

ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ МНОГОСКОРОСТНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Федоров М.М., Анухтин М.В., Марков М.А.

Донецкий государственный технический университет

In work the features of a thermal status of the multihigh-speed asynchronous machine are considered. The equivalent thermal circuit of the multihigh-speed asynchronous engine is offered. The distribution of temperatures in various windings a AM in function of factor of loading is received at work on various frequencies of rotation. The sizes of mutual temperature influence of stator windings against each other are received.

Основными отличительными факторами, определяющими тепловое состояние многоскоростных асинхронных двигателей (АД) является их работа с различными значениями частоты вращения. Для асинхронных двигателей с самовентиляцией это означает различие условий теплоотвода. Кроме этого, в многоскоростных АД имеет место взаимный теплообмен, когда по одной из статорных обмоток протекает ток и она является источником тепловыделения, а нагрев другой обмотки является следствием взаимного теплового влияния.

Характерные особенности и взаимные функциональные зависимости теплового состояния обмоток многоскоростных АД рассмотрим на примере двигателей серии МАП, выпускаемых НПО «Динамо» г.Москва. Многоскоростные АД этой серии в основном используются в электроприводах судовых палубных механизмов. В наиболее тяжелых условиях работают АД приводов грузоподъемных механизмов и якорно-швартовых устройств.

Для исследования теплового состояния использовались эквивалентные тепловые схемы (ЭТС). На рис.1 приведена ЭТС АД типа МАП-221-4/12. В используемой схеме осуществляется контроль температуры элементов конструкции (тел) двигателя, а именно: 1 и 4 – пазовые части обмоток статора, 5 и 6 – лобовые части обмоток статора, 3 – сердечник статора, 2 – ротор, 7 – внутренний воздух, 8 – корпус.

При построении ЭТС учтено взаимное тепловое влияние обмоток статора друг на друга. Пазовые части статорных обмоток (1 и 4) не имеют непосредственного контакта. Их взаимное влияние осуществляется через сердечник статора 3, посредством тепловых потоков по теплопроводностям λ_{13} и λ_{34} . Взаимное влияние лобовых частей обмоток статора осуществляется через тепловые потоки, обусловленные их непосредственным контактом, учитываемого теплопроводностью λ_{56} и через циркуляцию внутреннего воздуха 7 (теплопроводности λ_{57} и λ_{67}). Величины теплопроводностей λ ЭТС были рассчитаны по известным методикам [1, 2] и с учетом особенностей конструкции и условиями теплоотвода двигателя МАП-221-4/12. Следует отметить, что в конструкции АД типа МАП-221-4/12 не предусмотрен вентилятор внешнего обдува, поэтому величина теплопроводности λ_{80} в окружающую среду, имеет одинаковое значение для всех режимов работы, а в зависимости от частоты вращения изменяются величины теплопроводностей λ_{27} , λ_{57} , λ_{56} и λ_{67} .

Расчетные значения теплопроводностей ЭТС были скорректированы и приведены в соответствие с результатами экспериментальных исследований, приведенных на стендах НПО «Динамо», завода-изготовителя. Экспериментальные исследования проводились по методикам в соответствии с программой приемочных (типовых или периодических) испытаний (ГОСТ 7217-79), результаты которых позволили определить распределения потерь в элементах конструкции АД для каждого случая. В табл. 1 приведены значения мощностей источников тепла (потери в элементах конструкции) АД типа МАП-221-4/12 в длительном режиме при различных частотах вращения. В процессе эксперимента были получены кривые нагрева и охлаждения, при этом фиксировались температуры пазовых и лобовых частей обмоток статора, корпуса при различных частотах вращения и величинах нагрузки.

Таблица 1. – Мощности источников тепла в элементах конструкции АД типа МАП 221-4/12

Частота вращения	Мощности источников тепла тел ЭТС, Вт							
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8
400 об/мин	477,2	287,3	220	0	460,2	0	0	0
900 об/мин	0	232,6	210	534,4	0	438,1	0	0

