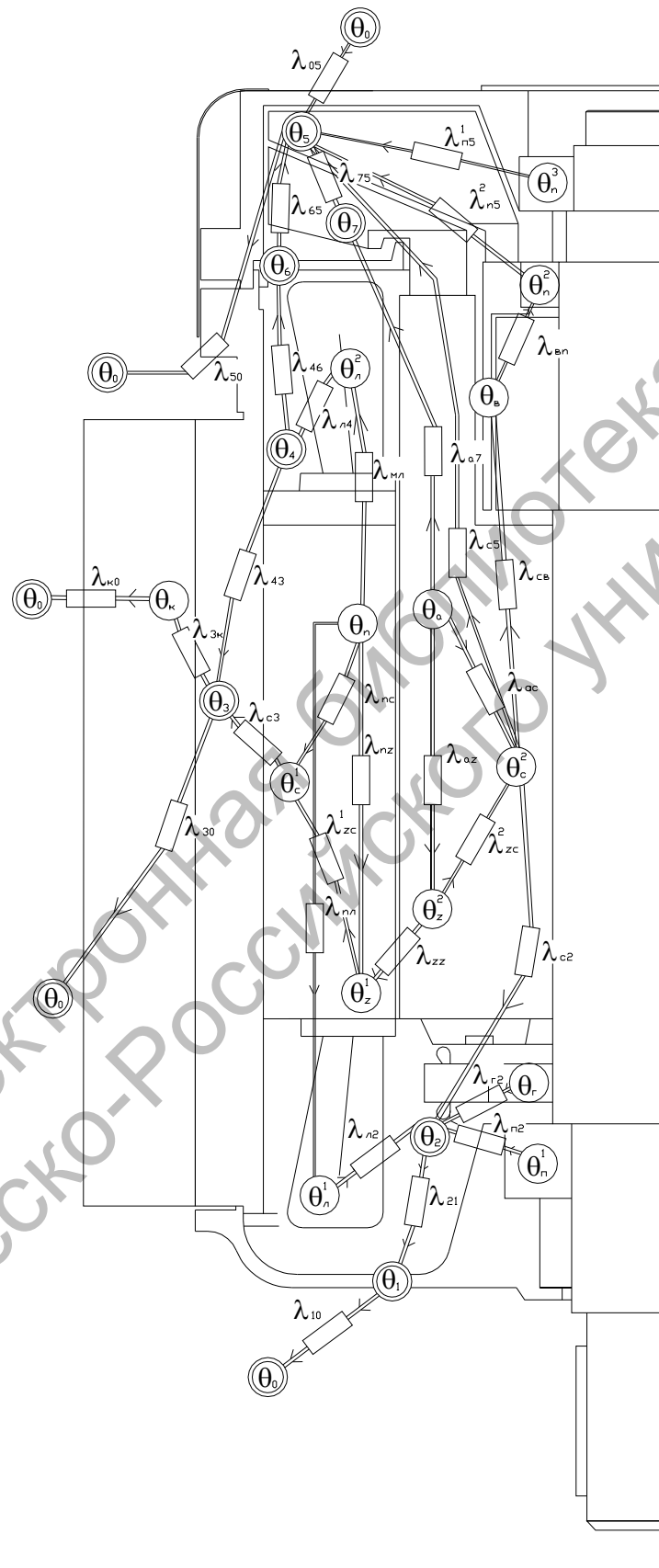


Рис. 2. Картина тепловых потоков электродвигателя ДАС-12

- θ_c^2 – температура в железе силового ротора, где выделяются потери ΔP_c^2 ;
- θ_g – температура в стакане ротора вентилятора, где выделяются потери ΔP_g ;
- θ_z – температура тахогенератора, где выделяются потери ΔP_z ;
- θ_k – температура внутри клеммной коробки, где выделяются потери ΔP_k ;
- $\theta_n^1, \theta_n^2, \theta_n^3$ – температуры подшипников, где выделяются потери $\Delta P_n^1, \Delta P_n^2, \Delta P_n^3$.

