

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ПРИ АНОМАЛЬНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Федоров М. М.

Донецкий национальный технический университет

Ткаченко А. А.

Донбасская государственная машиностроительная академия

phoentice@ukr.net

In the paper is introduced an analysis of induction motors behavior under fault conditions: broken phase or it's parallel branch and inter-turn shorts in stator winding. This document also describes some features of abnormal power conditions of induction motors, which can be used in emergency tripping devices.

Введение. Эксплуатация асинхронных электродвигателей (АД) зачастую сопровождается различными неисправностями в обмотке статора (обрывами фаз, обрывами одной или нескольких параллельных ветвей фазных обмоток, межвитковыми замыканиями и пр.) В результате возникает несимметричный режим, который сопровождается появлением момента обратной последовательности, снижением перегрузочной способности и неравномерным токораспределением. При этом токи отдельных фаз могут превышать номинальные значения, что приводит к перегреву обмоток и выходу двигателя из строя. Для исключения серьезных неисправностей необходимо своевременно выявить аномальный режим, принять решения о допустимости дальнейшего использования АД, условиях и времени безаварийной работы. Для этого следует располагать информацией об электромеханических и тепловых процессах, протекающих в асинхронных двигателях в несимметричных режимах.

Исследованию режимов работы в условиях наличия неисправностей в обмотках статора посвящен ряд работ отечественных и зарубежных исследователей. Наиболее полно изученным вопросом является обрыв одной фазы обмотки статора. В работе [1] выполнен анализ фазных токов, моментов прямой и обратной последовательностей. Для более глубокого суждения о данном режиме работы АД необходимо рассмотреть вопросы о допустимом времени работы двигателя при различной нагрузке, условиях безаварийной работы и пр. Менее изученной неисправностью является обрыв параллельной ветви обмотки статора. Данному вопросу посвящены работы [2, 3], однако необходима более полная информация о распределении токов в фазах и их параллельных ветвях, величинах максимальных и пусковых моментов и пр. Межвитковые замыкания в обмотках статора являются наиболее сложными в обнаружении неисправностями [4,5]. Анализ процессов, происходящих в АД при наличии этих неисправностей, позволит выявить их характерные особенности, которые могут быть использованы при построении защитных устройств.

Таким образом, процессы, происходящие в несимметричных режимах асинхронных двигателей недостаточно полно освещены в периодической литературе, поэтому исследование электромеханических характеристик при различного рода неисправностях является актуальной задачей.

Цель работы Исследование режимов работы и анализ теплового состояния АД при различных неисправностях в обмотках статора, выявление их характерных особенностей, которые могут быть использованы при разработке устройств защиты и прогнозирования срока безаварийной эксплуатации двигателей.

Методика исследований.

Анализ несимметричных режимов работы проводился с использованием четырехскоростного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором АО2-61 12/8/6/4, характерной особенностью которого является наличие двух параллельных ветвей в фазах статорных обмоток при подключении с $2p=6$ и $2p=4$. Так одна из обмоток (с $2p = 6/12$) имеет в каждой фазе шесть катушечных групп (рис. 1), которые включаются последовательно (рис. 1.а, $2p=12$) и параллельно (рис. 1.б, $2p=6$). Данный двигатель подготовлен для широких исследований несимметричных режимов работы. С этой целью на коммутационную панель выведены зажимы каждой катушечной группы, кроме того, в первой катушечной группе выведены зажимы одной из катушек. Это позволяет исследовать различные несимметричные режимы (обрывы фаз, параллельных ветвей фаз, короткие замыкания одной или двух катушек катушечной группы, а также всей катушечной группы и пр.). В обмотках статора встроены термодпары (катушечные группы, оснащенные термодпарами, выделены толстыми окружностями на рис. 1), позволяющие непрерывно контролировать температуры обмоток фаз, их параллельных ветвей и отдельных секций первой катушечной группы.

