

## ТЕПЛОВЫЕ РАСЧЕТЫ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Петрушин В.С., д.т.н., доц., Якимец А.М., Кобрин В.Л.  
Одесский национальный политехнический университет  
Украина, 65044, Одесса, пр-т Шевченко, 1, ОНПУ, кафедра “Электрические машины”  
тел. (0482) 28-84-94, E-mail: viktor\_petrushin@ukr.net

*Пропонується універсальна еквівалентна теплова схема, що дозволяє виконувати теплові розрахунки нестационарних режимів роботи асинхронних двигунів за різних систем охолодження. Розглянуто використання універсальної теплової схеми для теплових розрахунків асинхронних двигунів регульованих електроприводів.*

*Предлагается универсальная эквивалентная тепловая схема, позволяющая выполнить тепловые расчеты нестационарных режимов работы асинхронных двигателей при различных системах охлаждения. Рассмотрено использование универсальной тепловой схемы для тепловых расчетов асинхронных двигателей регулируемых электроприводов.*

Нагрев асинхронного двигателя (АД) зависит от режима его работы и величины нагрузки. В режимах, отличных от продолжительного S1, на нагрев АД оказывают влияние соотношения длительности периодов работы и пауз между ними или периодов работы с полной и частичной нагрузкой, характер протекания переходных процессов.

В регулируемых электроприводах (ЭП) двигателя чаще всего работают в перемежающемся режиме S8. Этот режим характеризуется сменой периодов работы с неизменной нагрузкой на одной частоте вращения, периодами работы на другой частоте вращения с иной, но также неизменной нагрузкой, соответствующей этой частоте. Цикл включает в себя периоды работы попеременно на двух и более частотах вращения и периоды переходов от одних частот вращения к другим. При переходных процессах от одной установившейся частоты вращения к другой увеличиваются потери, что влияет на рост температур конструктивных элементов. Характер протекания переходных процессов зависит от коэффициента инерции FI, определяемого как отношение суммы момента инерции ротора и приведенного к валу двигателя момента инерции приводного механизма к моменту инерции ротора. Кроме этого, режим S8 характеризуется относительной (в процентах к длительности цикла) продолжительностью нагрузки на каждой из частот вращения. Анализ температур конструктивных элементов АД регулируемых ЭП, в частности наиболее важного элемента — обмотки статора, должен выполняться с учетом работы двигателя в заданном режиме.

Регулируемые ЭП отличаются типами полупроводниковых преобразователей, видами регулирования и законами управления, используемыми в них. Двигатели таких ЭП могут иметь как различные исполнения, так и различные конструкции систем охлаждения. Поэтому должна быть предусмотрена возможность учитывать при тепловых расчетах как в установившихся, так и в переходных режимах все разнообразие конструктивных решений систем охлаждения АД. Особенно целесообразно для АД регулируемых ЭП применение независимого охлаждения. Наиболее эффективным для таких расчетов представляется метод эквивалентных тепловых схем замещения (ЭТС)

[1,2,3]. Универсальная ЭТС (рис.1) регулируемых асинхронных двигателей (РАД) дает возможность вести нестационарные тепловые расчеты в двигателях закрытого (IP44, IP54) и защищенного (IP22, IP23) исполнении как с принудительным, так и с самоохлаждением, а также с использованием в системе вентиляции аксиальных и радиальных вентиляционных каналов.

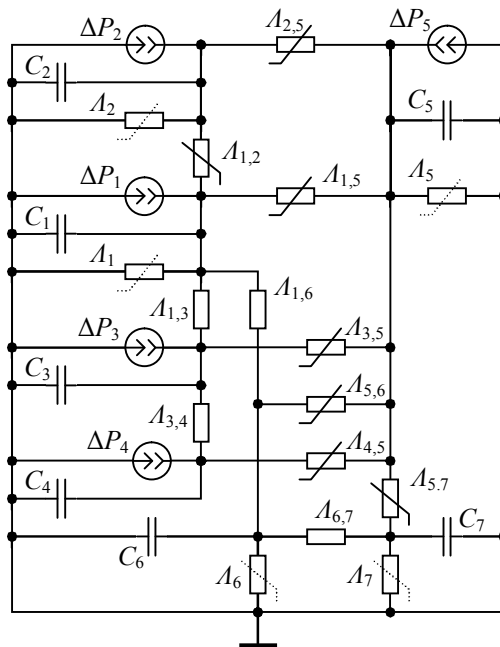


Рис. 1. Универсальная эквивалентная тепловая схема замещения АД для анализа неустановившихся тепловых процессов

