

# ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ ОБРЫВАХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЕТВЕЙ СТАТОРНЫХ ОБМОТКОВ

Федоров М.М., Денник В.Ф.

Донецкий государственный технический университет  
aer@dc.dn.ua

The method of computation is stated, working characteristics and thermal condition asynchronous and synchronous electric motors are researched attached to one of difficult defined types of their disrepairs, and nominally - break presence one of parallel branches stator winding. An application of stated methods is shown on concrete example.

Катушечные группы статорных обмоток электродвигателей переменного тока часто включают параллельно. На практике не редки случаи, когда одна или несколько из параллельных ветвей обрываются. Однако в литературных источниках не удалось обнаружить методики расчета электромеханических характеристик и особенно теплового состояния асинхронных (АД) или синхронных (СД) двигателей при таком виде неисправности. Работа же двигателя в таком режиме может привести к неприятным последствиям, поэтому достаточно важным является вопрос о его диагностике и определении теплового состояния двигателя в таком режиме работы.

Частота вращения АД в рассматриваемом режиме изменяется несущественно, асимметрия статорных токов в большей мере сказывается на их начальных фазах и в меньшей мере на их величинах. В связи с этим обнаружить данный вид неисправности не всегда удастся с помощью штатных приборов даже если они имеются. В этой связи прогнозирование электромеханических и тепловых характеристик машин переменного тока при обрыве параллельных ветвей фазных обмоток статора представляет собой теоретический и практический интерес.

С целью выяснения основных соотношений между токами статора в этом режиме рассмотрим электрическую схему для статорных обмоток машины переменного тока, представленную на рис 1. Схема показана в предположении, что статорная обмотка содержит  $n$  параллельных ветвей.

Предположим, что в фазе А оборвано  $m_A$  ветвей, а в фазах В и С соответственно  $m_B$  и  $m_C$ . Тогда, если проводимость одной из параллельных ветвей  $Y$ , то комплексные проводимости фаз А, В и С соответственно равны  $Y(n-m_A)$ ,  $Y(n-m_B)$  и  $Y(n-m_C)$ . Поскольку цепь статора становится несимметричной, то появляется напряжение смещения нейтрали, которое можно определить по формуле

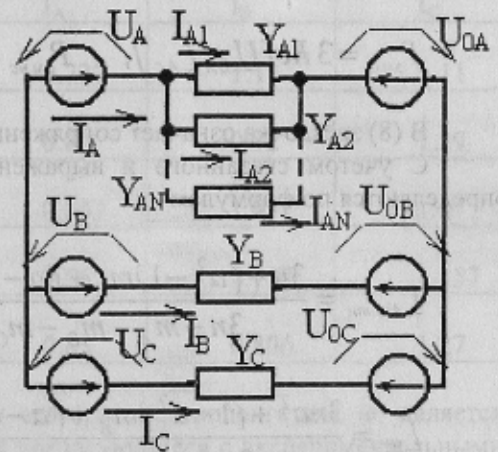


Рисунок 1 – Схема статорных обмоток

$$U_N = \frac{(U_A - U_{OA})(n - m_A)Y + (U_B - U_{OB})(n - m_B)Y + (U_C - U_{OC})(n - m_C)Y}{(n - m_A)Y + (n - m_B)Y + (n - m_C)Y} = \frac{-(U_A - U_{OA})(m_A + m_B a^2 + m_C a)}{3n - m_A - m_B - m_C} \quad (1)$$

где:  $U_0$  – напряжение намагничивающего контура;

$a$  – фазный множитель.

Фазные токи будут

$$\begin{aligned} I_A &= (U_A - U_{OA} - U_N)Y(n - m_A); & I_B &= (U_B - U_{OB} - U_N)Y(n - m_B); \\ I_C &= (U_C - U_{OC} - U_N)Y(n - m_C). \end{aligned} \quad (2)$$

Токи в отдельных параллельных ветвях фаз

$$I_{A1} = (U_A - U_{OA} - U_N)Y; \quad I_{B1} = (U_B - U_{OB} - U_N)Y; \quad I_{C1} = (U_C - U_{OC} - U_N)Y. \quad (3)$$

