

## КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИВодОВ ПОРШНЕВЫХ МАШИН ПО ПАРАМЕТРАМ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

Докт. техн. наук, проф. РУСАН В. И.

*РУП «БелНИИагроэнерго»*

Инж. СЕРКОВ А. В.

*РУП «Могилевэнерго»*

В условиях эксплуатации различные неисправности асинхронных электродвигателей становятся причиной нарушений ответственных технологических процессов. Известно, что явными признаками неисправностей являются высокий уровень шума, вибрации, несимметрии токов в фазах, неравномерный нагрев обмотки статора. Однако проявление этих признаков имеет место при достаточно большой степени повреждения, в период окончательного выхода двигателя из строя. На начальных же стадиях развития дефекты могут не проявляться.

Эффективные способы определения неисправности на ранней стадии позволят своевременно вывести двигатель в ремонт, предотвратить развитие повреждения и внезапный останов технологического оборудования. Немногочисленные методы и средства контроля и диагностики асинхронных двигателей оказываются малоэффективными на работающих машинах и не могут предупреждать о неисправностях (дефектах), а также служить основанием для вывода электродвигателя в ремонт [1].

Главная сложность создания методов и средств контроля технического состояния асинхронного двигателя в рабочем режиме заключается в определении специальных информационных параметров, однозначно характеризующих техническое состояние электродвигателей с учетом изменения параметров нагрузки и качества электроснабжения в процессе эксплуатации.

Поэтому целесообразно создание методов контроля для электродвигателей приводов конкретных групп машин и механизмов при характерных особенностях режима работы. Интерес с точки зрения диагностики представляют электродвигатели приводов с периодически пульсирующей нагрузкой. Можно обоснованно предположить, что данная нагрузка дает возможность эффективно определять наличие развивающихся дефектов двигателя в процессе его работы с помощью диагностических параметров.

В настоящее время эксплуатируется большое количество поршневых машин, главным образом поршневых компрессоров и насосов, обуславливающих периодически пульсирующую нагрузку.

Поршневые машины имеют периодически пульсирующий момент нагрузки, который в первом приближении можно представить в виде [2]

$$M_c = M_{cp} + M_a \sin \Omega t, \quad (1)$$

где  $M_{cp}$  – постоянная составляющая момента нагрузки;  $M_a$  – амплитуда переменной составляющей момента нагрузки;  $\Omega$  – частота пульсаций момента.

Изменение момента нагрузки вызывает соответственно изменение частоты вращения вала приводного электродвигателя

$$\omega = \omega_{cp} + \omega_a \sin(\Omega t - \psi), \quad (2)$$

где  $\omega_{cp}$  – постоянная составляющая частоты вращения;  $\omega_a$  – амплитуда переменной составляющей частоты вращения;  $\psi$  – фазовый сдвиг между колебаниями момента нагрузки и частоты вращения вала электродвигателя.

На рис. 1 показаны статическая и динамическая механические характеристики асинхронного электродвигателя и временные диаграммы, соответствующие (1) и (2). Механическая инерция вызывает уменьшение амплитуды и фазовый сдвиг момента электродвигателя  $M_{дв}$  от момента нагрузки  $M_c$ , а электромагнитная – отклонение динамической характеристики от статической.