В двойных окружностях обозначены температуры «однородных тел» – конструктивных элементов электродвигателя, через которые проходят тепловые потоки, в частности [5]:

- θ_0 – температура окружающей среды;
- θ_1 – температура подшипникового щита со стороны рабочего конца вала;
- θ_2 – температура воздуха в закрытой зоне внутри электродвигателя со стороны рабочего конца вала;
- θ_3 – температура станины;
- θ_4 – температура воздуха в закрытой зоне внутри двигателя со стороны вентиляторного узла;
- θ_5 – температура воздуха в зоне вентиляторного узла;
- θ_6 – температура в кольцевой перегородке;
- θ_7 – температура полостей вентилятора силового ротора.

Тепловые потоки распространяются в электродвигателе в следующих направлениях. Тепловой поток пазовой части статорной обмотки передается лобовым частям с тепловыми проводимостями λ_{nl} , зубцам и в ярмо статора – с тепловыми проводимостями λ_{nz} и λ_{nc} , от зубцов в ярмо статора – λ_{zc}^1 . Тепловой поток с лобовых частей обмотки статора передается внутреннему воздуху с теплыми

проводимостями λ_{l2} и λ_{l4} . Тепловой поток от пазовой части токопроводящих стержней силового ротора передается на лопасти вентилятора-радиатора (тепловая проводимость λ_{a7}), в зубцовую зону ротора (тепловая проводимость λ_{az}), в железо ротора (тепловая проводимость λ_{ac}), от зубцов в железо ротора (тепловая проводимость λ_{zc}^2). Тепловые потоки от ротора через тепловые проводимости λ_{zz} и λ_{zc}^1 передаются в ярмо статора и дальше через тепловую проводимость λ_{c3} в станину электродвигателя. Внутренний воздух в левой части электродвигателя с температурой θ_2 , принимая также через тепловую проводимость λ_{n2} тепло от механических потерь ΔP_n и через тепловую проводимость λ_{c2} тепло от тахогенератора, через тепловую проводимость λ_{21} передает тепловой поток подшипниковому щиту. Подшипниковый щит через тепловую проводимость λ_{10} передает тепло в охлаждающую среду с температурой θ_0 . Станина с температурой θ_3 через тепловую проводимость λ_{30} передает тепло в окружающую среду, а через тепловую проводимость θ_{3k} – в клеммную коробку с температурой θ_k , отсюда через тепловую проводимость λ_{ko} тепловой поток рассеивается в окружающей среде с температурой θ_0 .

Внутренний воздух в правой части электродвигателя с температурой θ_4 через тепловую проводимость λ_{43} передает тепло в станину, через тепловую проводимость λ_{46} – в кольцевую перегородку с температурой θ_6 , далее через тепловую проводимость λ_{65} – в воздушную зону вентиляторного охлажде-

ния с температурой θ_5 , где нагретый воздух охлаждается воздушным потоком с температурой θ_0 окружающей среды.

Воздушная зона интенсивного вентиляторно-радиаторного охлаждения имеет температуру θ_5 , которая формируется путём передачи тепла от соответствующих «однородных тел» электродвигателя через тепловые проводимости: λ_{65} – от кольцевой перегородки; λ_{75} – от полостей вентилятора-радиатора силового ротора; λ_{c5} – от магнитопровода силового ротора; $\lambda_{n5}^1, \lambda_{n5}^2$ – от силового подшипника – и подачей в указанную зону охлаждающего воздуха с температурой θ_0 через тепловую проводимость λ_{05} . Тепло от токопроводящих стержней ротора передаётся через тепловую проводимость λ_{a7} в полости вентилятора силового ротора.

