

УДК 621.313.333

ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ОБРЫВЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ВЕТВИ ФАЗНОЙ ОБМОТКИ СТАТОРА

Федоров М.М., д.т.н., проф.

Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет»

Ткаченко А.А., ассист.

Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск

84313. Донецкая обл., г. Краматорск, ул. Шкадинова, 72

E-mail: tkachenko@krm.net.ua

Виконано дослідження особливостей теплових процесів асинхронних двигунів при роботі з обривом паралельної гілки та фазної обмотки статора методом математичного моделювання з використанням еквівалентних теплових схем заміщення на основі отриманих раніше результатів досліджень електромеханічних характеристик.

Ключевые слова: обрыв, температура, перевантаження, обмотка статора.

Research of the induction motor thermal processes under break of parallel branch condition using mathematical modelling by equivalent thermal charts is presented in this paper. The mathematical modelling is based on got before results of induction motor electromagnetic processes in unsymmetrical conditions.

Keywords: break, temperature, overload, parallel branch.

Введение. В ходе эксплуатации асинхронных двигателей (АД) возможно возникновение обрывов проводников статорных обмоток. В результате возникают несимметричные режимы работы, сопровождающиеся токовыми и тепловыми перегрузками. Представляют интерес особенности работы электродвигателей с обрывом одной из параллельных ветвей фазной обмотки статора.

Анализ предыдущих исследований. Обрыв одной или нескольких параллельных ветвей статорной обмотки становится причиной неравномерного распределения токов. Однако величины фазных токов отличаются незначительно и обнаружение неисправности с использованием штатных приборов не всегда возможно [1].

При этом в поврежденной фазной обмотке одна из параллельных ветвей не работает, а в исправных ветвях имеет место токовая перегрузка, которая приводит к превышению температурой изоляционных материалов максимально допустимой величины, интенсивному расходу их ресурса и отказу двигателя. При пониженной нагрузке двигатель может работать без перегрева в течение времени, необходимого для корректного завершения технологического процесса.

В работе [2] приведены результаты анализа электромеханических характеристик и установившихся температур перегрева узлов АД при обрыве одной из двух параллельных ветвей фазной обмотки статора.

Дальнейшие исследования показали, что распределение токов в параллельных ветвях исправных фаз неравномерно [3], что необходимо учитывать при анализе температурного поля. Кроме то-

го, представляют интерес и некоторые вопросы динамики температурного поля.

Цель работы. Уточнение установившихся величин и скорости изменения температур перегрева параллельных ветвей фазных обмоток статора при обрыве параллельной ветви для оценки времени безотказной работы двигателя и обоснования требований к быстрдействию систем защиты.

Материал и результаты исследований. Анализ теплового состояния двигателя при обрыве параллельных ветвей выполнен с использованием эквивалентных тепловых схем (ЭТС) [4]. С учетом особенностей распределения токов в параллельных ветвях фазных обмоток статора [3] сделан вывод о необходимости выделения лобовых и пазовых частей каждой из параллельных ветвей (рис. 1).

В тепловой схеме рис. 1 выделены следующие узлы машины: пазовые части первой и второй параллельных ветвей обмотки фазы А - ПА₁, ПА₂, фазной обмотки В - ПВ₁, ПВ₂, фазной обмотки С - ПС₁, ПС₂; лобовые части первой и второй параллельных ветвей статорной обмотки фазы А - ЛА₁, ЛА₂, фазы В - ЛВ₁, ЛВ₂, фазы С - ЛС₁, ЛС₂ соответственно. Как отдельные тела выделены пакет статора - 3, ротор - 4, корпус - 5, внутренний воздух - 6. Таким образом ЭТС имеет шестнадцать узлов. Каждому узлу соответствует превышение температуры: $\theta_{ЛА1}, \theta_{ЛА2}$ - лобовых частей первой и второй параллельных ветвей фазы А обмотки статора, $\theta_{ЛВ1}, \theta_{ЛВ2}$ - фазы В, $\theta_{ЛС1}, \theta_{ЛС2}$ - фазы С, $\theta_{ПА1}, \theta_{ПА2}$ - пазовых частей первой и второй параллельных ветвей фазы А, $\theta_{ПВ1}, \theta_{ПВ2}$ - фазы В,