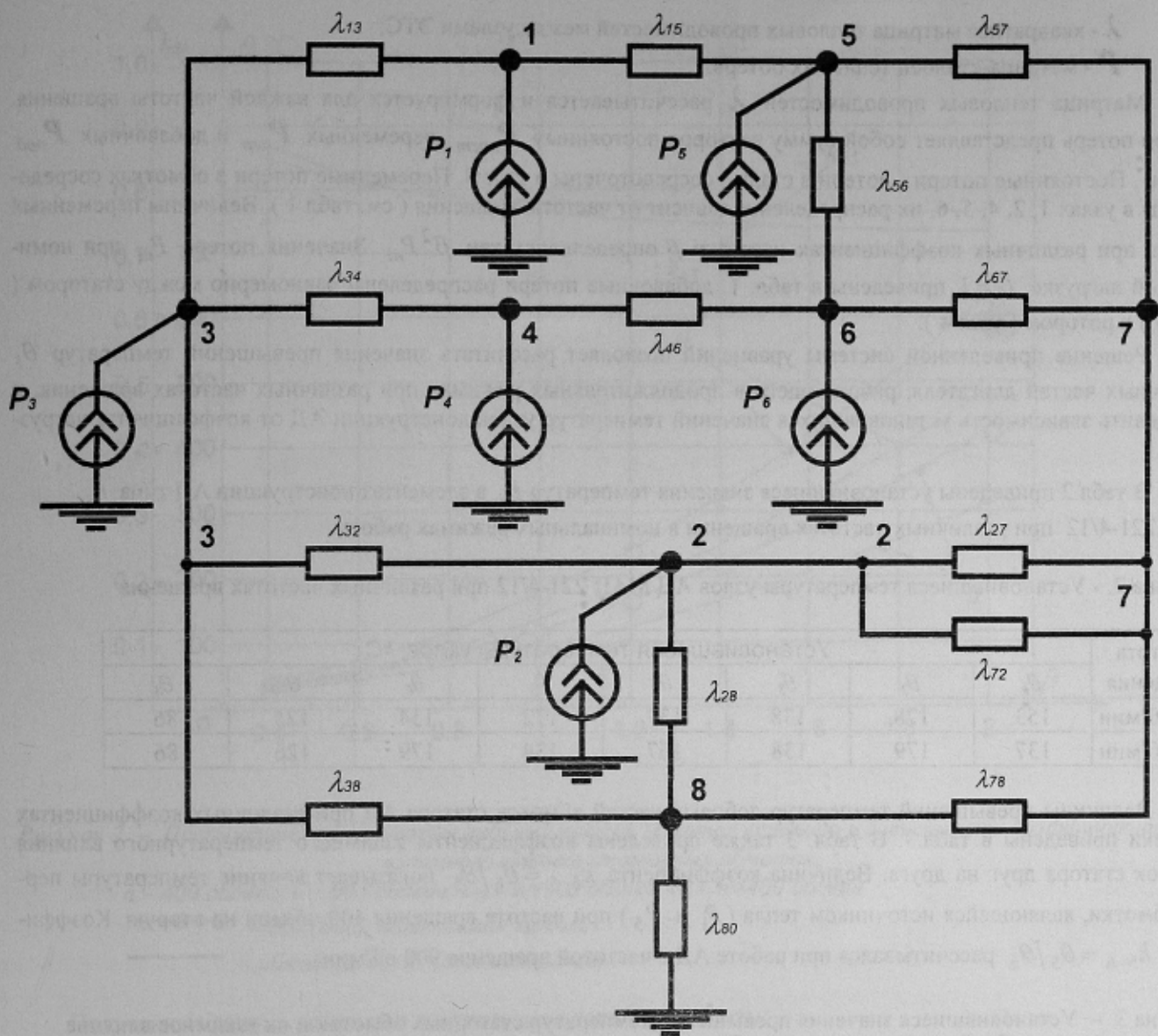


Рисунок 1 – Эквивалентная тепловая схема двухскоростного АД

Из табл.1 следует, что суммарные греющие потери в номинальных режимах при частоте вращения 400 об/мин ($\Sigma P = 1444,5$ Вт) и 900 об/мин ($\Sigma P = 1415,1$ Вт) практически одинаковы. В установившемся продолжительном режиме суммарные греющие потери равны суммарному тепловому потоку, отводимому в окружающую среду через ветвь ЭТС с теплопроводностью λ_{80} . Ранее было отмечено, что у двигателей серии МАП не предусмотрен вентилятор внешнего обдува и условия теплоотвода при работе с различными частотами вращения одинаковы. Последнее означает, что при равенстве суммарных греющих потерь превышение температуры корпуса θ_8 над температурой окружающей среды практически одинаковы. Этот факт был зафиксирован и при экспериментальных исследованиях АД МАП-211-4/12 при различных частотах вращения. Из вышеизложенного следует, что в элементах конструкции двигателей серии МАП в значительной степени определяется степень взаимного влияния обмоток статора друг на друга. Необходимо также отметить, что постоянные потери в стали практически неизменны при различных частотах вращения, поэтому изложенная выше ситуация справедлива для двигателей при работе с различными коэффициентами нагрузок.

Для АД, в конструкции которых предусмотрен вентилятор внешнего обдува корпуса, равенство потерь может привести к существенному перегреву при малых частотах вращения. Последнее должно быть учтено при проектировании и выборе режимов работы.