Принимая во внимание (1), получим

$$\underline{I}_{A1} = \frac{3n + (a^2 - 1)m_B + (a - 1)m_C}{3n - m_A - m_B - m_C} (\underline{U}_A - \underline{U}_{0A}) \underline{Y} \quad (4)$$

$$\underline{I}_{B1} = \frac{3na^2 + (1 - a^2)m_A + (a - a^2)m_C}{3n - m_A - m_B - m_C} (\underline{U}_B - \underline{U}_{0B}) \underline{Y} \quad (5)$$

$$\underline{I}_{C1} = \frac{3na + (1 - a)m_A + (a^2 - a)m_B}{3n - m_A - m_B - m_C} (\underline{U}_C - \underline{U}_{0C}) \underline{Y} \quad (6)$$

Наибольший интерес представляет относительное изменение токов отдельных параллельных ветвей по сравнению с симметричным режимом, в котором токи равны

$$\underline{I}_{A1} = (\underline{U}_A - \underline{U}_{0A}) \underline{Y}; \quad \underline{I}_{B1} = (\underline{U}_B - \underline{U}_{0B}) \underline{Y}; \quad \underline{I}_{C1} = (\underline{U}_C - \underline{U}_{0C}) \underline{Y}. \quad (7)$$

Учитывая, что при наличии обрыва одной из параллельных ветвей статорной обмотки (при наличии несимметрии) наклон механической характеристики возрастает, а, следовательно, увеличивается и скольжение  $s$ , несколько уменьшается напряжение  $U_0$ . Это приводит к возрастанию токов в фазах статора, которое может быть определено из условия равенства электромагнитных мощностей, которые в симметричном и несимметричном режимах соответственно равны

$$P_{эмс} = 3 \operatorname{Re}[\underline{U}_{0A} \underline{I}_{A1}^*]; \quad P_{эмс} = \operatorname{Re}[\underline{U}_{0A} \underline{I}_A^* + \underline{U}_{0B} \underline{I}_B^* + \underline{U}_{0C} \underline{I}_C^*]. \quad (8)$$

В (8) звёздочка означает сопряженный комплекс тока.

С учетом сказанного и выражений (4) – (6) относительные значения токов параллельных ветвей определяются по формулам

$$\underline{I}_{A1отн} = \frac{3n + (a^2 - 1)m_B + (a - 1)m_C}{3n - m_A - m_B - m_C} k; \quad (9)$$

$$\underline{I}_{B1} = \frac{3na^2 + (1 - a^2)m_A + (a - a^2)m_C}{3n - m_A - m_B - m_C} k; \quad (10)$$

$$\underline{I}_{C1} = \frac{3na + (1 - a)m_A + (a^2 - a)m_B}{3n - m_A - m_B - m_C} k, \quad (11)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий увеличение скольжения и токов в фазах статора при несимметричном режиме работы двигателя и определяемый с использованием соотношения (8).

Вышеизложенная методика позволяет рассчитывать токи, необходимые для определения мощностей источников тепловыделения и в параллельных ветвях статорных обмоток синхронных двигателей, только в формулах (1) – (8) нужно напряжение намагничивающего контура  $U_0$  заменить на ЭДС  $E$ . Для машин с явно выраженными полюсами необходимо рассчитывать составляющие тока по продольной  $I_d$  и поперечной  $I_q$  осям. Соответственно вместо  $(U-E)$  нужно в формулы (1) – (8) подставлять  $(\underline{U} \cos \theta - E)$  и  $U \sin \theta$ , а также значения сопротивлений  $x_d$  и  $x_q$ . Величину угла нагрузки  $\theta$  при обрыве одной из параллельных ветвей статорной обмотки необходимо также определять из условия постоянства момента на валу.

В табл.1 приведены расчетные значения относительных токов параллельных ветвей и значения относительных фазных токов двигателя, рассчитанные по (9) – (11). В качестве базовых приняты соответствующие токи режима, имеющего место при отсутствии обрыва. В табл.1 приведены также их начальные фазы  $\psi$  (относительно напряжения  $U_A$ ) при разных комбинациях количества оборванных ветвей и разным общем количестве параллельных ветвей.