$\theta_{ПС1}, \theta_{ПС2}$ - фазы С, $\theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$ - пакета статора, ротора, корпуса и внутреннего воздуха соответственно. При составлении схемы также приняты обозначения: тепловые проводимости между пазовыми и лобовыми частями первой и второй параллельных ветвей обмотки фазы А статора - $\lambda_{ЛА1 ПА1}, \lambda_{ЛА2 ПА2}$, фазы В - $\lambda_{ЛВ1 ПВ1}, \lambda_{ЛВ2 ПВ2}$, фазы С - $\lambda_{ЛС1 ПС1}, \lambda_{ЛС2 ПС2}$. Пазовые части первой и второй параллельных ветвей обмотки фазы А передают тепло пакету статора через тепловые проводимости $\lambda_{ПА1 3}, \lambda_{ПА2 3}$, фазы В - $\lambda_{ПВ1 3}, \lambda_{ПВ2 3}$, фазы С - $\lambda_{ПС1 3}, \lambda_{ПС2 3}$. От лобовых частей параллельных ветвей

фазы А тепло передается внутреннему воздуху $\lambda_{ПА1 6}, \lambda_{ПА2 6}$, фазы В - $\lambda_{ПВ1 6}, \lambda_{ПВ2 6}$, фазы С - $\lambda_{ПС1 6}, \lambda_{ПС2 6}$. Ротор через воздушный зазор имеет тепловую связь с пакетом статора ($\lambda_{4 3}$) и через аксиальные каналы в конструкции пакета с внутренним воздухом ($\lambda_{4 6}$). Пакет статора через спинку отдает тепло корпусу через проводимость $\lambda_{3 5}$. Внутренний воздух омывает нависающие части станины и подшипниковые щиты и передает тепло корпусу ($\lambda_{6 5}$). Корпус отдает тепло через наружную ребренную поверхность корпуса в окружающую среду ($\lambda_{5 0}$).