На рис. 2 приведена структурная схема стенда исследования несимметричных режимов двигателя. Для всестороннего суждения об электромеханических характеристиках АД в составе стенда предусмотрен измерительный комплекс, позволяющий:

- измерять токи и напряжения фаз и отдельных элементов обмотки (параллельных ветвей, короткозамкнутой секции и пр.) с частотой 500 точек за период, что позволяет судить об их мгновенных значениях и сдвиге

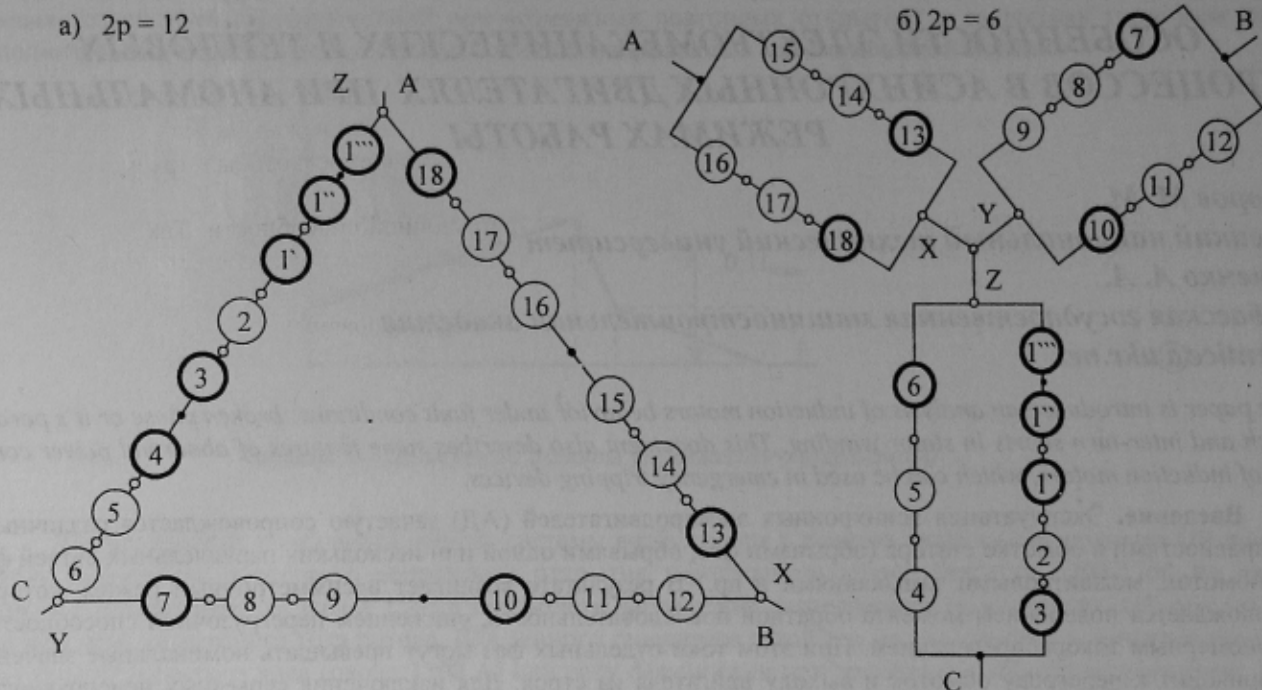


Рисунок 1 – Схема подключения верхней обмотки двигателя АО2-61
 1-17 – катушечные группы обмоток фаз AX, BY, CZ
 18', 18'', 18''' – катушки 18-й катушечной группы;
 ○ – выходы катушечных групп и катушек на коммутационной панели;
 • – соединение катушек внутри двигателя