Таблица 1 - Относительные токи параллельных ветвей, относительные фазные токи и их начальные фазы

Степень несимметрии	Относительные токи параллельных ветвей и их начальные фазы						Относительные фазные токи и их начальные фазы					
	$I_{AN}$	$\psi_{AN}$	$I_{BN}$	$\psi_{BN}$	$I_{CN}$	$\psi_{AN}$	$I_A$	$\psi_A$	$I_B$	$\psi_B$	$I_C$	$\psi_C$
$n=2, m_A=1, m_B=0, m_C=0$	1.2	0	0.917	-109°	0.917	109°	0.6	0	0.917	-109°	0.917	109°
$n=2, m_A=1, m_B=1, m_C=0$	1.15	-11°	1.15	-109°	0.9	134°	0.575	-11°	0.575	-11°	0.9	134°
$n=3, m_A=1, m_B=0, m_C=0$	1.125	0	0.94	-114°	0.94	114°	0.75	0	0.94	-114°	0.94	114°
$n=3, m_A=2, m_B=0, m_C=0$	1.29	0	0.89	-104°	0.89	-104°	0.645	0	0.89	-104°	0.89	-104°
$n=3, m_A=1, m_B=1, m_C=0$	1.08	-8.5°	1.02	-115°	0.806	122°	0.54	-8.5°	0.51	-115°	0.806	122°

В табл.2 приведены расчетные значения относительных токов в параллельных ветвях и в фазах обмотки статора с учетом поддержания постоянстве коэффициента нагрузки.

Таблица 2 - Относительные токи в параллельных ветвях и фазах обмотки статора при поддержания постоянства коэффициента нагрузки ( $\beta=1$ )

Степень несимметрии	Токи в параллельных ветвях			Фазные токи		
	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_A$	$I_B$	$I_C$
$n=2, m_A=1, m_B=0, m_C=0$	1.42	1.11	1.11	0.727	1.11	1.11
$n=2, m_A=1, m_B=1, m_C=0$	1.64	1.64	1.29	0.82	0.82	1.29
$n=3, m_A=1, m_B=0, m_C=0$	1.28	1.07	1.07	0.851	1.07	1.07
$n=3, m_A=2, m_B=0, m_C=0$	1.68	1.157	1.157	0.56	1.157	1.157
$n=3, m_A=1, m_B=1, m_C=0$	1.7	1.61	1.27	0.85	0.806	1.27

Предлагаемая методика расчета токов в параллельных ветвях статора электродвигателя не является абсолютно точной, однако дает результаты, вполне удовлетворительно согласующиеся с экспериментальными данными. В этом можно убедиться, рассматривая данные табл. 3, в которой приведены результаты эксперимента, выполненного в производственных условиях Углергской ГРЭС на синхронном двигателе типа СДС3-2000-100 шаровой мельницы при обрыве одной из трех параллельных ветвей статорной обмотки в фазе А, и данные табл.4, в которой приведены результаты эксперимента, выполненного в лабораторных условиях на асинхронном двигателе типа АО2-41- 4/2 при обрыве одной из двух параллельных ветвей статорной обмотки в фазе А. Там же приведены соответствующие расчетные показатели, взятые из табл.1 и 2.

Таблица 3 – Сравнение экспериментальных и расчетных показателей токовых нагрузок двигателя типа СДС3-2000-100 при обрыве одной из трех параллельных ветвей статорной обмотки в фазе А

Показатель	Относительные фазные токи			Сдвиги по фазе		
	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$\psi_A-\psi_B$	$\psi_B-\psi_C$	$\psi_C-\psi_A$
Эксперимент	0.85	1.07	1.07	113.8	132.4	113.8
Расчет	0.851	1.07	1.07	114	132	114

Таблица 4 – Сравнение экспериментальных и расчетных показателей токовых нагрузок двигателя типа А-4-6м при обрыве одной из двух параллельных ветвей статорной обмотки в фазе А

Показатель	Относительные фазные токи			Сдвиги по фазе		
	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$\psi_A-\psi_B$	$\psi_B-\psi_C$	$\psi_C-\psi_A$
Эксперимент	0.73	1.11	1.11	108.6	142.9	108.5
Расчет	0.727	1.11	1.11	109	142	109

Из табл. 1 - 4 следует, что обрыв параллельных ветвей приводит к значительной несимметрии токов как по величине, так и по фазе. Несимметрия приводит к появлению токов обратной последовательности, а, следовательно, и появлению обратного момента. При постоянстве момента сопротивления на валу происходит возрастание скольжения в АД (или увеличение угла нагрузки в СД), которое сопровождается ростом токов (см. табл. 2). Так при обрыве одной параллельной ветви обмотки, содержащей по две параллельные ветви в каждой фазе, приводит к увеличению токов фаз в 1.11 раз, а в фазе с оборванной параллельной ветвью в 1.47 раза. Значительно большие токовые нагрузки имеют место при обрыве большего количества параллельных ветвей.