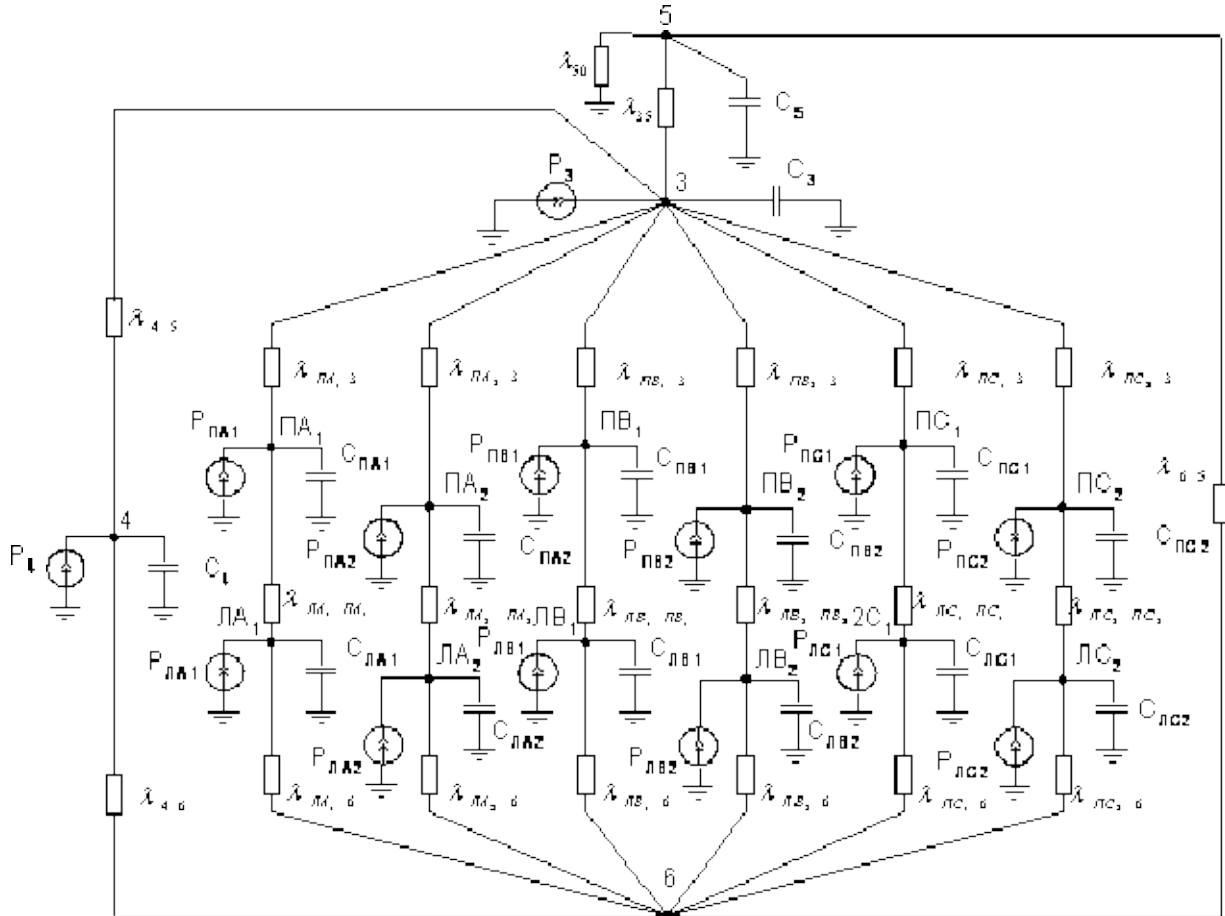


Рисунок 1 – ЭТС электродвигателя с двумя параллельными ветвями в каждой фазной обмотке статора

Теплоемкости узлов обозначены: $C_{ПА1}, C_{ПА2}$ – пазовых частей первой и второй параллельных ветвей фазы А статора; $C_{ПВ1}, C_{ПВ2}$ – фазной обмотки В; $C_{ПС1}, C_{ПС2}$ – фазной обмотки С; $C_{ЛА1}, C_{ЛА2}$ – теплоемкости лобовых частей первой и второй параллельных ветвей фазной обмотки А статора; $C_{ЛВ1}, C_{ЛВ2}$ – аналогично для фазной обмотки В, $C_{ЛС1}, C_{ЛС2}$ – теплоемкости пазовых частей параллельных ветвей фазной обмотки С. C_3 - теплоемкость пакета статора, C_4 - ротора, C_5 - корпуса, C_6 - внутреннего воздуха. Теплоемкости пазовых и лобовых частей обмоток определяются в соответствии с соотношением их длин.

В качестве источников тока на рис. 1 изображены источники тепла (тепловые потери в элемен-

тах конструкции). Тепловые потери разделяют на постоянные, не зависящие от нагрузки (потери в стали), переменные, зависимость которых от нагрузки учитывается коэффициентами нагрузки k_{Ii} и добавочные.

Источниками переменных потерь являются: $R_{ПА1}, R_{ПА2}$ – потери в пазовых частях параллельных ветвей 1 и 2 обмотки фазы А, $R_{ПВ1}, R_{ПВ2}$ – обмотки фазы В, $R_{ПС1}, R_{ПС2}$ – обмотки фазы С статора соответственно; аналогично $R_{ЛА1}, R_{ЛА2}, R_{ЛВ1}, R_{ЛВ2}, R_{ЛС1}, R_{ЛС2}$ – потери в лобовых частях первых и вторых параллельных ветвей фазных обмоток А, В и С статора соответственно, ротор – R_4 .

Мощность источников тепловыделения в i -й обмотке статора получены в соответствии с зависимостью $P_i = k_{i1}^2 \cdot P_{i0} \cdot (1 + \alpha_i \cdot \theta_i)$, где $P_{i0} = I_n^2 \cdot r_{i0}$ - мощность электрических потерь обмоток при номинальном токе I_n и сопротивлении r_{i0} , приведенном к температуре окружающей среды; α_i - температурный коэффициент сопротивления.

Распределение потерь в лобовой и пазовой частях обмотки статора пропорционально соотношению их длин:

$$P_{Li} = P_i \cdot \frac{l_L}{l_L + l_{\Pi}}, \quad P_{Pi} = P_i \cdot \frac{l_{\Pi}}{l_L + l_{\Pi}},$$

где l_L, l_{Π} - длины лобовой и пазовой частей обмотки соответственно.

Потери в обмотке ротора определяются как $P_4 = P_1 - P_2 - \Sigma P_{ci}$, где P_1 - суммарная мощность, потребляемая от сети, P_2 - механическая мощность на валу двигателя, ΣP_{ci} - суммарные потери статора.

Добавочные потери могут быть постоянными и находиться в функциональной зависимости от тока. Потери, обусловленные зубцовыми гармониками, считаются пропорциональными квадрату тока $P_{доб} = \beta^2 \cdot P_{добн}$, где $P_{добн}$ - добавочные потери в узле i при номинальной нагрузке.

Полученное математическое описание позволяет проводить расчет динамики тепловых процессов симметричной машины. С целью анализа температурного поля АД при обрыве параллельной ветви мощности источников тепла в поврежденной параллельной ветви принимаются равными нулю, мощности источников тепла остальных узлов корректируются в соответствии с распределением токов.