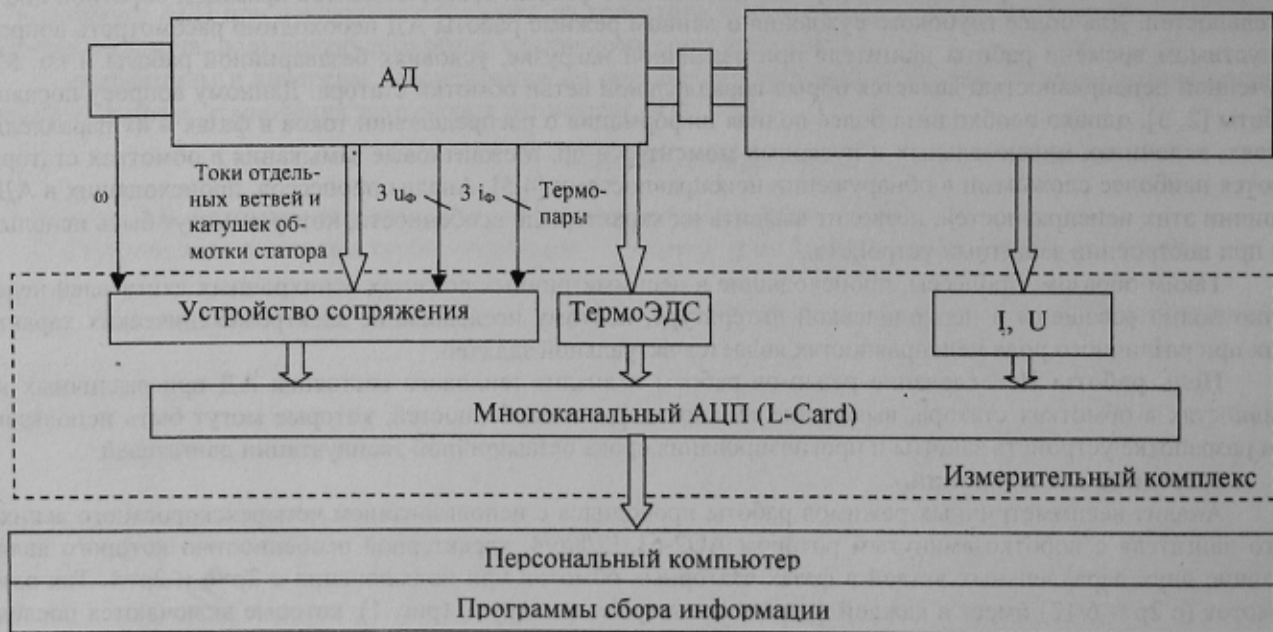


Рисунок 2 – Структурная схема стенда исследования аномальных режимов работы АД

гах по фазе. Для этого предусмотрено устройство сопряжения, использующее датчики тока и напряжения LEM, информация с которых оцифровывалась АЦП L-Card L264 (рис 1);

- с достаточной точностью фиксировать скольжение, для чего предусмотрено измерение частоты вращения двигателя (с использованием цифрового тахометра) и частоты питающего напряжения.

- судить о моменте сопротивления по току и напряжению генератора постоянного тока (ГПТ на рис. 2).

Измеряемые данные заносились в память компьютера, что позволяет провести их всесторонний анализ. Так по данные о мгновенных значениях токов и напряжений позволяют судить о различных электрических характеристиках (гармоническом составе кривых токов и напряжений, сдвигах по фазе, активной, реактивной и полной мощности и пр.). Информация о скольжении, моменте сопротивления, токах статора позволяет формировать различные электромеханические и пусковые характеристики. Показания термпар позволяют судить о статических и динамических тепловых процессах, протекающих в АД при различных режимах работы.

Результаты исследований. На первом этапе исследований проведен анализ режима работы в условиях обрыва фазы на отключенном двигателе. В этих условиях пусковой момент экспериментального электродвигателя равен нулю. Включение АД приводит к возникновению в исправных фазах токов, близких к токам короткого замыкания. Величина температуры обмоток возросла до максимально допустимой за 10-15 секунд и увеличивалась далее, что могло привести к выходу обмоток из строя. В этой связи важно не допустить возникновения данного режима для исключения обширных неисправностей, устранение которых требует перемотки двигателя.

Обрыв фазы на включенном АД приводит к снижению перегрузочной способности. Так при номинальном моменте сопротивления происходило опрокидывание экспериментального двигателя. Это означает, что в данном режиме максимальный момент меньше номинального момента исправной машины. При меньших значениях нагрузки двигатель продолжает работу, однако величины токов в исправных фазах могут заметно превышать номинальные, что приводит к перегреву и выходу из строя обмоток. В качестве примера в табл. 1 приведены величины фазных токов и моментов сопротивления при обрыве фазы относительно их номинальных значений при разных включениях двигателя.

