

УДК 621.313.333

**КОРРЕКТИРОВКА ТЕПЛОВЫХ РАСЧЕТОВ РЕГУЛИРУЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ**

*Петрушин В.С., д.т.н., проф., Якимец А.М., к.т.н., доц., Груша А.В., магистр., Каленик О.В., студ. Одесский национальный политехнический университет 65044 г. Одесса, пр-т Шевченко, 1 E-mail: viktor\_petrushin@ukr.net*

Запропоновано відкореговану еквівалентну теплову схему регульованих асинхронних двигунів, що дозволяє при врахуванні греючих механічних утрат уточнити результати теплових розрахунків в усталених режимах роботи.

**Ключові слова:** регульований асинхронний двигун, тепла схема, механічні втрати, усталені режими роботи.

Corrected equivalent heat circuit of adjustable asynchronous engines is proposed. It allows to define the heat calculations of static operating conditions due to the taking into account of warming mechanical losses.

**Keywords:** adjustable-speed induction motor, equal thermal circuit, bearings losses, static mode work

**Введение.** Особенностью анализа теплового состояния регулируемых асинхронных двигателей (РАД) является необходимость расчета температурных показателей установившихся тепловых процессов в различных рабочих точках диапазона регулирования. Тепловые расчеты производятся с использованием геометрических и физических данных двигателя и значений тепловых потерь в различных конструкционных частях двигателя, определенных в результате электромагнитного расчета.

**Анализ предыдущих исследований.** Как показано в работах [1-3], приемлемым методом тепловых расчетов РАД является метод эквивалентных тепловых схем (ЭТС). При формировании математических моделей (ММ) теплового состояния регулируемого двигателя должно быть учтено разнообразие конструкционных решений РАД. В связи с этим были предложены универсальная ЭТС, предусматривающая возможность теплового расчета двигателей закрытого (IP44, IP54) и защищенного (IP22, IP23) исполнений как с принудительным охлаждением, так и с самоохлаждением, а также с использованием в системе вентиляции аксиальных и радиальных вентиляционных каналов и таблица тепловых проводимостей при разных системах охлаждения [1].

Вместе с тем, в предложенной универсальной ЭТС не учитывались механические потери, в значительной степени влияющие на температуру подшипниковых щитов и подшипников. В РАД это влияние проявляется наиболее наглядно, поскольку в различных рабочих точках диапазона регулирования механические потери имеют существенно отличные значения, что связано с соответствующими частотами вращения двигателя. Значительные отклонения расчетных и экспериментальных значений температурных показателей

подшипниковых щитов РАД [4], предопределяют необходимость корректировки тепловых расчетов.

**Цель работы:** Определение температур конструкционных элементов РАД с учетом греющих механических потерь.

**Материалы и результаты исследований.** Не все механические потери участвуют в нагреве конструкционных частей машины. Так, например, вентиляционные потери не должны включаться в ЭТС в качестве источника нагрева. Поэтому предлагается ввести коэффициент учета механических потерь  $k_{умл}$ , определяющий ту часть механических потерь, которая обеспечивает нагрев. В связи с необходимостью учета этих потерь потребовалась определенная корректировка ЭТС и таблицы теплопроводностей. Откорректированная ЭТС изображена на рис. 1.