На основании приведённой на рис. 2 картины тепловых потоков электродвигателя ДАС-12 может быть составлена тепловая схема замещения, состоящая из 22 «однородных тел», связанных между собой 32 тепловыми проводимостями. Такая схема замещения описывается 22

уравнениями теплового баланса. Для снижения порядка системы уравнений при незначительном снижении точности расчётов рассматриваемый электродвигатель можно представить состоящим из 9 «однородных тел»: статора с обмоткой (температура θ_c), ротора силового со стержневой обмоткой и вентилятором – теплоотсеивателем (θ_p), ротора вспомогательного с лопастями вентилятора (θ_e), воздушной зоны левой лобовой части (θ_2), станины (θ_3), воздушной зоны правой лобовой части (θ_4), воздушной зоны вентиляторно-радиаторного охлаждения (θ_5), подшипникового щита левого (θ_1), клеммной коробки с встроенным тиристорным регулятором напряжения (θ_k). Упрощенная тепловая схема замещения рассматриваемого электродвигателя представлена на рис. 3. Данная тепловая схема описывается следующей системой уравнений теплообмена:

$$\begin{aligned}
 \Delta P_c &= \theta_c \cdot (\lambda_{r2} + \lambda_{r4} + \lambda_{zz} + \lambda_{c3}) - \theta_2 \cdot \lambda_{r2} - \theta_3 \cdot \lambda_{c3} - \theta_p \cdot \lambda_{zz} - \theta_4 \cdot \lambda_{r4}; \\
 \Delta P_p &= \theta_p \cdot (\lambda_{c2} + \lambda_{p2} + \lambda_{zz} + \lambda_{c6}) - \theta_2 \cdot \lambda_{c2} - \theta_5 \cdot \lambda_{p2} - \theta_c \cdot \lambda_{zz} - \theta_e \cdot \lambda_{c6}; \\
 \Delta P_e &= \theta_e \cdot (\lambda_{c6} + \lambda_{p3}) - \theta_p \cdot \lambda_{c6} - \theta_5 \cdot \lambda_{p3}; \\
 \Delta P_k &= \theta_k \cdot (\lambda_{3k} + \lambda_{k0}) - \theta_3 \cdot \lambda_{3k} - \theta_0 \cdot \lambda_{k0}; \\
 0 &= \theta_1 \cdot (\lambda_{10} + \lambda_{21}) - \theta_0 \cdot \lambda_{10} - \theta_2 \cdot \lambda_{21}; \\
 0 &= \theta_2 \cdot (\lambda_{21} + \lambda_{r2} + \lambda_{c2}) - \theta_c \cdot \lambda_{r2} - \theta_p \cdot \lambda_{c2} - \theta_1 \cdot \lambda_{21}; \\
 0 &= \theta_3 \cdot (\lambda_{30} + \lambda_{3k} + \lambda_{c3}) - \theta_0 \cdot \lambda_{30} - \theta_k \cdot \lambda_{3k} - \theta_c \cdot \lambda_{c3}; \\
 0 &= \theta_4 \cdot (\lambda_{p1} + \lambda_{r4}) - \theta_c \cdot \lambda_{r4} - \theta_5 \cdot \lambda_{p1}; \\
 0 &= \theta_5 \cdot (\lambda_{50} + \lambda_{05} + \lambda_{p1} + \lambda_{p-} + \lambda_{p3}) - \theta_0 \cdot \lambda_{50} - \theta_0 \cdot \lambda_{05} - \theta_4 \cdot \lambda_{p1} - \theta_p \cdot \lambda_{p2} - \theta_e \cdot \lambda_{p3}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Вместо контура теплопередачи $\lambda_{56} - \theta_6 - \lambda_{65}$ введена тепловая проводимость λ_{p1} .

Вместо контура теплопередачи $\lambda_{a7} - \theta_7 - \lambda_{75}$ и параллельно включенной этому контуру проводимости λ_{c5} введе-

на тепловая проводимость λ_{p2} . Вместо контура теплопередачи $\lambda_{en} - \theta_n^2 - \lambda_{n5}^2$ введена тепловая проводимость λ_{p3} .