Таблица 1 - Относительные токи и моменты при обрыве фазы С двигателя АО2-61

Величина	2p=12		2p=8		2p=6		2p=4	
$I_A/A_{НОМ} = I_B/I_{НОМ}$	1,78	1	1,77	1	1,77	1	1,74	1
$M/M_{НОМ}$	0,53	0,4	0,45	0,42	0,54	0,39	0,43	0,39

Из табл. 1 следует, что при обрыве фазы двигателя АО2-61 величины тока в исправных обмотках могут превышать номинальные на 74-78%, что приводит к быстрому росту температуры. Температура обмоток достигала максимально допустимой за 3 мин., через 5-10 мин может произойти выход из строя изоляционных материалов. Если двигатель работает с пониженным моментом сопротивления, величины токов в неповрежденных фазах могут не превышать номинальных, а АД может работать без перегрева в течение длительного времени. Так для экспериментального двигателя при моменте в $(0,39..0,42)M_{НОМ}$ в неповрежденных фазах величины токов равны номинальным (табл. 1).

Обрыв параллельной ветви имитировался отключением одной из двух параллельных ветвей обмотки статора при подключении с $2p = 4/6$. В этом режиме величина пускового момента двигателя снижена и включение двигателя осуществлялось вхолостую. Если обрыв произошел при включенном двигателе, то АД продолжал работу при номинальной нагрузке, однако максимальный момент сократился до $(1,2..1,3)M_{НОМ}$. Величины токов в неповрежденных фазах возросли. В табл. 2 приведены относительные значения токов и углы сдвига фаз между линейными токами для двигателя АО2-61. Базовой величиной принят номинальный ток фазы I_n для данной схемы подключения.

Таблица 2 - Относительные токи в фазных обмотках, параллельных ветвях фазных обмоток и углы сдвига фаз при $2p=4$ и $2p=6$. Обрыв параллельной ветви фазы А, номинальный момент на валу

2p	I_A/I_n	I_B/I_n	I_C/I_n	$\Delta \Psi_{AB}^\circ$	$\Delta \Psi_{BC}^\circ$	$\Delta \Psi_{CA}^\circ$
4	0,96	1,27	1,27	108,7	138,5	112,8
6	0,96	1,45	1,45	110,8	120,9	128,3

Как следует из табл. 2, при обрыве одной из двух параллельных ветвей фазные токи превышают номинальные на 27% при подключении с $2p = 4$ и на 45% при подключении с $2p = 6$. Ток в поврежденной фазе составляет $0,96 I_n$. Принимая во внимание, что в этой фазе работает лишь одна из параллельных ветвей с допустимым током в $0,5 I_n$, работающая ветвь перегружена почти в два раза, что приводит к быстрому нарастанию температуры. Согласно расчетам, температура этого элемента обмотки достигает максимально допустимой за 2 мин., а примерно через 5 мин обмотка выходит из строя и для устранения неисправности требуется полная перемотка двигателя. При пониженной нагрузке токи в фазах и параллельных ветвях могут не превышать номинальных величин. Так в таблице 3 приведены величины относительных моментов и фазных токов, при которых ток в параллельной ветви поврежденной фазы не превышает номинальной величины.

Таблица 3 - Относительные токи при обрыве параллельной ветви фазы А и пониженном моменте

2p	Момент сопротивления	Токи в фазах			Токи в параллельных ветвях		
		I_A/I_n	I_B/I_n	I_C/I_n	$I_{A1}/I_{н.в.}$	$I_{B1}/I_{н.в.}$	$I_{C1}/I_{н.в.}$
12	$0,46M_{НОМ}$	0,5	0,65	0,66	1	0,65	0,66
6	$0,45M_{НОМ}$	0,5	0,66	0,69	1	0,66	0,69

Из табл. 3 следует, что при понижении момента сопротивления до $(0,45..0,46)M_{НОМ}$, токи в параллельных ветвях не превышают номинальных значений, следовательно, двигатель может работать длительное время без перегрева. Необходимо отметить, что при пониженной нагрузке возможен режим, в котором фазные токи не превышают номинальных, однако ветвь поврежденной фазы испытывает токовые перегрузки. Так при токах в неповрежденных фазах в $0,8I_{НОМ}$ в ветви поврежденной фазы величина тока превышает номинальную в полтора раза. Таким образом, величины токов являются недостаточно информативным критерием для построения систем защиты. В этом плане перспективным показателем является сдвиг фаз линейных токов.