В ЭТС для тепловых расчетов нестационарных режимов, составленной на основании универсальной эквивалентной тепловой схемы замещения РАД для стационарных тепловых расчетов [4], учитывается то, что конструктивные элементы электрической машины обладают определенными теплоемкостями  $C_i$ , значения которых зависят от используемых материалов и их геометрических размеров.

При переходных процессах некоторые тепловые проводимости между конструктивными элементами АД изменяются при регулировании частоты враще-

ния, изменяются. Такие проводимости изображены на схеме как переменные. Проводимости, изображенные как переменные пунктиром, изменяются при самоохлаждении и остаются неизменными при обдуве независимым вентилятором.

При решении задачи определения превышения температур различных конструктивных частей электрической машины над температурой окружающей среды в рассматриваемую эквивалентную схему замещения включены следующие конструктивные части АД:

1. Сердечник статора (зубцы и спинка) со средней температурой перегрева  $\theta_1$ , теплоёмкостью  $C_1$  и мощностью тепловыделения  $\Delta P_1$  (магнитными потерями в сердечнике с учетом добавочных потерь в стали статора).
2. Короткозамкнутая клетка ротора и зубцы ротора со средней температурой перегрева  $\theta_2$ , теплоёмкостью  $C_2$  и мощностью тепловыделения  $\Delta P_2$  (сумма всех потерь – основных и добавочных – в стержнях ротора, короткозамкнутых кольцах и в магнитной системе ротора).
3. Пазовая часть обмотки статора со средней температурой перегрева  $\theta_3$ , теплоёмкостью  $C_3$  и мощностью тепловыделения  $\Delta P_3$ .
4. Лобовые части обмотки статора со средней температурой нагрева  $\theta_4$ , теплоёмкостью  $C_4$  и мощностью тепловыделения  $\Delta P_4$ .
5. Внутренний воздух (ВВ) со средней температурой  $\theta_5$ , теплоёмкостью  $C_5$  и мощностью тепловыделения  $\Delta P_5$ , обусловленной внутренними вентиляционными потерями.
6. Станина со средней температурой перегрева  $\theta_6$ , теплоёмкостью  $C_6$ .
7. Подшипниковые щиты со средней температурой  $\theta_7$ , теплоёмкостью  $C_7$ .

В ЭТС РАД (рис. 1) представлены следующие тепловые проводимости:

$A_1$  – проводимость между пакетом статора и охлаждающей средой (при бескорпусном исполнении).

$A_{1,2}$  – проводимость воздушного зазора между сердечником статора и ротором.

$A_{1,3}$  – проводимость изоляции пазовой части обмотки от меди обмотки к сердечнику статора.

$A_{1,5} = A_{ркс} + A_{акс} + A_{пов}$  – проводимость от пакета статора к ВВ, состоит из проводимостей:  $A_{ркс}$  – от радиальных вентиляционных каналов статора,  $A_{акс}$  – от аксиальных вентиляционных каналов статора,  $A_{пов}$  – от поверхности сердечника статора к ВВ.

$A_{1,6}$  – проводимость от пакета статора к станине (для закрытых АД).

$A_2$  – проводимость от ротора к охлаждающему воздуху (через аксиальные каналы при продуваемом пакете ротора).

$A_{2,5} = A_{л2} + A_{ркр} + A_{акр} + A_{вал}$  – проводимость от активной зоны ротора к внутреннему воздуху, состоит из проводимостей:  $A_{л2}$  – проводимость от лобовых частей беличьей клетки к ВВ,  $A_{ркр}$  – от радиальных вентиляционных каналов ротора,  $A_{акр}$  – от аксиальных

вентиляционных каналов ротора к ВВ и  $A_{вал}$  – проводимость через вал к ВВ.

