

М.М.Федоров, А.А.Ткаченко

МЕТОД ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОБРЫВОВ И МЕЖВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ В СТАТОРНЫХ ОБМОТКАХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Анализ электромеханических процессов, протекающих в асинхронных двигателях с неисправностями статорных обмоток. Выбор диагностических параметров и требований к системе диагностирования. Метод диагностирования неисправностей по углам сдвига фаз и действующим значениям токов фазных обмоток статора.

К л ю ч е в ы е с л о в а: асинхронный двигатель, диагностический параметр, обрыв, межвитковое замыкание

Постановка проблемы. Высокая повреждаемость асинхронных двигателей (АД) является причиной значительных убытков. На долю АД приходится 25...30 % общего числа повреждений электрооборудования [1], а ущерб от их повреждений в Украине составляет 1...1,5 млрд. грн. в год [2].

Своевременное выявление неисправностей статорных обмоток позволяет не допустить более серьезного повреждения АД, уменьшить время восстановления, сократить затраты на обслуживание и потери от внеплановых простоев, повысить эффективность работы производственных машин. Так, в странах ЕС удельные затраты на техобслуживание АД составляют \$18 на лошадиную силу – при работе до выхода из строя, \$13 – при обслуживании по регламенту и \$9 – при обслуживании по текущему состоянию [3]. Таким образом, использование систем диагностирования экономически оправдано.

Анализ публикаций. В настоящее время существует множество подходов к построению систем технического диагностирования неисправностей АД. Значительное количество диагностических систем использует данные о мгновенных значениях силы тока статора. Анализ процессов, происходящих в АД [4-6] показал, что одним из возможных вариантов обнаружения неисправностей обмотки может являться контроль симметрии фазных токов по их силе и начальной фазе. В случае обрыва фазы сдвиг токов исправных обмоток по начальной фазе составляет 180°. Известен ряд устройств [7, 8], использование которых позволяет выявить аварийный режим и с высоким быстродействием отключить АД от сети.

Следует отметить, что обрывы параллельных ветвей обмоток статора и их межвитковые замыкания более сложны в обнаружении, и вопрос разработки методов и средств их раннего выявления является актуальным.

Цель статьи. Разработка метода диагностирования обрывов и межвитковых замыканий в статорных обмотках АД, позволяющего своевременно выявлять неисправности в процессе эксплуатации.

Результаты исследований. Появление обрывов параллельных ветвей обмотки статора сопровождается несимметрией тока фазных обмоток. При этом контроль удобно осуществлять не только по его силе, но и по углам сдвига фаз между токами фазных обмоток. В качестве примера в таблице 1 приведены углы сдвига фаз $\Delta\Psi$ между этими токами при обрыве одной из двух параллельных ветвей обмотки статора в зависимости от кратности развиваемого момента, которую можно представить в виде функции $\hat{y}_j = b_{0j} + b_{1j}X$. Коэффициенты b_{0j} , b_{1j} вычислены по методу наименьших квадратов и представлены в таблице 2.

Таблица 1

$\frac{M}{M_H}$	$\Delta\Psi_{AB}$	$\Delta\Psi_{BC}$	$\Delta\Psi_{CA}$
X	Y_1	Y_2	Y_3
0	109,4	111,9	136,7
0,5	111,7	112,1	137,3
0,66	109,3	110,8	138,2
0,85	110,7	111,5	137,8
0,87	110,9	110,8	138,3

Таблица 2

Параметр	\bar{Y}	S_j	τ	$\left \frac{CAO_j - 0,7979}{S_{Y_j}} \right $	b_{0j}	b_{1j}	$\varepsilon, \%$
$\Delta\Psi_{AB}$	110,40	0,921	1,40	0,114	109,7	1,21	0,56
$\Delta\Psi_{BC}$	111,42	0,542	1,25	0,117	112,0	-1,07	0,35
$\Delta\Psi_{CA}$	138,88	0,595	1,61	0,089	136,7	0,14	0,16

Малые значения коэффициентов регрессии b_{1j} говорят о незначительном наклоне линейных зависимостей $\Delta\Psi_j(M)$ относительно оси моментов (рисунок 1): с возрастанием момента от 0 до M_H максимальное изменение угла сдвига фаз составляет $1,21^\circ$ (максимальное отклонение от нормального угла сдвига фаз в 120° в результате возникновения неисправности составляет 17°).