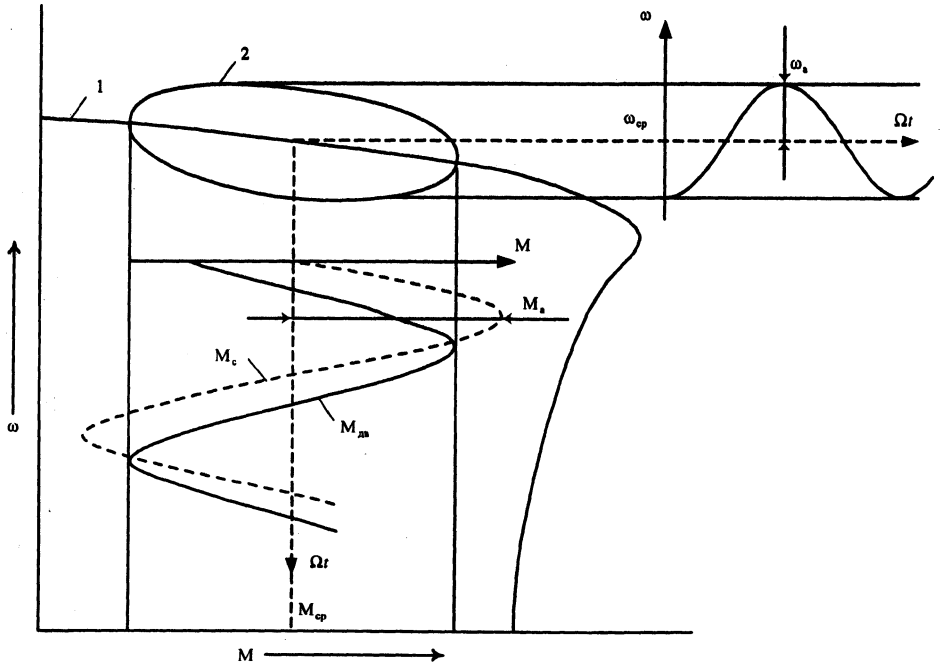


Рис. 1. Механические характеристики асинхронного электродвигателя (1 – статическая; 2 – динамическая) и временные диаграммы частоты вращения и момента

Можно показать, что для рабочего участка механических характеристик асинхронных электродвигателей [3]:

$$\omega_0 - \omega_{cp} = \frac{M_{cp}}{\beta} \quad (3)$$

и [4]

$$\omega_a = \frac{M_a}{\beta} \sqrt{\frac{T_3^2 \Omega^2 + 1}{(1 - T_3 T_m \Omega^2)^2 + T_m^2 \Omega^2}}, \quad (4)$$

где  $\omega_0$  – синхронная частота вращения;  $\beta$  – жесткость статической характеристики;  $T_3$  – электромагнитная постоянная времени;  $T_m$  – электро механическая постоянная времени.

Примем обоснованные допущения, что в процессе работы частота пульсаций момента нагрузки и частота питающей сети не меняются, т. е.  $\Omega = \text{const}$ ;  $\omega_0 = \text{const}$ . Также примем, что подкоренное выражение (4) практически не зависит от параметров питающей сети.

Тогда запишем (4)

$$\omega_a = \frac{M_a}{\beta} f(T_3, T_m), \quad (5)$$

где  $f$  – некоторая функция для конкретного типоразмера электродвигателя, зависящая только от его технического состояния.

Очевидно, что показатель  $\omega_a$  является обобщенным диагностическим параметром. Однако значительное влияние на него оказывает также изменение величин  $M_a$  и  $\beta$ , последняя же зависит от качества электроснабжения (при симметричном и синусоидальном напряжении она прямо пропорциональна квадрату действующего напряжения).

Разделив (5) на (3), получим коэффициент пульсаций частоты вращения

$$K_\omega = \frac{\omega_a}{\omega_0 - \omega_{cp}} = k_m f(T_3, T_m), \quad (6)$$

где  $k_m = M_a/M_{cp}$  – коэффициент пульсаций момента нагрузки.

Можно показать [5, 6], что для поршневых машин, имеющих кривошипно-шатунный механизм, для заданного режима работы при изменении свойств рабочей среды и технического состояния цилиндра-поршневой группы  $k_m = \text{const}$ .

Таким образом, как и параметр  $\omega_a$ , коэффициент пульсаций частоты вращения  $K_\omega$  является обобщенным диагностическим параметром, однако он не зависит от параметров нагрузки и питающей сети, а его значение для конкретного типоразмера двигателя определяется только техническим состоянием.

Для экспериментального подтверждения изложенных положений и получения данных, характеризующих влияние неисправностей на параметры частоты вращения при периодически пульсирующей нагрузке, была использована методика, сущность которой заключается в том, что, создавая неисправность искусственно, определяем и анализируем изменение параметров частоты вращения двигателя.

Множество различных статистических исследований, например [7–9], показывают, что распределение причин отказов асинхронных электродвигателей выглядит следующим образом:

межвитковое замыкание обмотки статора (МВЗ) – 80...90 %;

межфазное замыкание обмотки статора (МФЗ) – 3...7 %;  
 механический дефект главным образом подшипникового узла (МД) – 5...12 %.

Остальные причины отказов встречаются редко:

пробой корпусной изоляции – 1...2 %;

разрыв стержней ротора, повреждение активной стали, распайка выводных концов – менее 0,5 %.