$A_{3,4}$  – проводимость обмотки статора в аксиальном направлении.

$A_{3,5}$  – проводимость от пазовой части обмотки статора к ВВ через радиальные вентиляционные каналы статора.

$A_{4,5}$  – проводимость от обдуваемых лобовых частей обмотки статора к ВВ.

$A_5$  – условная проводимость, учитывающая подогрев охлаждающего воздуха внутри АД (для двигателей защищенного исполнения).

$A_{5,6}$  – проводимость от ВВ к станине.

$A_{5,7}$  – проводимость от ВВ к подшипниковым щитам.

$A_{6,7}$  – проводимость между станиной и подшипниковыми щитами.

$A_6$  – проводимость от обдуваемой поверхности станины к охлаждающему воздуху.

$A_7$  – проводимость от подшипниковых щитов к охлаждающему воздуху.

Так же, как и для стационарных тепловых расчетов [4], универсальная ЭТС преобразуется для той либо другой схемы охлаждения путем исключения или изменения различных ветвей и элементов. В таблице представлены варианты изменения состава тепловых проводимостей ЭТС при различных конфигурациях систем охлаждения и исполнений РАД.

На основании предложенной универсальной ЭТС может быть составлена система дифференциальных уравнений теплового баланса. В матричном виде система представляется выражением:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{u} = [\mathbf{C}]^{-1} \cdot [\mathbf{DP} + \mathbf{L} \times \mathbf{u}], \quad (1)$$

где  $\mathbf{u}$  – матрицы-столбцы средних перегревов над температурой охлаждающей среды в соответствующих конструктивных элементах электрической машины.

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$\mathbf{C}$  – матрица теплоемкостей соответствующих конструктивных элементов, на которые условно разбивается АД

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & C_n \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$\mathbf{DP}$  – матрица-столбец мощностей тепловыделения в соответствующих конструктивных элементах АД

$$\mathbf{DP} = \begin{bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ \vdots \\ DP_n \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Величины мощностей тепловыделения рассчитываются при анализе установившихся либо нестационарных

ных режимов работы по данным потерь в элементах машины.

$L$  – матрица тепловых проводимостей

$$L = \begin{bmatrix} -L_{1,1} & L_{1,2} & \dots & L_{1,n} \\ L_{2,1} & -L_{2,2} & \dots & L_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{n,1} & L_{n,2} & \dots & -L_{n,n} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где  $L_{1,2}, L_{1,3}, \dots, L_{n,n}$  – тепловые проводимости между элементами двигателя.

Таблица  
Состав тепловых проводимостей при различных системах охлаждения

Исполнение Система вентиляции	IP44, IP54			IP22, IP23	
	IC0141	IC0151	IC0161	IC01	IC02
$A_{1,2}$	+	+	+	+	+
$A_{1,3}$	+	+	+	+	+
$A_{1,6}$	+	+	+	-	-
$A_1$	-	-	+	-	-
$A_{л1}$	+	+	+	+	+
$A_{ркс}$	-	-	-	-	+
$A_{акс}$	-	-	+	-	-
$A_{пов}$	-	-	-	+	+
$A_{3,4}$	+	+	+	+	+
$A_{3,5}$	-	-	-	-	+
$A_{л1}$	+	+	+	+	+
$A_{л2}$	+	+	+	+	+
$A_{вал}$	+	-	+	+	+
$A_{ркр}$	-	-	-	-	+
$A_{акр}$	-	-	+	+	+
$A_{пр}$	-	+	-	-	-
$A_{5,6}$	+	+	+	-	-
$A_{5,7}$	+	+	+	-	-
$A_в$	-	-	-	+	+
$A_{6,7}$	+	+	+	-	-
$A_{сщ}$	+	+	+	-	-
$A_с$	+	+	+	-	-
$A_{сщ}$	+	+	+	-	-

Решение этой системы первого порядка, например методом Рунге-Кутты, позволяет рассмотреть изменение температур конструктивных элементов АД при переходных процессах. Адекватность математической модели (ММ) существенно повышается при учете изменений на каждом шаге интегрирования как потерь (в том числе от всех учитываемых высших гармоник), так и тепловых проводимостей.