Углы сдвига между токами фазных обмоток при межвитковых замыканиях зависят как от нагрузки на валу, так и от количества короткозамкнутых витков. В качестве примера на рисунке 2 показаны диаграммы рассеяния и регрессионные кривые, отражающие зависимость угла сдвига фаз

токов фазных обмоток от количества замкнутых витков n при фиксированном моменте. На рисунке 3 изображены аналогичные данные для режима работы АД с межвитковым замыканием при различных моментах сопро- тивления.

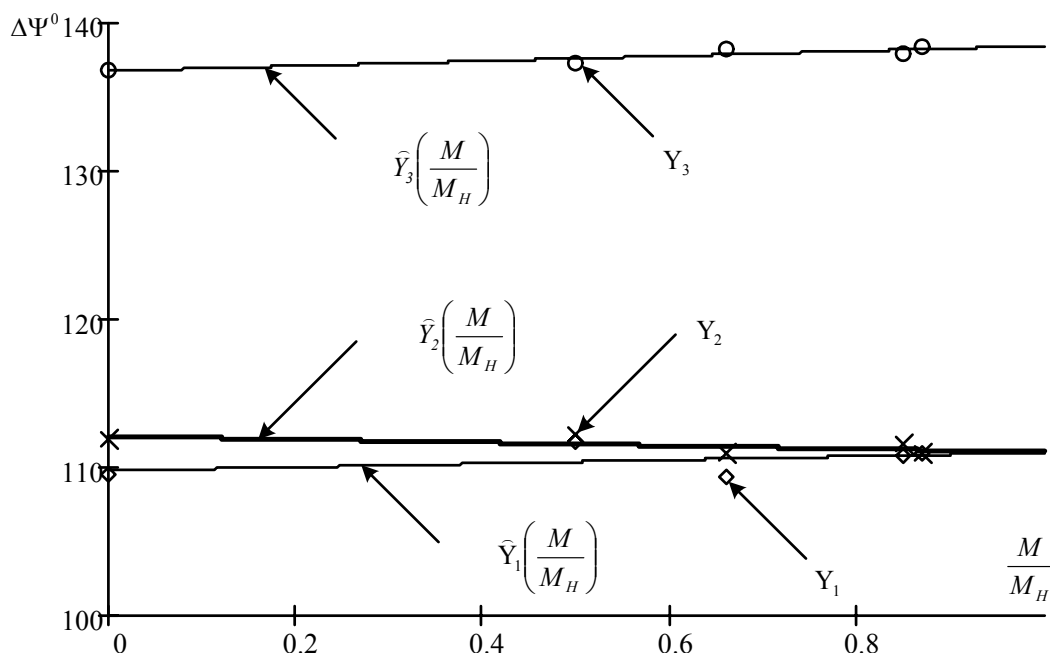


Рисунок 1 – Диаграммы рассеяния и графики регрессионных зависимостей угла сдвига фаз токов от нагрузки

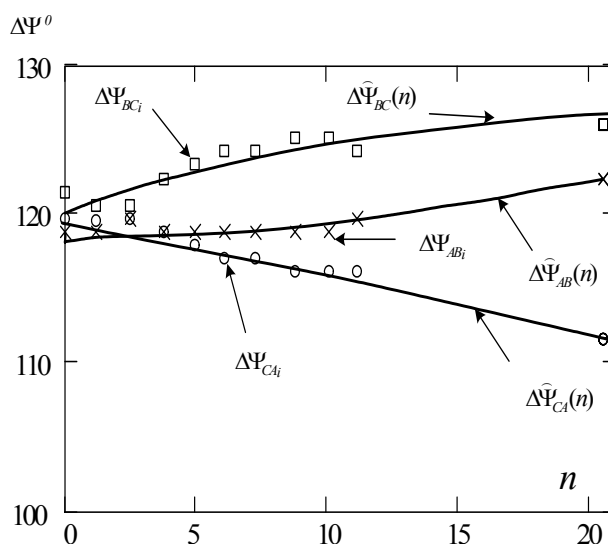


Рисунок 2 – Диаграмма рассеяния и графики регрессионных зависимостей угла сдвига фаз токов от количества замкнутых витков при постоянной нагрузке