Очевидно, что наиболее тщательного анализа и изучения требует исследование влияния на параметры частоты вращения МВЗ, МФЗ, МД.

Экспериментальные исследования проводились на базе асинхронного двигателя 4А100S4 (мощность – 3 кВт;  $\omega_0 = 157 \text{ c}^{-1}$ ). При этом использовался специализированный стенд, блок-схема которого приведена на рис. 2. Нагрузочное устройство (НУ) аналогично [3] выполнено на базе электромагнитного порошкового тормоза ПТ-40М, позволяющего нагружать дви-

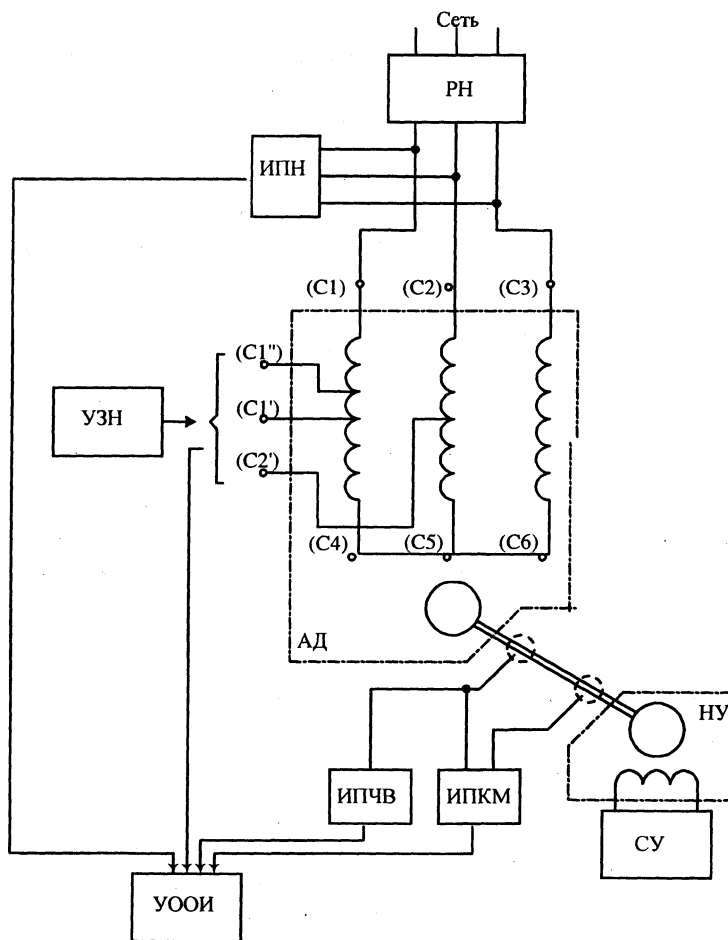


Рис. 2. Блок-схема стенда для проведения экспериментальных исследований: РН – регулятор напряжения; ИПН – измерительный преобразователь напряжения; УЗН – устройство задания неисправности; АД – асинхронный двигатель; НУ – нагрузочное устройство; СУ – система управления; ИПЧВ – измерительный преобразователь частоты вращения; ИПКМ – измерительный преобразователь крутящего момента; УООИ – устройство отображения и обработки информации (каждый виток обмотки АД условно обозначает катушечную группу)

гатели мощностью до 10 кВт и обеспечивать частоту пульсаций нагрузки до  $100 \text{ с}^{-1}$ . Система управления (СУ) обеспечивает задание параметров периодически пульсирующей нагрузки. Измерительные преобразователи частоты вращения (ИПЧВ) и крутящего момента (ИПКМ) выполнены на базе индукционных датчиков с использованием частотного метода измерения [10], регулятор напряжения (РН) – на базе автотрансформатора с регулируемым вторичным напряжением. Измерительный преобразователь напряжения (ИПН) представляет собой стандартный цифровой вольтметр и анализатор несимметрии. Устройство отображения и обработки информации (УООИ) – совокупность регистрирующих и показывающих приборов, обеспечивающих представление информации о напряжении  $U$  фаз двигателя, коэффициенте несимметрии напряжения  $\alpha$ , параметрах нагрузки  $M_a$ ,  $M_{ср}$ ,  $k_m$  и частоты вращения  $\omega_0 - \omega_{ср}$ ,  $\omega_a$ ,  $K_\omega$ , значении тока в короткозамкнутом (КЗ) контуре  $i_{кз}$ , радиальном зазоре подшипника  $\delta$ .