В системе уравнений (1) параметры θ означают превышение температуры над температурой окружающей среды ($\theta_0 = 0$ °C), параметры ΔP определяют потери в соответствующих «однородных телах», в частности:

– потери в статоре

$$\Delta P_c = \Delta P_m^1 + \Delta P_z^1 + \Delta P_c^1 + \Delta P_l^1 + \Delta P_n^2; \quad (2)$$

– потери в силовом роторе

$$\Delta P_p = \Delta P_a^1 + \Delta P_z^2 + \Delta P_c^2; \quad (3)$$

– потери механической части в роторе вентилятора

$$\Delta P_g = \Delta P_n^3 + \Delta P_c^3 + \Delta P_n^2; \quad (4)$$

– потери ΔP_k – потери в клеммной коробке от тиристорного регулятора напряжения.

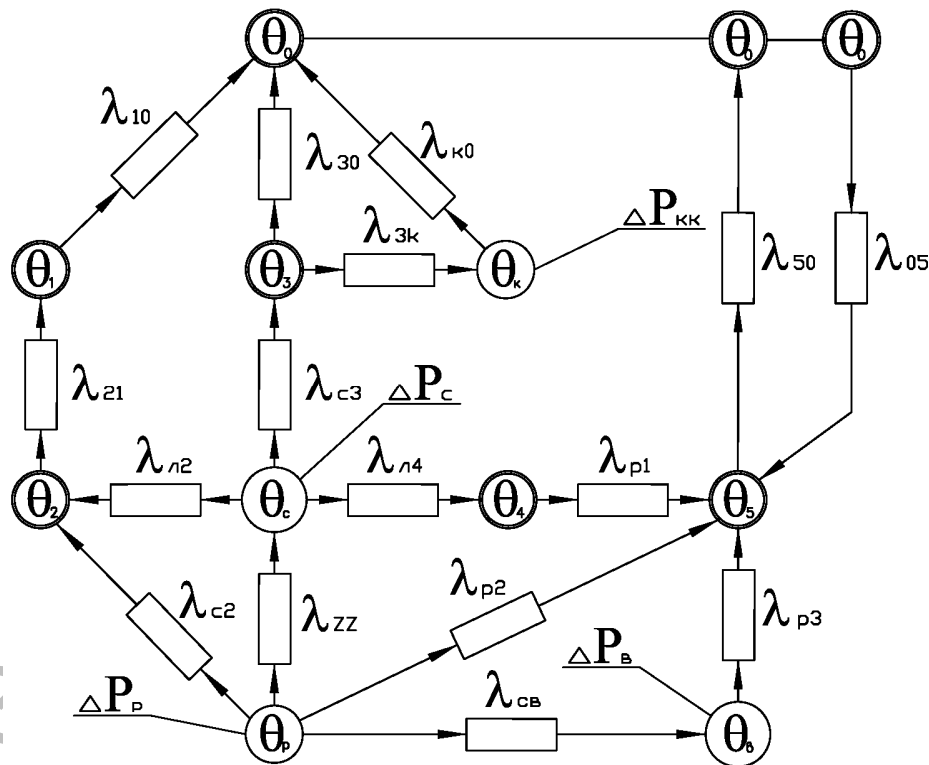


Рис. 3. Упрощённая структурная тепловая схема замещения электродвигателя ДАС-12

Поскольку основным контрольным параметром теплового расчета электродвигателя является температура перегрева обмотки статора, то на основании расчетов по уравнениям (1)...(4) определяются температурные поля $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_p$ в зависимости от тока статора: в номинальном режиме и при работе электродвигателя на

регулирующих характеристиках. Затем, в соответствии с картиной тепловых потоков (рис. 2), строится структурная тепловая схема замещения статора электродвигателя (рис. 4).

На рис. 4 составляется система уравнений теплового баланса в статоре электродвигателя:

$$\begin{aligned}
 \Delta P_c^1 &= \theta_c^1 \cdot (\lambda_{c3} + \lambda_{zc} + \lambda_{nc}) - \\
 &- \theta_3 \cdot \lambda_{c3} - \theta_n \cdot \lambda_{nc} - \theta_z^1 \cdot \lambda_{zc}; \\
 \Delta P_m^1 &= \theta_n^1 \cdot (2 \cdot \lambda_{ml} + \lambda_{nc} + \lambda_{nz}) - \\
 &- \lambda_{ml} \cdot (\theta_l^1 + \theta_l^2) - \theta_c^1 \cdot \lambda_{nc} - \theta_z^1 \cdot \lambda_{nz}; \\
 \Delta P_z^1 &= \theta_z^1 \cdot (\lambda_{zc}^1 + \lambda_{nz} + \lambda_{zz}) - \\
 &- \theta_c^1 \cdot \lambda_{zc}^1 - \theta_n \cdot \lambda_{nz} - \theta_p \cdot \lambda_{zz}; \\
 \Delta P_l^1 &= \theta_l^1 \cdot (\lambda_{ml} + \lambda_{l2}) - \\
 &- \theta_2 \cdot \lambda_{l2} - \theta_n \cdot \lambda_{ml}; \\
 \Delta P_l^2 &= \theta_l^2 \cdot (\lambda_{l4} + \lambda_{ml}) - \\
 &- \theta_4 \cdot \lambda_{l4} - \theta_n \cdot \lambda_{ml}.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Решение этих уравнений позволяет определить температуру перегрева обмотки статора электродвигателя в функ-

ции от потерь, тока статора, потребляемой и полезной мощности электродвигателя. По рассмотренной методике была рассчитана тепловая модель электродвигателя в модификации ДАС-12 (см. рис. 1), разработанного на базе стандартного АИРС 100S4 для общепромышленного применения. Результаты тепловых и вентиляционных расчётов позволили определить номинальные параметры электродвигателя ДАС-12. Расчётные параметры электродвигателя ДАС-12 в сравнении с базовой моделью АИРС 100S4 и аналогом фирмы «Сименс» приведены в табл. 1.