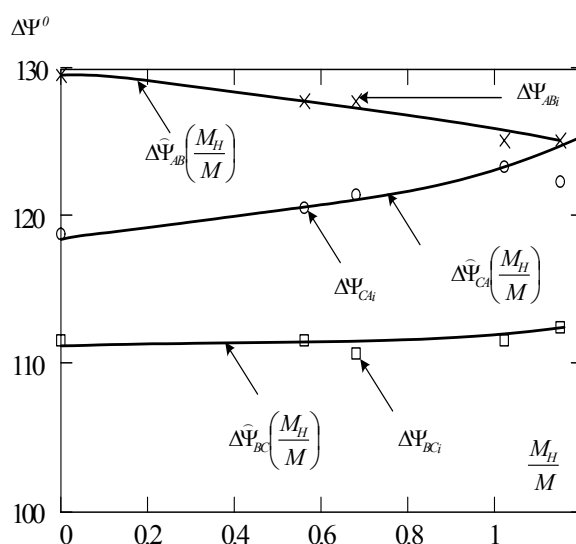


Рисунок 3 – Диаграммы рассеяния углов сдвига фаз и графики регрессионных зависимостей токов от нагрузки при постоянном количестве замкнутых витков

Из анализа рисунков 2 и 3 следует, что с увеличением количества замкнутых витков углы сдвига фаз токов увеличиваются. Значение $\frac{M}{M_H}$ также оказывает влияние на углы сдвига фаз токов и с увеличением нагрузки несимметрия уменьшается.

С целью определения влияния независимых переменных на диагностические параметры проведен регрессионный анализ результатов исследования. В качестве независимых переменных приняты средняя относительная сила тока статора (X_1) и относительное количество короткозамкнутых витков (X_2). Функция цели при использовании кодированных факторов представлена в виде $Y_j = 120 + a_1 X_2^2 + a_2 X_1 X_2 + a_3 X_2$, где $j = 1, 2, 3$ – индекс зависимой переменной Y_j , т.е. $\Delta\Psi_{AB}$, $\Delta\Psi_{BC}$, $\Delta\Psi_{CA}$. В качестве исходных данных приняты результаты экспериментальных и теоретических исследований [4-6].

В таблице 3 даны результаты регрессионного анализа (с использованием программы Statistica) зависимости угла сдвига фаз между токами i_A , i_C от относительного количества замкнутых витков $n_{зам}/n$ и относительной средней силы тока фазных обмоток $(I_A + I_B + I_C)/3I_H$, где $n_{зам}$ и n – количество замкнутых витков и общее количество витков обмотки. Из таблицы 3 следует, что все коэффициенты регрессии являются значимыми при пятипроцентном уровне (количество наблюдений - 26).

Таблица 3

Параметры выборки				
Переменная	Минимальное значение	Среднее значение	Максимальное значение	Стандартное отклонение
X_1	0,3	0,8046	1,1	0,2047
X_2	0	0,023	0,065	0,02681
Y_1	103,7	116,31	120,6	4,7837
Параметры уравнений регрессии				
Параметр	Значение	Стандартная ошибка	t	P
a_1	-326,448	20,26	16,114	0,000006
a_2	-197,884	23,33	13,098	0,000000
a_3	199,72	13,87	14,406	0,000001
R^2	0,9915			

С учетом данных таблицы 3 регрессионная зависимость для угла сдвига фаз между токами обмоток фаз А и В имеет вид:

$$\hat{Y}_1 = 120 - 182,51 \cdot X_2 - 2173,96 \cdot X_2^2 + 106,88 \cdot X_1 \cdot X_2. \quad (1)$$

Аналогичным путем получены регрессионные зависимости между токами обмоток фаз В и С, А и С:

$$\hat{Y}_2 = 120 + 508,96 \cdot X_2 - 1976,08 \cdot X_2^2 - 306,67 \cdot X_1 \cdot X_2; \quad (2)$$

$$\hat{Y}_3 = 120 - 326,45 \cdot X_2 - 197,88 \cdot X_2^2 + 199,78 \cdot X_1 \cdot X_2. \quad (3)$$

В качестве примера на рисунке 4 приведен график регрессионной зависимости для переменной \hat{Y}_2 по (2).