Для искусственного формирования неисправностей в обмотке двигателя из лобовой части статора в клеммную коробку проведены дополнительные выводы от межкатушечных соединений фаз ( $C1'$ ), ( $C1''$ ), ( $C2'$ ). МВЗ имитируется замыканием через регулируемое сопротивление УЗН выводов ( $C1'$ ) и ( $C1''$ ), а МФЗ – выводов ( $C1'$ ) и ( $C2'$ ). При этом измеряется ток в КЗ контуре. Имитация переходного сопротивления замыканием через регулируемое активное сопротивление позволяет менять величину тока в КЗ контуре и получать различные степени неисправностей\*. Можно допустить, что в действительности так и происходит. Первоначально, из-за сравнительно большого значения переходного сопротивления в месте замыкания, ток в КЗ контуре мал. Однако по мере разрушения переходного сопротивления он постепенно увеличивается, и в конечном итоге происходит отказ двигателя.

Также следует отметить, что дополнительные выводы сделаны из лобовой части обмотки статора со стороны вала. Эта часть – наиболее напряженная в тепловом отношении [11]. Соответственно здесь изоляция наиболее подвержена дефектам.

Для имитации МД нарушаем соосность валов АД и НУ путем смещения места крепления лап двигателя, в результате чего увеличивается радиальный зазор  $\delta$  – основной параметр, характеризующий техническое состояние подшипников. После смещения измеряем зазор с помощью прибора КИ-6178 без разборки двигателя. Способ измерения основан на использовании участков статора с обмоткой в качестве электромагнита, притягивающего ротор в радиальных направлениях, и определении перемещения вала ротора в непосредственной близости от подшипников с помощью датчика линейного перемещения. При этом для создания электромагнитной силы поочередно используются пары выводов ( $C1$ ), ( $C1'$ ) и ( $C1'$ ), ( $C4$ ).

Измерение величин проводилось с допустимыми погрешностями не более:  $\omega_a - 0,1 \%$ ;  $\omega_0 - \omega_{ср}$ ,  $K_\omega - 15 \%$ ;  $k_m - 4,5 \%$ ;  $U$ ,  $\alpha - 0,5 \%$ ;  $i_{кз} - 0,5 \%$ ;  $\delta - 1 \%$ .  $\Omega$  воспроизводится с ошибкой не более  $1 \%$ .

\* Идея имитации переходного сопротивления изоляции обмотки статора заимствована у М. А. Гашимова.

Большая погрешность измерения  $\omega_0 - \omega_{cp}$  (и, следовательно,  $K_\omega$ ) обусловлена тем, что измеряется разность двух примерно одинаковых величин.

Далее проводим оценку влияния параметров сети и нагрузки, МФЗ, МВЗ и МД на параметры частоты вращения. При оценке влияния неисправностей производим следующие расчеты.

Относительную чувствительность  $S_0$  параметра частоты вращения  $\bar{\omega}$  определяем по формуле

$$S_0 = \frac{d\bar{\omega}/\bar{\omega}}{d\rho/\rho}, \quad (7)$$

где  $\rho$  – показатель, характеризующий степень неисправности.

Затем подбираем аппроксимирующую функцию в виде полинома степени  $n$

$$\bar{\omega}(\rho, a_i) = \sum_{i=0}^n a_i \rho^i = a_0 + a_1 \rho + a_2 \rho^2 + \dots + a_n \rho^n, \quad (8)$$

где постоянные коэффициенты  $a_i$  находятся вычислениями по методу наименьших квадратов на основании экспериментальных данных.

После этого проверяем адекватность моделирования процесса аппроксимирующей функции по критерию Фишера [7, 12]

$$F = \frac{\sigma_{ал}^2}{\sigma_{изм}^2}. \quad (9)$$

Здесь  $\sigma_{ал}^2$  – квадрат среднеквадратичного отклонения экспериментальных значений от величин, полученных по аналитической зависимости;  $\sigma_{изм}^2$  – квадрат среднеквадратичной погрешности измерения величины  $\bar{\omega}$ .