Тепловое состояние двигателя при обрыве параллельных ветвей можно определять с помощью известных и хорошо зарекомендовавших себя эквивалентных тепловых схем (ЭТС) электрических машин [1]. В последней необходимо выделить узлы, учитывающие температуры перегрева каждой из параллельных ветвей статорной обмотки. На рис.2 приведен пример ЭТС асинхронного электродвигателя, содержащего по две параллельные ветви в каждой фазе статорной обмотки. В основу построения этой схемы положена применяемая для короткозамкнутых АД четырехтельная ЭТС, однако она существенно трансформирована. В качестве узлов этой схемы выбраны: 1А1 и 1А2 – пазовая часть первой и второй ветвей статорной обмотки фазы А; 2А1 и 2А2 – лобовая часть первой и второй ветвей статорной обмотки фазы А; 1В и 1С – пазовые части статорных обмоток фаз В и С; 2В и 2С – лобовые части статорных обмоток фаз В и С; 3 – ротор; 4 – железо статора и корпус.

Входящие в ЭТС тепловые сопротивления  $R$  (или соответствующие им тепловые проводимости  $\lambda$ ) могут быть определены по общепринятым методикам [1]. Расчет мощностей источников тепловыделения  $P$  рассмотрим подробнее. Источники тепловыделения в двигателе могут быть разбиты на две группы: постоянные, т. е. не зависящие от нагрузки (потери в стали, механические потери и др.), и переменные, зависящие от нагрузки машины и определяемые токами в обмотках статора и ротора двигателя.

Определение постоянных потерь ( $P_4$ ) может быть произведено по методике, освещенной, например, в [2] и они могут быть приняты такими же как и при отсутствии обрыва.

Для определения переменных потерь прежде всего по методике, освещенной выше необходимо при заданном моменте сопротивления двигателя рассчитать величины токов во всех фазах статора и в роторе. Тогда

$$P_{1A} = n_1 I_{1A}^2 r_1, \quad P_{1B} = n_1 I_{1B}^2 r_1, \quad P_{1C} = n_1 I_{1C}^2 r_1, \quad (12)$$

где  $n_1$  – коэффициент, учитывающий ту часть тепловых потерь в статорной обмотке, которая приходится на её пазовую часть;  $n_1$  зависит от соотношения длин пазовой и лобовой частей этой обмотки.

Аналогично определяются потери в отдельных параллельных ветвях.

Состояние ЭТС определяется системой линейных алгебраических уравнений, которая в матричном виде имеет вид:

$$\lambda \theta = P, \quad (13)$$

где:  $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_n)$  – матрица - столбец температур перегрева узлов (тел) ЭТС АД,

$\lambda = (\lambda_{ij})$  - матрица тепловых проводимостей ЭТС,

$P = (P_1, \dots, P_n)$  - матрица - столбец потерь в узлах АД,

$n$  - количество тел ЭТС.

Решением этой системы уравнений будут температуры перегрева выбранных узлов машины.

Для конкретного асинхронного двигателя на основании данных табл. 1 и 2 сформирована матрица  $P$  уравнения (13) и произведено решение последнего в симметричном режиме, а также при обрыве одной из двух параллельных ветвей статорной обмотки в фазе А и различных значениях коэффициента нагрузки двигателя  $\beta$ . Результаты этого расчета как в абсолютных, так и в относительных единицах (базовыми являются соответствующие температуры номинального симметричного режима) приведены в табл. 5.