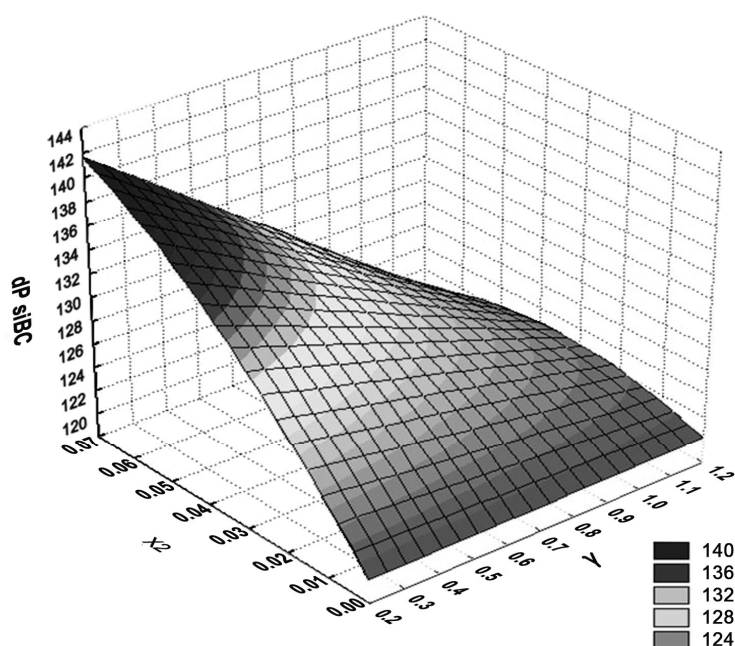


Рисунок 4 – График функции

$\hat{Y}_2 = 120 + 508,96 \cdot X_2 - 1976,08 \cdot X_2^2 - 306,67 \cdot X_1 \cdot X_2$, зависимости сдвига фаз $\Delta\Psi_{BC}$ от относительной силы тока фазы и числа замкнутых витков

Следует отметить, что изменение диагностического показателя может быть вызвано как неисправностью АД, так и несимметрией питающего напряжения. С целью уменьшения количества ложных срабатываний системы диагностирования необходимо предусмотреть устройство обнаружения аномального режима работы АД в условиях возможной несимметрии сети.

Согласно результатам исследования особенностей работы АД при обрывах и межвитковых замыканиях в статорных обмотках предлагается следующий метод диагностирования:

а) обнаружение аномального режима работы АД путем контроля разности напряжения между нулевой точкой АД и искусственной нейтралью сети. Превышение напряжением порогового значения служит сигналом к началу диагностирования;

б) признаками обрыва фазы являются отсутствие тока в одной из фаз, токи остальных фаз имеют сдвиг по фазе в 180° ;

в) признаком обрыва параллельных ветвей обмотки является сдвиг по фазе токов обмоток в соответствии с таблицей 2;

г) выявление межвитковых замыканий осуществляется путем контроля действующих значений и сдвигов по фазе токов обмоток в соответствии

с уравнениями (1)-(3).

Диагностирование неисправностей статорных обмоток АД должно выполняться в процессе его эксплуатации автоматически с помощью микроконтроллера. В случае необходимости система может быть дополнена контроллером и беспроводным приемопередатчиком для связи с устройствами высшего уровня.