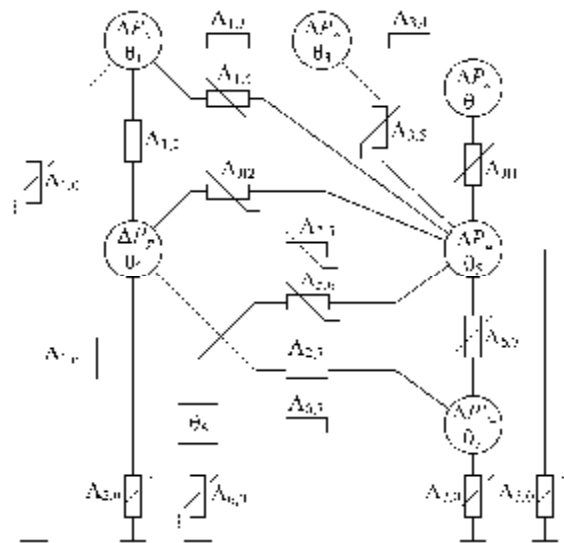


Рисунок 1 – Откорректированная универсальная тепловая схема замещения

В отличие от схемы, представленной в [1], в откорректированной ЭТС используется дополнительная проводимость между активной зоной ротора и подшипником с передачей тепла по валу  $\Lambda_{2,7}$ . Узел тепловой схемы, определяющий подшипниковый щит, дополнен греющими механическими потерями  $\Delta P'_m$ .

При тепловом расчете определяются температуры семи конструктивных элементов машины: пакета стали статора, обмотки ротора, пазовой части обмотки статора, лобовой части обмотки статора, внутреннего воздуха, станины, подшипниковых щитов, ( $\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_7$ ). В ЭТС включены следующие греющие потери:  $\Delta P_c$  – полные потери в стали статора,  $\Delta P_p = \Delta P_{эл2} + \Delta P_{с2}$  – суммарные электрические и магнитные потери в роторе,  $\Delta P_l$  – электрические потери в лобовых частях обмотки статора,  $\Delta P_n$  – электрические потери в пазовых частях обмотки статора ( $\Delta P_{эл1} = \Delta P_l + \Delta P_n$ ),  $\Delta P_a$  – внутренние вентиляционные потери;  $\Delta P'_m = \Delta P_{мех} \cdot k_{умп}$ . Характер теплообмена в РАД определяется следующими тепловыми проводимостями:  $\Lambda_{1,0}$  – проводимость между пакетом статора и охлаждающей средой (при некоторых исполнениях);  $\Lambda_{1,2}$  – проводимость воздушного зазора между сердечником статора и ротором;  $\Lambda_{1,3}$  – проводимость изоляции пазовой части обмотки от меди обмотки к сердечнику статора;  $\Lambda_{1,5} = \Lambda_{ркс} + \Lambda_{акс} + \Lambda_{нов}$  – проводимость от пакета статора к внутреннему воздуху, состоит из проводимостей:  $\Lambda_{ркс}$  – от радиальных вентиляционных каналов,  $\Lambda_{акс}$  – от аксиальных вентиляционных каналов статора,  $\Lambda_{нов}$  – от поверхности сердечника статора к внутреннему воздуху;  $\Lambda_{1,6}$  – проводимость от пакета статора к станине (для закрытых АД);  $\Lambda_{л1}$  – проводимость от лобовых частей обмотки статора к внутреннему воздуху;  $\Lambda_{2,0}$  – проводимость от ротора к охлаждающему воздуху (через аксиальные каналы при продуваемом пакете ротора);  $\Lambda_{2,5} = \Lambda_{ркп} + \Lambda_{акр} + \Lambda_{вал}$  – проводимость от активной зоны ротора к внутреннему воздуху, состоит из проводимостей:  $\Lambda_{ркп}$  – от радиальных вентиляционных каналов,  $\Lambda_{акр}$  – от аксиальных вентиляционных каналов ротора к внутреннему воздуху и  $\Lambda_{вал}$  – проводимость через вал к внутреннему воздуху;  $\Lambda_{л2}$  – проводимость от лобовых частей беличьей клетки к внутреннему воздуху;  $\Lambda_{2,7}$  – тепловая проводимость от активной части ротора к подшипникам (через вал);  $\Lambda_{3,4}$  – тепловая проводимость обмотки статора в аксиальном направлении;  $\Lambda_{3,5}$  – проводимость от пазовой части обмотки статора к внутреннему воздуху через радиальные вентиляционные каналы;  $\Lambda_{5,0}$  – эквивалентная тепловая проводимость, учитывающая подогрев охлаждающей среды при прохождении через АД (для двигателей защищенного исполнения);  $\Lambda_{5,6}$  – проводимость от внутреннего воздуха к станине;  $\Lambda_{5,7}$  – проводимость от внутреннего воздуха к подшипниковым щитам;  $\Lambda_{6,7}$  – проводимость между станиной и подшипниковыми щитами;  $\Lambda_{6,0}$  – проводимость от обдуваемой поверхности станины к охлаждающему воздуху;

$\Lambda_{7,0}$  – проводимость от подшипниковых щитов к охлаждающему воздуху.