В качестве примера разработанная комплексная ММ, включающая в себя модели полупроводникового преобразователя частоты с амплитудным регулированием и законом частотного управления  $U/f = \text{const}$ , асинхронного двигателя и нагрузочного механизма, была применена для расчетов изменения перегрева обмотки статора  $\theta_c$  асинхронного двигателя с высотой оси вращения 160 мм разных исполнений (рис.2, 3) и с различными системами вентиляции [7]. Рассматривались варианты с независимым охлаждением и само-

обдувом, а также при наличии и отсутствии аксиальных вентиляционных каналов в роторе. В качестве перегрева обмотки статора  $\theta_c$  из значений перегревов  $\theta_3$  и  $\theta_4$  выбирается большее

$$u_c = \max(u_3, u_4) \quad (6)$$

Рассматриваемый электропривод используется для механизма, имеющего постоянный момент сопротивления  $M_c = 100$  Нм.

Переключающийся режим S8 описывается следующим образом: в цикле 3 периода в по 50 мин; FI – 1,5; 7,5 кВт, 725 об/мин, 33,3%; 15,4 кВт, 1470 об/мин, 33,3%; 2,77 кВт, 265 об/мин, 33,3%.

Из рис.2 видно, что для охлаждения АД закрытой конструкции (IP44) больший эффект наблюдается при наличии продуваемых наружным воздухом аксиальных каналов в пакете ротора, чем при независимом обдуве, так как каналы отводят наружу значительную часть тепла от обмотки ротора, тем самым снижая перегрев обмотки статора.

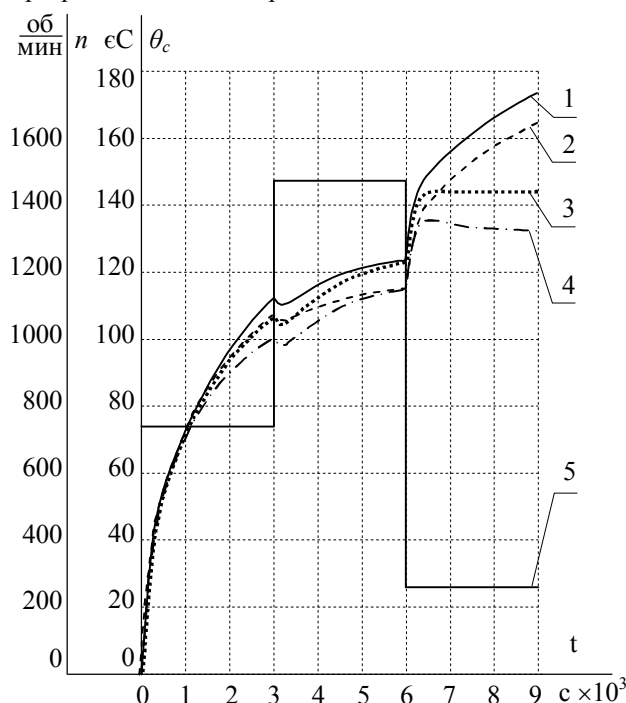


Рис.2. Временные зависимости изменения перегрева обмотки статора  $\theta_c(t)$  (1, 2, 3, 4) и частоты вращения двигателя  $n(t)$  (5) при закрытом исполнении (IP44). 1, 3 – самоохлаждение; 2, 4 – независимый обдув (1450 об/мин); 3, 4 – с аксиальными каналами в роторе

Относительно слабый эффект независимого обдува для двигателей исполнения IP44 связан с наличием в них замкнутого воздушного контура охлаждения. В тоже время для двигателей исполнения IP23, более эффективным является сторонний обдув (рис.3), а снижение перегрева обмотки статора при наличии каналов в роторе незначительно, поскольку в АД защищенной конструкции наружный охлаждающий воздух имеет относительно свободный доступ к активным частям двигателя.