Для расчета установившегося режима в приведенной ЭТС использована система уравнений теплового состояния, состоящая из восьми линейных алгебраических уравнений.

Полученная система в матричной форме приведена ниже:

$$\theta_y \cdot \lambda = P,$$

где θ_y - матрица-столбец установившихся превышений температур узлов ЭТС над температурой окружающей среды;

λ - квадратная матрица тепловых проводимостей между узлами ЭТС;

P - матрица-столбец тепловых потерь.

Матрица тепловых проводимостей λ рассчитывается и формируется для каждой частоты вращения. Вектор потерь представляет собой сумму векторов постоянных $P_{пост}$, переменных $P_{пер}$ и добавочных $P_{доб}$ потерь. Постоянные потери (потери в стали) сосредоточены в узле 3. Переменные потери в обмотках сосредоточены в узлах 1, 2, 4, 5, 6, их распределение зависит от частоты вращения (см. табл.1). Величины переменных потерь при различных коэффициентах нагрузки β определялись как $\beta^2 P_{ни}$. Значения потерь $P_{ни}$ при номинальной нагрузке $\beta = 1$ приведены в табл. 1. добавочные потери распределены равномерно между статором (узел 3) и ротором (узел 4).

Решение приведенной системы уравнений позволяет рассчитать значения превышений температур θ_i различных частей двигателя, работающего в продолжительных режимах при различных частотах вращения, и определить зависимость установившихся значений температур узлов конструкции АД от коэффициента нагрузки β .

В табл.2 приведены установившиеся значения температур θ_i в элементах конструкции АД типа МАП 221-4/12 при различных частотах вращения в номинальных режимах работы.

Таблица 2. - Установившиеся температуры узлов АД МАП 221-4/12 при различных частотах вращения

Частота вращения	Установившиеся температуры узлов, °C							
	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8
400 об/мин	153	178	138	137	172	134	125	86
900 об/мин	137	179	138	167	134	179	126	86

Величины превышений температур лобовых частей обмоток статора АД при различных коэффициентах нагрузки приведены в табл.3. В табл. 3 также приведены коэффициенты взаимного температурного влияния обмоток статора друг на друга. Величина коэффициента $k_{6-5} = \theta_6 / \theta_5$ показывает влияние температуры первой обмотки, являющейся источником тепла (P_1 и P_5) при частоте вращения 400 об/мин на вторую. Коэффициент $k_{5-6} = \theta_5 / \theta_6$ рассчитывался при работе АД с частотой вращения 900 об/мин.

Таблица 3. – Установившиеся значения превышений температур статорных обмоток и их взаимное влияние

Коэффициент нагрузки β	n=400об/мин			n=900об/мин		
	θ_5	θ_6	k_{6-5}	θ_5	θ_6	k_{5-6}
0.40	41.26	35.07	0.85	29.26	33.58	0.87
0.60	72.30	58.60	0.81	43.88	53.81	0.82
0.80	115.75	91.55	0.79	64.35	82.14	0.78
1.00	171.62	133.91	0.78	90.68	118.57	0.76
1.20	239.90	185.68	0.77	122.85	163.09	0.75
1.40	320.59	246.87	0.77	160.88	215.70	0.75
1.60	413.71	317.47	0.77	204.75	276.41	0.74
1.80	519.23	397.48	0.77	254.47	345.22	0.74
2.00	637.17	486.91	0.76	310.05	422.11	0.73

На рис.2 приведены зависимости превышения температуры лобовых частей обмоток статора АД, испытывающих наибольшие тепловые нагрузки, от коэффициента нагрузки β при работе с частотой вращения 400 об/мин (а) и 900 об/мин(б), а также зависимости взаимного влияния $k_{5-6} = \theta_5 / \theta_6$ и $k_{6-5} = \theta_6 / \theta_5$ статорных обмоток АД при различных значениях частоты вращения от коэффициента нагрузки АД. На рис.2 выделены обмотки обтекаемые током, и обмотки, температуры которых являются следствием взаимного влияния. При решении уравнения это означало наличие источника переменных потерь в узлах 1 и 5, либо 4 и 6.