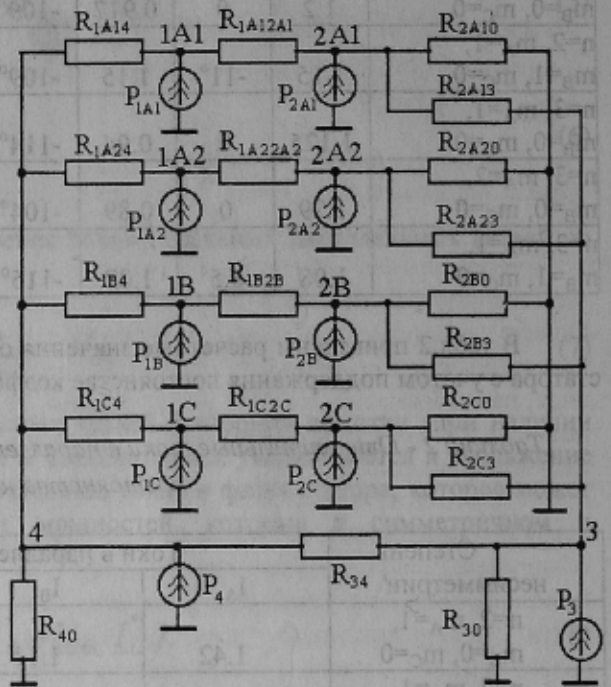


Рисунок 2 – Эквивалентная тепловая схема



Таблица 5 – Абсолютные и относительные температуры перегрева узлов двигателя при обрыве одной из двух параллельных ветвей статорной обмотки в фазе А

Режим работы	Температуры узлов АД в абсолютных (°C) и относительных единицах									
	1A1	1A2	1B	1C	2A1	2A2	2B	2C	3	4
Симетр. $\beta=1$	98.7	98.7	98.7	98.7	110.3	110.3	110.3	110.3	137.5	87
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Обрыв 1A2, $\beta=1$	118.6	92.2	108.5	108.5	150.6	80.2	123.7	123.7	143.4	93.8
	1.2	0.93	1.1	1.1	1.37	0.73	1.12	1.12	1.04	1.08
Обрыв 1A2, $\beta=0.9$	101.5	79.7	93.1	93.1	126.8	68.7	104.6	104.6	119.8	81.2
	1.03	0.8	0.94	0.94	1.15	0.62	0.95	0.95	0.87	0.93
Обрыв 1A2, $\beta=0.85$	93.6	73.9	86	86	115.8	63.3	95.7	95.7	108.8	75.4
	0.95	0.75	0.87	0.87	1.05	0.57	0.87	0.87	0.79	0.87
Обрыв 1A2, $\beta=0.8$	86	68.3	79.2	79.2	105.3	58.2	87.3	87.3	98.4	69.8
	0.87	0.69	0.8	0.8	0.95	0.53	0.79	0.79	0.72	0.8

Из табл.5 следует, что возникающая при обрыве одной из параллельных ветвей несимметрия токов приводит к неравномерному распределению температур в узлах статорных обмоток и повышенным температурным нагрузкам в некоторых узлах. Так при  $\beta=1$  перегрев узла 2A1 увеличивается в 1.37 раза по сравнению с номинальным режимом, узла 1A1 – в 1.2 раза, а узлов 1B и 1C – в 1.1 раза. Во всех случаях наиболее перегретой является лобовая часть неповрежденной ветви статорной обмотки той фазы, в которой произошел обрыв одной из ветвей (2A1). Данные табл. 5 показывают, что при работе двигателя с оборванной параллельной ветвью статорной обмотки, во избежание его перегрева необходимо снижать нагрузку двигателя. Так для примера, нашедшего отражение в табл. 5, перегрев узла 2A1 будет таким же как и в номинальном режиме только при  $\beta=0.83$ .

Обрыв параллельной ветви статорной обмотки весьма опасен при эксплуатации, так как рост температур при обрыве одной из параллельных ветвей значителен и приводит к резкому сокращению срока службы изоляционных материалов обмоток, а с помощью щитовых приборов выявить такую неисправность затруднительно. Из вышеизложенного следует, что при эксплуатации машин переменного тока необходимы устройства, позволяющие контролировать возможные обрывы в параллельных ветвях. В ДонГТУ были разработаны устройства защиты от несимметричных режимов. В алгоритме их работы использованы результаты настоящей работы. Устройства были апробированы для защиты синхронных двигателей шаровых мельниц в условиях Угледорской ГРЭС.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сипайлов Г.А., Санников Д.И., Жадан В.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах. М., ВШ, 1989, 341с.
2. Сыромятников Н.А. Режимы работы асинхронных электродвигателей. М., Энергоиздат, 1987, 515с.