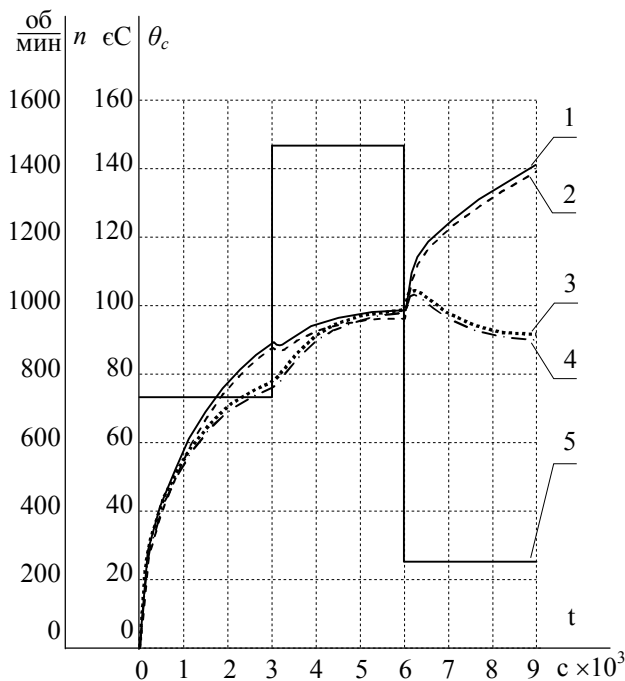


Рис.3. Временные зависимости изменения перегрева обмотки статора  $\theta_c(t)$  (1, 2, 3, 4) и частоты вращения двигателя  $n(t)$  (5) при защищенном исполнении (IP23).

1, 3 – самоохлаждение; 2, 4 – независимый обдув (1450 об/мин); 3, 4 – с аксиальными каналами в роторе

Подобным рассмотренному примеру образом с использованием разработанных комплексных ММ включающих в себя универсальную ЭТС, могут быть выполнены расчеты температур конструктивных элементов асинхронных двигателей различных исполнений и систем охлаждения для любых режимов работы, как регламентированных ГОСТом (S1 – S8), так и нестандартных. Тепловые исследования РАД систем регулируемых ЭП возможны при различных типах частотных преобразователей и законов управления в них.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Петрушин В.С., Рябинин С.В., Якимец А.М. Расчет температур конструктивных элементов асинхронных двигателей в динамических режимах // Вісник Національного університету «Львівська політехніка», – 2000. – № 403. – С. 145 – 149.
- [2] Нестационарные тепловые расчеты в электрических машинах. Беспалов В.Я., Дунайкина Е.А., Мощинский Ю.А. / Под ред. Клокова Б.К. – М.: МЭИ, 1987. – 72 с.
- [3] Коваль-Лесков А.В. Тепловые процессы в асинхронном электродвигателе при работе в перемежающемся режиме // Електромашинобудування та електрообладнання: Респ. міжвід.наук.-техн. зб.– 1997. – Вип 49. – с. 68 – 73.
- [4] Петрушин В.С., Якимец А.М. Универсальная тепловая схема замещения асинхронных двигателей // Електромашинобуд. та електрообладнан.– Вип. 59.– 2002.– С. 75 – 79.
- [5] Пуйло Г.В., Петрушин В.С., Якимец А.М. Проектирование регулируемых асинхронных двигателей для циклических нагрузок // Електротехніка і електромеханіка: Науково-практичний журнал. – 2002. – №3. – С.68 – 69.

- [6] Петрушин В.С., Якимец А.М. Анализ переходных процессов в АД при частотно-токовом управлении // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету №2/2003 (19) Том 1. – С. 49 – 52.
- [7] Петрушин В.С., Рябинин С.В., Якимец А.М. Программный продукт “DIMASDrive”. Программа анализа работы, выбора и проектирования асинхронных короткозамкнутых двигателей систем регулируемого электропривода (свидетельство о регистрации программы ПА №4065). Киев: Министерство образования и науки Украины, Государственный департамент интеллектуальной собственности, 26.03.2001.

Поступила 30.09.2003