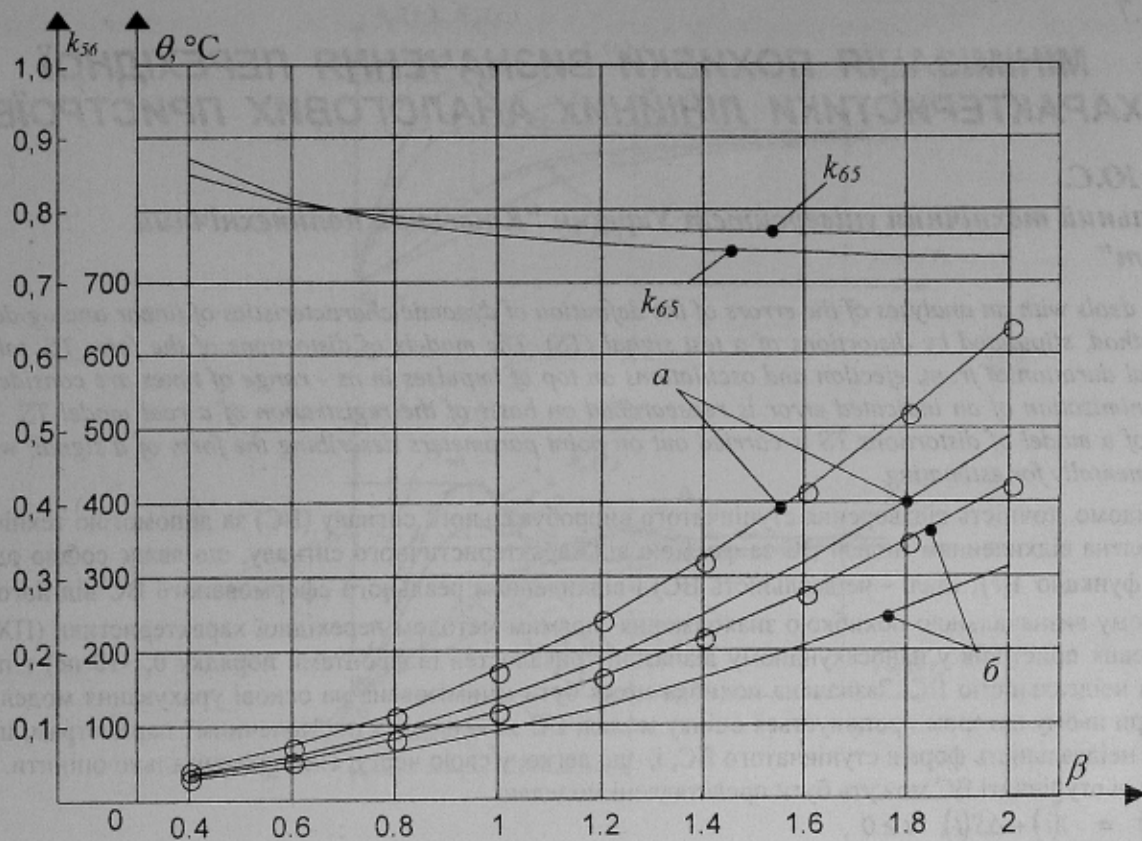


Рисунок 2. — Превышение температуры лобовых частей обмоток статора и зависимость коэффициентов взаимного влияния статорных обмоток.

a — 400 об/мин, b — 900 об/мин, k_{56} — $n=900$ об/мин k_{65} — $n=400$ об/мин

○ — обмотка, обтекаемая током,

— — обмотка, не обтекаемая током.

Полученные данные позволили получить следующие результаты:

- в наиболее напряженном тепловом состоянии находится лобовая часть статорной обмотки обтекаемой током при работе с разными значениями скорости вращения;
- зависимость превышения температуры элементов конструкции АД от коэффициента нагрузки в установленном режиме имеет квадратичный характер;
- значения коэффициентов, учитывающих взаимное тепловое влияние статорных обмоток, практически не изменяются при величинах $\beta \geq 1$, а при $0.4 \leq \beta \leq 1$ величины коэффициентов колеблются от 0,83 до 0,73 и в среднем могут быть приняты равными 0,78.

Анализ исследования теплового состояния многоскоростных АД позволяет сделать следующие выводы:

- предложенная ЭТС наиболее полно учитывает тепловое потокораспределение в двухскоростном асинхронном электродвигателе;
- предложенная ЭТС позволяет учитывать взаимное тепловое влияние независимых статорных обмоток при работе АД с различными значениями частоты вращения;
- предложенная ЭТС позволяет определить величины превышения температуры различных узлов конструкции двухскоростного АД, учитывать их при переходе в работе АД с одной скорости вращения на другую, определять величину температуры пазовой и лобовой части обмотки статора, не обтекаемой током в предыдущем режиме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурковский А.Н., Ковалев Е.Б., Коробов В.К. «Нагрев и охлаждение электродвигателей взрывонепроницаемого исполнения» М., «Энергия», 1970 г.
2. Счастливый Г.Г. «Нагревание закрытых асинхронных двигателей», Киев, «Наукова Думка», 1966.