При регулировании потери в конструктивных элементах АД и тепловые проводимости, значения которых зависят от частоты вращения, изменяются. Такие проводимости изображены на схеме как переменные. Проводимости, изображенные как переменные пунктиром, изменяются при самоохлаждении и остаются неизменными при обдуве независимым вентилятором.

Ветви с тепловыми проводимостями аксиальных и радиальных каналов могут быть также изображены на ЭТС при их наличии.

Переход от универсальной тепловой схемы к частным случаям может быть осуществлен путем изменения либо исключения тех или иных элементов (проводимостей) схемы. В табл.1 представлены варианты изменения состава тепловых проводимостей универсальной ЭТС при различных конфигурациях систем охлаждения и исполнений РАД.

Тепловые проводимости  $\Lambda_{12}, \Lambda_{13}, \Lambda_{л1}, \Lambda_{34}, \Lambda_{л2}$  присутствуют во всех рассматриваемых системах охлаждения, поэтому в табл.1 не представлены Вектор перегревов конструктивных элементов  $[\theta]$  определяется в результате решения уравнения

$$[\theta] = [\Lambda]^{-1} \cdot [\Delta P],$$

где  $[\Lambda]$  – матрица проводимостей,  $[\Delta P]$  – вектор греющих потерь в соответствующем элементе:

$$[\Lambda] = \begin{bmatrix} \Sigma\Lambda_1 & -\Lambda_{1,2} & -\Lambda_{1,3} & 0 & -\Lambda_{1,5} & -\Lambda_{1,6} & 0 \\ -\Lambda_{1,2} & \Sigma\Lambda_2 & 0 & 0 & -\Lambda_{2,5} & -\Lambda_{л2} & 0 \\ -\Lambda_{1,3} & 0 & \Sigma\Lambda_3 & -\Lambda_{3,4} & -\Lambda_{3,5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\Lambda_{3,4} & \Sigma\Lambda_4 & -\Lambda_{л1} & 0 & 0 \\ -\Lambda_{1,5} & -\Lambda_{2,5} & -\Lambda_{л2} & -\Lambda_{3,5} & -\Lambda_{л1} & \Sigma\Lambda_5 & -\Lambda_{5,6} \\ -\Lambda_{1,6} & 0 & 0 & 0 & -\Lambda_{5,6} & \Sigma\Lambda_6 & -\Lambda_{6,7} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\Lambda_{5,7} & -\Lambda_{6,7} & \Sigma\Lambda_7 \end{bmatrix},$$

где  $\Sigma\Lambda_i$  – элементы главной диагонали матрицы проводимостей  $[\Lambda]$ ;

$$[\Sigma\Lambda] = \begin{bmatrix} \Lambda_{1,2} + \Lambda_{1,3} + \Lambda_{1,5} + \Lambda_{1,6} + \Lambda_{бк} \\ \Lambda_{1,2} + \Lambda_{л2} + \Lambda_{2,5} + \Lambda_{лп} \\ \Lambda_{1,3} + \Lambda_{3,4} + \Lambda_{3,5} \\ \Lambda_{3,4} + \Lambda_{л1} \\ \Lambda_{л2} + \Lambda_{2,5} + \Lambda_{1,5} + \Lambda_{л1} + \Lambda_{5,6} + \Lambda_{5,7} + \Lambda_{3,5} + \Lambda_6 \\ \Lambda_{1,6} + \Lambda_{5,6} + \Lambda_{6,7} + \Lambda_c \\ \Lambda_{5,7} + \Lambda_{6,7} + \Lambda_{щ} \end{bmatrix}$$

$$[\Delta P] = \begin{bmatrix} \Delta P_c \\ \Delta P_p \\ \Delta P_n \\ \Delta P_l \\ \Delta P_a \\ 0 \\ \Delta P'_m \end{bmatrix}, \quad [\theta] = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \\ \theta_6 \\ \theta_7 \end{bmatrix}.$$