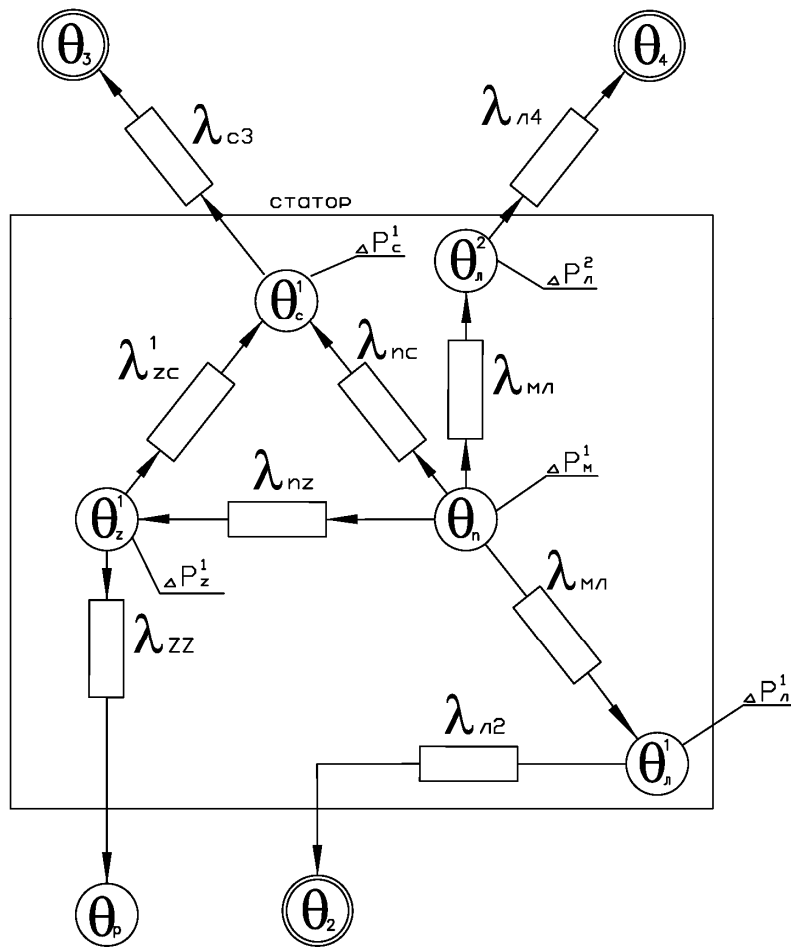


Рис. 4. Структурная тепловая схема замещения статора электродвигателя ДАС-12

Табл. 1. Характеристики асинхронных электродвигателей

Техническая характеристика	ДАС-12	АИРС 100S4	CM300/400 («Сименс», ФРГ) (аналог)
Мощность, Вт	3500	2300	3000
Напряжение, В	380	380	380
Ток, А	7,8	5,76	6,92
Частота, Гц	50	50	50
Скольжение	4,5	4,8	5,7
Частота вращения, об/мин	1433	1428	1415
Момент номинальный, Н·м	23,4	15,4	20,2
Ток холостого хода, А	0,5	4,5	0,3
КПД номинальный, %	82	78	81,5
Cos(f) номинальный	0,83	0,78	0,81
Кратность пускового тока I_p/I_n	3,5	6,2	6
Кратность пускового момента M_p/M_n	2,55	2,8	2,8
Кратность максимального момента M_{max}/M_n	2,6	3,1	3
Кратность минимального момента M_{min}/M_n	2,5	2,27	2,2
Момент, допустимый по условиям нагрева при $p = 0$ Н·м	6,0	0,5	8
Диапазон регулирования напряжением при вентиляторной нагрузке	10–100	1,5	1000 (частотное регулирование)
Допустимая частота пускотормозных циклов при $J = 6 \cdot J_{дв}$	До 400	До 80	До 120
Габариты, мм	366×270×240	360×245×240	360×289×240
Масса, кг	28,8	27,9	28
Цена, у. е.	300	200	1000

На основании полученных расчетных значений температур перегрева электродвигателя ДАС–12 с параметрами, указанными в табл. 1, построена картина распределения температур по продольному (рис. 5) и поперечному (рис. 6) сечениям рассматриваемого электродвигателя.

Достаточная корректность тепловых расчетов электродвигателя ДАС–12 по разработанной методике была подтверждена результатами соответствующих расчетов и тепловых исследований электродвигателя в модификации ДАС–10 [1] в условиях испытательной лаборатории РУП Могилевский завод «Электродвига-

тель», проведенных по ГОСТ 183–74. Результаты испытаний и расчетов показали, что номинальный режим этого электродвигателя определяется при ПВ – 100 %: напряжением 220/380 В, током фазы 7,1 А, частотой 50 Гц, мощностью 2500 Вт, моментом на валу 17,6 Н·м. При этом температура перегрева обмотки статора электродвигателя $\theta_n = 80$ °С, абсолютная (относительно 0 °С) температура $\theta_{но} = 120$ °С. Указанный электродвигатель был разработан и изготовлен в модификации с повышенными пускотормозными и регулировоч-

ными характеристиками при работе от тиристорного регулятора напряжения как макет лифтового электродвигателя.

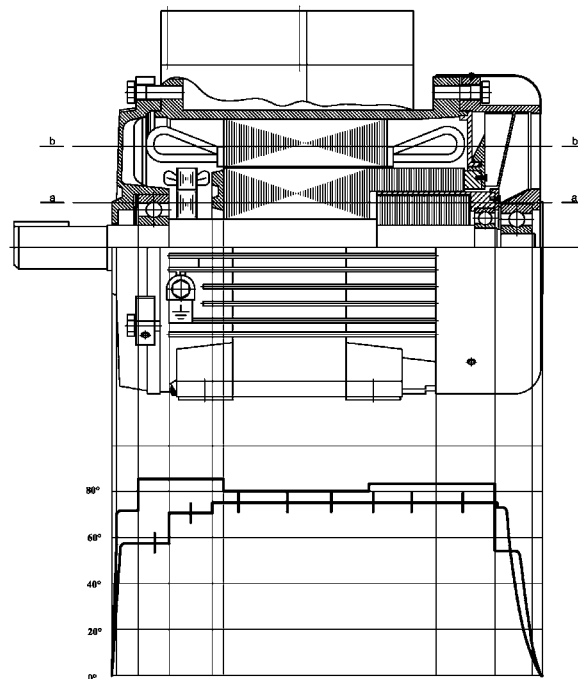


Рис. 5. Картина распределения температур по продольному сечению электродвигателя ДАС-12:

— — распределение температур по сечению а-а; ++++++ — распределение температур по сечению б-б

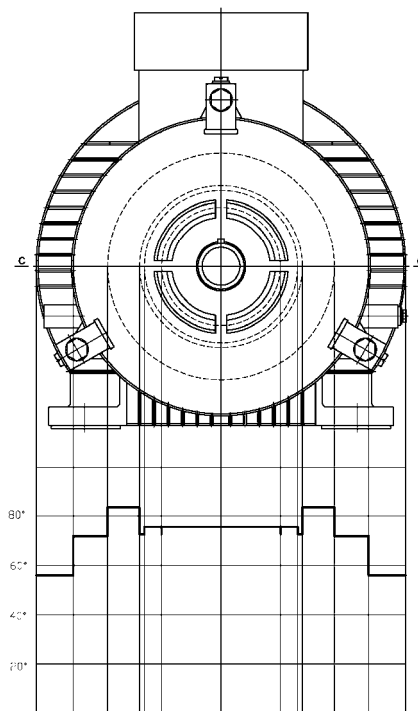


Рис. 6. Картина распределения температур по поперечному сечению электродвигателя ДАС-12:

— — распределение температур по сечению с-с

Выводы

1. На основе предлагаемой конструкции асинхронного с короткозамкнутым ротором электродвигателя с двухроторной электромеханикой могут быть разработаны асинхронные электродвигатели общепромышленного и специального исполнений, имеющие более высокие технико-экономические, в том числе и энергетические, параметры.

2. Выбранный для анализа тепловых режимов асинхронных электродвигателей метод эквивалентных тепловых схем замещения наиболее приемлем для новых моделей асинхронных электродвигателей оригинальной конструкции.

3. Разработанная на базе выбранного метода эквивалентных тепловых схем замещения методика расчёта тепловых процессов в электродвигателе оригинальной конструкции позволяет определить допустимую по условиям нагрева его мощность, далее, обозначив её как номинальную,

рассчитать все остальные номинальные параметры электродвигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Парфенович, О. Н.** Регулируемый асинхронный с короткозамкнутым ротором электродвигатель в электромехатронном исполнении / О. Н. Парфенович, Н. Д. Кебеде // Энергетика. – 1998. – № 3. – С. 42–45.

2 Асинхронные двигатели общего назначения / Е. П. Бойко [и др.]; под ред. В. М. Петрова и А. Э. Кравчика. – М.: Энергия, 1980. – 254 с.

3 **Филлипов, И. Ф.** Основы теплообмена в электрических машинах / И. Ф. Филлипов. – Л.: Энергия, 1974. – 312 с.

4 **Филлипов, И. Ф.** Теплообмен в электрических машинах / И. Ф. Филлипов. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 260 с.

5 Развить теоретические основы создания и эффективного применения управляемого электропривода переменного тока на основе новых конструктивных решений асинхронных электродвигателей и систем фазового управления: отчет о НИР (закл.) / МГТУ; рук. О. Н. Парфенович; исп.: Л. М. Тюшкевич [и др.]. – Могилёв, 2000. – 156 с. – Библиогр.: с. 157–160. – № ГР 1998781.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 09.09.2008

O. N. Parfenovich, A. S. Tretiacov
Elements of the thermal processes theory
of the electric motor under constructive
scheme DAS with a two – rotor electromechanics

Short data on a design of the asynchronous electric motor with two – rotor electromechanics are stated and methods of calculation of thermal modes are analyzed in the article. On the basis of the chosen method of equivalent thermal circuits the scheme of thermal streams of the considered electric motor and simplified structural thermal equivalent circuits have been developed. Calculation methods of thermal processes are presented. Calculation data of temperatures of separate knots of the considered electric motor are cited. Experimental data of thermal tests and technical characteristics of asynchronous electric motors are given in the paper.