В соответствии с ЭТС рис. 1, с использованием результатов математического моделирования машины в трехфазных непреобразованных координатах [3], выполнено исследование статики и динамики температурного поля. Для каждого значения коэффициента нагрузки получены величины токов и мощности источников тепла в параллельных ветвях фазных обмоток. Анализ результатов подтвердил известное положение, что наиболее нагретыми являются лобовые части параллельных ветвей фазных обмоток статора, поэтому далее рассматриваются только эти температуры. На рис. 2 показаны зависимости установившиеся температуры лобовых частей параллельных ветвей обмоток статора от величины нагрузки.

Из анализа рис. 2 следует, что обрыв параллельной ветви приводит к значительному перегреву отдельных параллельных ветвей обмотки статора. Так при номинальном моменте сопротивления температура параллельной ветви поврежденной фазы превышает номинальную в 4,43 раза. Однако при нагрузке в 64% номинальной температуры обмоток не превышают максимально допус-

тимой и двигатель может работать длительное время.

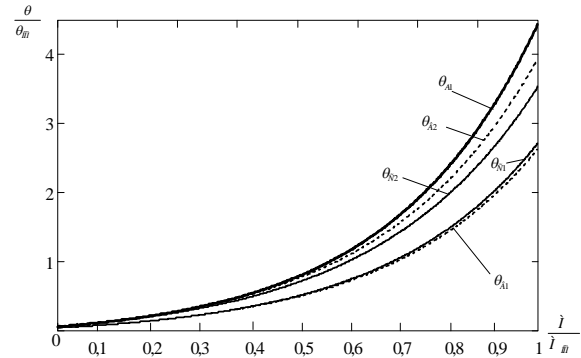


Рисунок 2 – Графики зависимостей установившихся температур лобовых частей обмоток двигателя АО2-61 (2р=6) при обрыве первой параллельной ветви фазы А статора

Исследование распределения температур в установившихся режимах также проводилось путем экспериментальных исследований. В табл. 1 приведены экспериментальные и расчетные превышения температур лобовых частей обмоток в установившемся режиме при пониженной нагрузке.

Из анализа результатов табл. 1 следует, что при обрыве одной из двух параллельных ветвей фазной обмотки статора наиболее нагретой является лобовая часть ветви поврежденной фазы. Так при моменте сопротивления в 0,7 номинального имеет место тепловая перегрузка в 1,25 θ_n .

Превышение температурой номинальных значений имеет место и в параллельных ветвях других фаз. Так при той же нагрузке температуры вторых параллельных ветвей исправных фаз В и С составили 1,18 θ_n и 1,01 θ_n соответственно.

Таблица 1 – Превышения установившихся температур лобовых частей обмоток фаз статора

$\frac{M}{M_n}$	θ_{A2}	θ_{B1}	θ_{B2}	θ_{C1}	θ_{C2}
Расчет					
0,51	0,28	0,18	0,27	0,18	0,24
0,64	1,072	0,66	1,02	0,68	0,93
0,7	1,23	0,76	1,16	0,78	1,06
Эксперимент					
0,51	0,30	0,15	0,25	0,17	0,20
0,64	1,00	0,59	0,97	0,63	0,86
0,70	1,25	0,73	1,18	0,73	1,01

Однако при нагрузке в 0,64 M_n температуры всех параллельных ветвей близки к номинальным и двигатель может работать продолжительное время. Максимальная погрешность результатов расчета не превышает 7,2%, средняя составила 4%.

С целью оценки динамики изменения температуры обмоток статора проведен расчет тепловых переходных процессов. На рис. 3 приведены кривые нагрева лобовых частей работающих парал-

лельных ветвей статорных обмоток при обрыве второй ветви фазы А двигателя АО2-61 в продолжительном режиме работы при номинальной нагрузке.

Из рис. 3 следует, что при обрыве параллельной ветви имеет место неравномерный нагрев обмоток АД на всех этапах переходного процесса нагрева. Наиболее нагретой является лобовая часть параллельной ветви поврежденной фазы, в установившемся режиме перегрев достигает $4,43\theta_H$. Повышенные температуры имеют место и в других параллельных ветвях фазных обмоток, так в установившемся режиме перегрев лобовых частей ветвей C_2 и B_2 составил $3,9\theta_H$ и $3,53\theta_H$ соответственно, B_1 и C_1 – $2,62\theta_H$ и $2,71\theta_H$ соответственно. Скорость нарастания температуры не превышает $2,1\text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$.