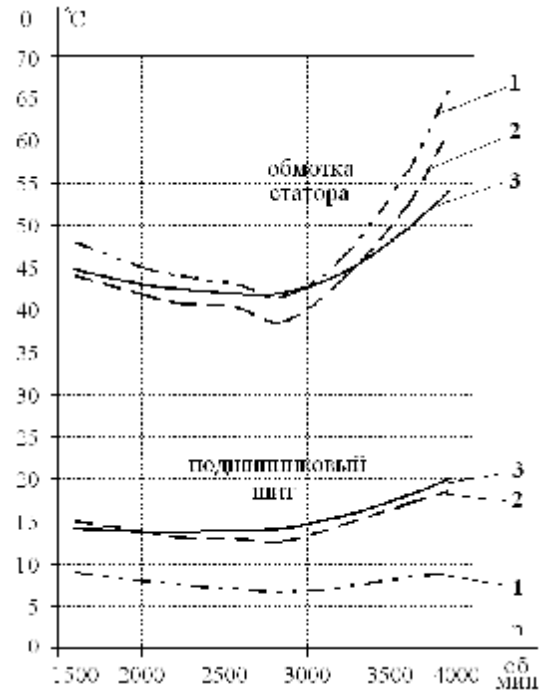
Тепловой расчет выполняется для каждого задаваемого параметра регулирования и изменения нагрузки на валу двигателя. По результатам расчета производится построение семейств зависимостей температур перегревов конструктивных элементов РАД при изменении нагрузки для различных параметров регулирования, при наложении на которые характеристики механизма осуществляется переход к тепловым регулировочным характеристикам. Таким образом, получаются характеристики изменения превышения температур конструктивных элементов РАД над температурой охлаждающей среды во всем диапазоне регулирования при работе привода на определенную по величине и характеру нагрузку.

Были проведены теоретические [5] и экспериментальные исследования тепловых показателей – температуры лобовой части обмотки статора ( $\Theta_3$ ) и температуры подшипникового щита ( $\Theta_6$ ) асинхронного двигателя 4А71А2У3, который работал на нагрузку с моментом 2 Н·м (79 % от  $M_{ном}$ ) в требуемом диапазоне регулирования 1600 ÷ 3800 об/мин. Питание двигателя обеспечивалось транзисторным частотным преобразователем Altivar 28 Telemecanique. Входное сетевое линейное напряжение во время эксперимента составляло 400 В. Преобразователь имел следующие настройки:  $U_{ном} = 230$  В и  $f_{ном} = 50$  Гц, частота модуляции 4 кГц. Характеристики были получены для двух законов частотного управления  $U/f = const$  и  $\Psi_2 = const$ . Температуры замерялись с помощью термодатчиков.

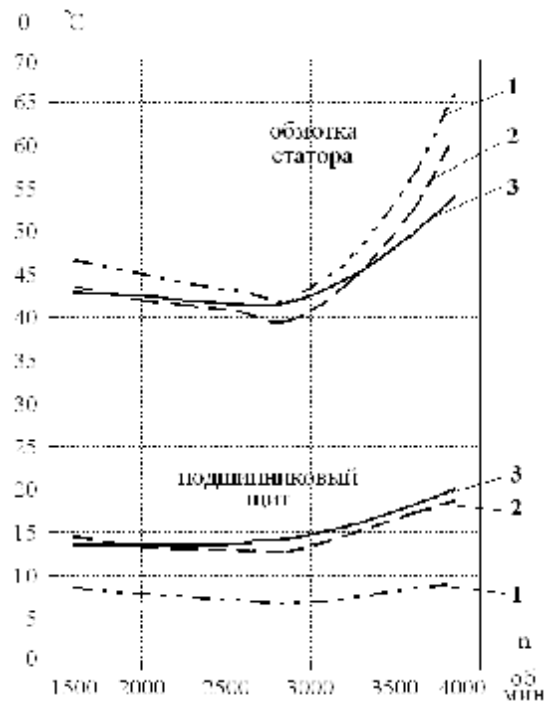
**Таблица 1 - Исключения тепловых проводимостей при различных системах охлаждения**