Требования к точности системы диагностирования определяются допустимым минимальным отклонением диагностического параметра, вызванным выявляемой неисправностью. На основании анализа результатов исследований суммарная погрешность измерительного канала и погрешность вычисления диагностического параметра не должны превышать одного процента. Отклонение угла сдвига фаз от 120° при замыкании трех витков и номинальной нагрузке составляет 1,87 гр.эл. (1,57 %). Для обеспечения требуемой точности системы необходимо принять следующие меры:

а) с целью снижения влияния помех на измерительный канал необходимо обеспечить экранирование проводников и использовать датчики с токовым выходом;

б) датчики силы тока и напряжения должны обладать погрешностью не более 0,5%;

в) для точного определения разницы угла фаз между токами обмоток необходимо осуществить выделение основных гармонических составляющих (фильтрацию) сигналов напряжений и токов;

г) необходимо обеспечить синхронность сбора информации об углах сдвига фазных токов, поскольку поочередный ввод информации об их мгновенных значениях приводит к увеличению погрешности измерений;

д) погрешность в определении разницы углов сдвига фаз в 0,5 гр.эл. (0,42%) может быть обеспечена при тактовой частоте не менее 12 кГц;

е) расчет углов сдвига фаз токов и действующих значений напряжения и силы тока должен выполняться на протяжении десяти периодов, а диагностирование проводиться по средним значениям.

Выводы:

1. С использованием результатов исследования асимметричных режимов работы АД, вызванных неисправностями обмоток статора, получены зависимости углов сдвига фаз между токами фазных обмоток при обрыве одной из двух параллельных ветвей обмотки от момента на его валу, а также зависимости, позволяющие определить углы сдвига фаз между токами от количества замкнутых витков и действующих значений тока при межвитковом замыкании в установившемся режиме работы АД.

2. Предложен метод диагностирования статорных обмоток АД на основе контроля действующих значений и угла сдвига фаз между токами фазных обмоток, отличающийся от известных тем, что в качестве признака асимметричного режима работы используется пороговое значение напряжения между нулевой точкой статорных обмоток АД и искусственно соз-

данной нулевой точкой напряжения, а определение вида неисправности выполняется по действующим значениям и углам сдвига фаз токов.

3. Выполнена оценка требований к точности системы диагностирования, использующей предложенный метод.

Список литературы

1. Родькин Д.И. К определению послеремонтной работоспособности асинхронных двигателей / Д.И.Родькин, А.П.Черный // Вісник Кременчуцького Державного політехнічного Університету.-Кременчук:КДПУ, 2001.- №2.- С.40- 47.

2. Черный А.П. Применение показателей качества преобразования электроэнергии для оценки состояния и надежности электромеханических систем / А.П. Черный, А.П. Калинов, Д. Г. Мамчур // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика.-Днепропетровск:ДГТУ,2006.-С. 245.

3. Барков А.В. Сервис технологических машин. Технология обслуживания по фактическому состоянию. [Электронный ресурс] / А.В. Барков, П.П. Якобсон. – Название с заголовка страницы. – Режим доступа к ресурсу: <http://vdmk.com/information/tofs.htm>.

4. Федоров М.М. Режимы работы асинхронных электродвигателей при неисправностях обмотки статора / М.М.Федоров, О.И.Толочко, А.А.Ткаченко // Взрывозащищенное электрооборудование: сб.науч.тр. УкрНИИВЭ.-Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2006. – С. 320 – 325.

5. Федоров М. М. Особенности электромеханических и тепловых процессов в асинхронных электродвигателях при аномальных режимах работы / М. М. Федоров, А. А. Ткаченко // Научные труды Донецкого национального технического университета.- Донецк: ДонНТУ, 2006.-№112.-С.29–32.

6. Математическое моделирование асинхронных электродвигателей в несимметричных режимах работы / Е.А.Вареник, М.М.Федоров, О.И.Толочко [и др.] // Вестник НТУ «ХПИ»: сб. науч. тр. Вып. 24: Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов.-Х., 2007.-С.27-34.

7. А.с. 1124850 РФ, МПК H02H7/08. Устройство для защиты трехфазной электроустановки от работы на двух фазах и обратного чередования фаз / Э.Г.Бут. – № 3566753/07; заявл. 16.12.1982; опубл. 20.08.05. Бюл. № 23.

8. А.с. 2110877 РФ, МПК H02H7/09. Устройство для быстросействующей защиты трехфазных асинхронных электродвигателей от пропадания фазы питающей сети / Е.М. Лысенко, И.Н. Овчаренко, Н.И. Овчаренко. – № 92015343/09; заявл. 29.12.92; опубл. 10.05.98. Бюл. № 23.