Межвитковое замыкание обмотки статора АД моделировалось замыканием выводов одной катушки первой катушечной группы для обмотки (рис. 1). Как показано на рисунке, катушечные группы фазных обмоток были подключены последовательно ($2p=12$) и параллельно ($2p=6$). В табл. 4 приведены значения углов сдвига фаз между линейными токами $\Delta \Psi$, токи фаз и короткозамкнутой секции $I_{кз}$ относительно номинального тока при данном подключении. Момент сопротивления поддерживался постоянным и равен номинальному для каждой схемы подключения.

Таблица 4 - Относительные токи при обрыве параллельной ветви фазы А и пониженном моменте

$2p$	I_A/I_n	I_B/I_n	I_C/I_n	$I_{кз}/I_n$	$\Delta \Psi_{AB}^\circ$	$\Delta \Psi_{BC}^\circ$	$\Delta \Psi_{CA}^\circ$
12	1,17	1,12	1,07	3,02	125,6	111,6	117,25
6	1,26	1,5	1,34	3,04	123,74	124,7	111,5

Из табл. 4 следует:

– величина тока в короткозамкнутой секции практически одинакова для обоих случаев и более чем в три раза превышает номинальную величину, что вызывает значительный перегрев и отказ двигателя в течение нескольких минут.

– Возникновение замыкания секции приводит к увеличению фазных токов при постоянном моменте. Распределение токов по фазам при $2p = 12$ и $2p = 6$ различно, что вызвано разными схемами подключения катушечных групп (см. рис.1).

– Величины фазных токов превышают номинальные на 7..17% для подключения с $2p=12$ и 26..34% для подключения с $2p=6$.

– Выявление неисправности по величинам фазных токов с помощью щитовых приборов затруднено. Особенно сложно обнаружить межвитковое замыкание при пониженной нагрузке. В этом режиме величины фазных токов могут не превышать номинальных режимов, а в короткозамкнутой секции обмотки испытывает многократные токовые перегрузки. Следует отметить, что понижение нагрузки не оказывает влияния на величину тока в короткозамкнутой секции, что говорит о том, что для исключения выгорания обмотки необходимо отключить двигатель.

Таким образом, для обнаружения межвиткового замыкания недостаточно контролировать величины фазных токов. В качестве критерия наличия неисправности могут служить сдвиги по фазе между линейными токами.

Выводы. Из вышеизложенного следует, что наличие аномалий в обмотках статора приводит к возникновению аварийных режимов, требующих отключения двигателя для устранения неисправности. Рациональным критерием для суждения о наличии неисправности является сдвиг по фазе между линейными токами. В этой связи при создании систем защиты необходимо использовать микропроцессорные устройства, позволяющие использовать данный показатель.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных электродвигателей.- М.: Энергоиздат, 1955. – 303с.
2. Федоров М. М., Денник В. Ф., Черноус В. И. Защита электродвигателей переменного тока от несимметричных режимов работы при обрыве параллельных ветвей в обмотке статора // Сб. научных трудов ДонГТУ.-Донецк: ДонГТУ, 2001. - С. 130-132.
3. Федоров М. М., Денник В. Ф. Тепловое состояние электродвигателей переменного тока при обрывах параллельных ветвей статорных обмоток // Сб. научных трудов ДонГТУ. - Донецк: ДонГТУ, 2000. - С. 87-91.
4. S. B. Lee, R. M. Tallam, and T. G. Habetler, "A robust, on-line turn-fault detection technique for induction machines based on monitoring the sequence component impedance matrix," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 18, pp. 865-872, May 2003.
5. ChiaChou Yeh, Student Member, IEEE, Richard J. Povinelli, Senior Member, IEEE, Behrooz Mirafzal, Student Member, IEEE and Nabeel A. O. Demerdash, Fellow, IEEE. Diagnosis of Stator Winding Inter-Turn Shorts in Induction Motors Fed by PWM-Inverter Drive Systems Using a Time-Series Data Mining Technique // 2004 International Conference in Power System technology - POWERCON 2004 Singapore, 21 -24 November 2004.

УДК 621.313.2:004.891.3

Рекомендовано проф., д.т.н. Дудник М.З.