Исполнение	IP44, IP54			IP22, IP23	
	IC0141	IC0151	IC0161	IC01	IC02
$\Lambda_{2,7}$	+	+	-	+	+
$\Lambda_{1,6}$	+	+	+	-	-
$\Lambda_{1,0}$	-	-	+	-	-
$\Lambda_{pкс}$	-	-	-	-	+
$\Lambda_{акс}$	-	-	+	-	-
$\Lambda_{пов}$	-	-	-	+	+
$\Lambda_{3,5}$	-	-	-	-	+
$\Lambda_{вал}$	+	-	+	+	+
$\Lambda_{pкв}$	-	-	-	-	+
$\Lambda_{акв}$	-	-	+	+	+
$\Lambda_{2,0}$	-	+	-	-	-
$\Lambda_{5,6}$	+	+	+	-	-
$\Lambda_{5,7}$	+	+	+	-	-
$\Lambda_{5,0}$	-	-	-	+	+
$\Lambda_{6,7}$	+	+	+	-	-
$\Lambda_{6,0}$	+	+	+	-	-
$\Lambda_{7,0}$	+	+	+	-	-

На рис. 2 а, б представлены зависимости температур перегревов лобовой части обмотки статора и подшипникового щита при регулировании, полученные с использованием традиционной и откорректированной ЭТС, а также экспериментальным путем.



а



б

Рисунок 2 – Зависимости температур перегревов конструктивных элементов РАД при законах управления а -  $U/f = const$ , б -  $\Psi_2 = const$ ; 1 - традиционная математическая модель, 2 - откорректированная математическая модель, 3 – эксперимент.

**Выводы.**

1. Расхождение между экспериментальными данными и расчетными значениями перегревов лобовых частей обмотки статора в результате описанной выше корректировки тепловых расчетов изменилось незначительно.
2. Значения расчетных температур перегревов подшипниковых щитов после корректировки превышают расчетные значения температур перегревов подшипниковых щитов до корректировки в среднем в 2 раза и практически совпадают с экспериментальными данными.
3. Корректировка теплового расчета дает возможность уточнить, в первую очередь, значения температур перегревов подшипниковых щитов РАД (сближение расчетных и экспериментальных тепловых характеристик при регулировании). Кроме того, уточняются значения температур перегревов и других, критических с точки зрения надежности АД, конструкционных элементов.
4. Температуры перегревов лобовых частей при законе частотного управления  $\Psi_2 = \text{const}$  несколько меньше, чем при законе частотного управления  $U/f = \text{const}$ .
5. Температуры перегревов подшипниковых щитов практически одинаковы для исследуемых законов частотного управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петрушин В.С., Якимец А.М. Универсальная тепловая схема замещения асинхронных двигателей // *Электромашинобуд. та електрообладнан.* – 2002. – Вип. 59. – С. 75 – 79.
2. Петрушин В.С., Рябинин С.В., Якимец А.М. Анализ потерь и теплового состояния асинхронного двигателя при параметрическом управлении // *Техническая электродинамика*, - 2000. - №4, - С. 34 – 38.
3. Петрушин В.С., Рябинин С.В., Якимец А.М. Анализ потерь и теплового состояния асинхронного двигателя при частотном управлении // *Праці інституту електродинаміки НАН України.* – Київ: ІЕД НАН України, 1999. – Вип.1. - С. 31-36.
4. Петрушин В.С., Якимец А.М. Груша А.В., Каленик О.В. Энергетические и тепловые показатели регулируемых асинхронных двигателей с учетом высших пространственно-временных гармоник // *Электромашинобуд. та електрообладнан.* – 2008. Вип. 70. – С. 68 – 71.
5. 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.

Стаття надійшла 25.12.2008 р.  
 Рекомендовано до друку к.т.н., доц.  
 Некрасовим А.В.