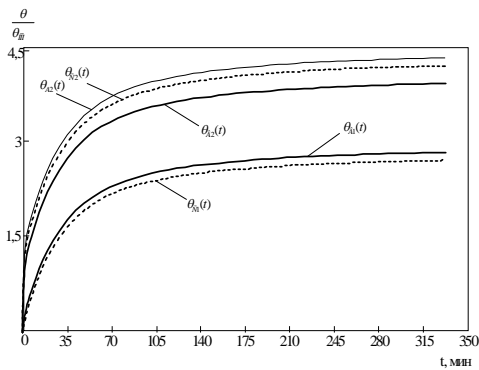


Рисунок 3 – Кривые нагрева лобовых частей обмоток параллельных ветвей статора при обрыве ветви A_1 и номинальной нагрузке (АО2-61, $2p=6$)

С целью оценки точности полученных результатов проведены экспериментальные исследования. На рис. 4 показана расчетная кривая 1 нагрева лобовой части, работающей параллельной ветви поврежденной фазы двигателя АО2-61 при $2p=6$, совмещенная с экспериментальными данными 2.

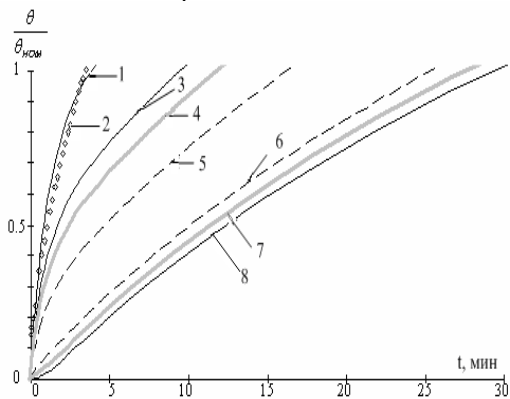


Рисунок 4 – Кривые нагрева параллельных ветвей обмотки статора до номинальной температуры при номинальном моменте (АО2-61, $2p=6$)

Поскольку экспериментальное исследование температурного поля при неисправностях обмотки статора сопряжено с риском выхода из строя электродвигателя, оценка перегревов на всем диапазо-

не нагрузок не представляется возможной. Изменение температур продолжалось до достижения температурой обмотки номинального значения. Для сравнения приведены кривые нагрева других параллельных ветвей обмотки статора: первой и второй параллельных ветвей фазы А – 8, 3; фазы В – 6, 5; фазы С – 7, 4.

Выводы. 1. Обрыв одной из двух параллельных ветвей обмотки статора приводит к многократной (до $4,3\theta_H$) тепловой перегрузке работающей параллельной ветви поврежденной фазы при номинальной нагрузке. С уменьшением момента сопротивления токовая и тепловая перегрузки снижаются, при нагрузке $0,64M_H$ двигатель может длительное время работать без перегрева.

2. При пониженной нагрузке может возникнуть ситуация, при которой фазные токи не превышают номинальных величин, а в работающей параллельной ветви поврежденной фазы имеет место тепловая перегрузка, для предотвращения дальнейшего повреждения двигателя неисправность должна быть своевременно обнаружена средствами технического диагностирования.

3. При обрыве параллельной ветви температура поврежденной ветви превышает максимально допустимую через 2-3 минуты после включения.

4. В случае, если неисправность произошла в процессе работы, температура превышает максимально допустимую за меньшее время, следовательно, обнаружение обрывов параллельных ветвей и межвитковых замыканий обмоток статора необходимо осуществить на стадии возникновения, с использованием систем непрерывного диагностирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федоров М. М. Защита электродвигателей переменного тока от несимметричных режимов работы при обрыве параллельных ветвей в обмотке статора / М. М. Федоров, В. Ф. Денник, В. Ф. Черноус // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Донецк: ДонГТУ, 2001. – № 18. – С. 130-132.

2. Федоров М. М. Тепловое состояние электродвигателей переменного тока при обрывах параллельных ветвей статорных обмоток / М. М. Федоров, В. Ф. Денник // Сборник научных трудов ДонГТУ. Серия «Электротехника и энергетика». – № 17. – Донецк, ДонГТУ, 2000. – С. 87-91.

3. Вареник Е. А. Математическое моделирование асинхронных электродвигателей в несимметричных режимах работы / Е. А. Вареник, М. М. Федоров, О. И. Толочко, А. А. Ткаченко // «Электротехника и электромеханика», НТУ «ХПИ». – Харьков, 2006 – С. 29-36.

4. Сипайлов Г.А. Математическое моделирование электрических машин (АВМ) / Г. А. Сипайлов, А. В. Лоос. – М.: Высшая школа, 1980. – 176 с.

Стаття надійшла 29.03.2009 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Чорним О.П.