Задаваясь уровнем значимости (в технических системах обычно берут 0,05), для используемой методики эксперимента имеем табличное значение критерия Фишера  $F_{табл} = 2,60$ . Если оно больше вычисленного по (9), то полученная аппроксимирующая функция адекватна результатам эксперимента.

На рис. 3 показаны зависимости параметров частоты вращения от параметров нагрузки и питающей сети.

При исследовании влияния  $k_m$  устанавливалось постоянное значение  $M_{cp} = 13,3 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , а параметр  $M_a$  варьировался от 1,3 до 13,3  $\text{Н} \cdot \text{м}$  при  $\Omega = 24 \text{ с}^{-1}$ . Соответственно  $k_m$  варьировался от 0,1 до 1,0. Тенденция изменения параметров частоты вращения при других  $\Omega$  аналогична.

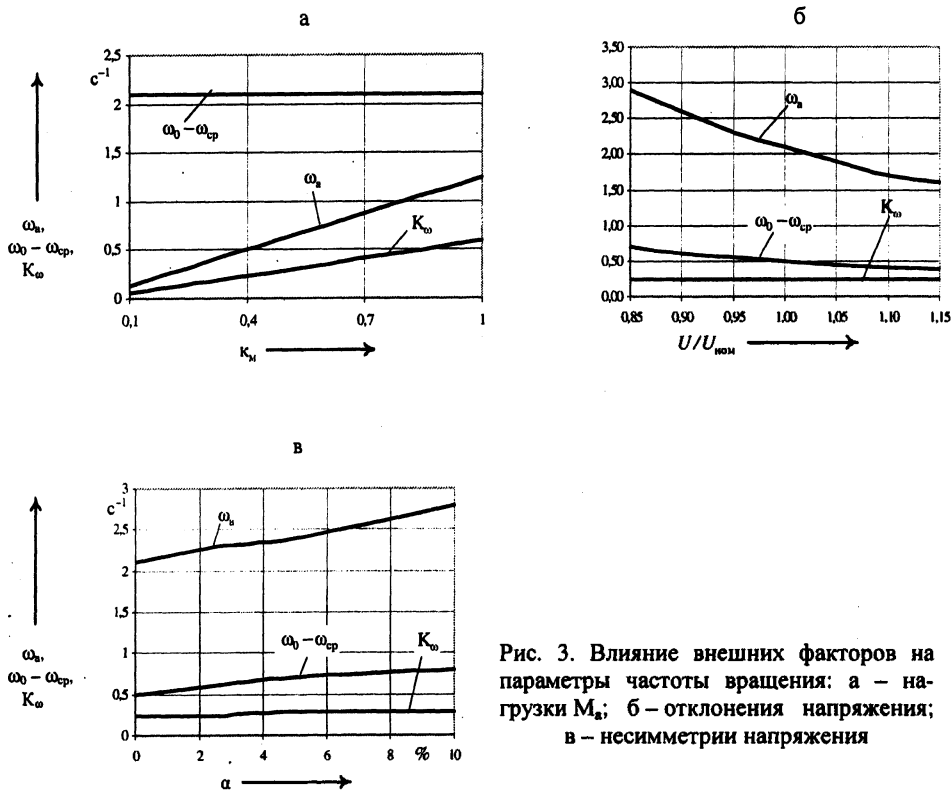


Рис. 3. Влияние внешних факторов на параметры частоты вращения: а – нагрузки  $M_a$ ; б – отклонения напряжения; в – несимметрии напряжения

При исследовании влияния качества электроснабжения устанавливались:  $\Omega = 24 \text{ c}^{-1}$ ;  $\kappa_M = 0,4$ . Из рис. 3б, в видно, что на  $\omega_a$  и  $\omega_0 - \omega_{cp}$  значительное влияние оказывает качество электроснабжения. Параметр  $K_{\omega}$  в пределах нормативных показателей питающей сети ( $0,95 \leq U/U_{ном} \leq 1,10$ ;  $\alpha \leq 2 \%$ ) не меняется, а при выходе их за пределы изменяется незначительно. Тенденция изменения параметров частоты вращения при других  $\Omega$  и  $\kappa_M$  аналогична.

Ниже приводятся экспериментальные данные, характеризующие изменение параметров частоты вращения при основных неисправностях: МФЗ (табл. 1), МВЗ (табл. 2) и МД (табл. 3).

Анализ результатов данного исследования показывает, что наиболее чувствителен к повреждениям  $\omega_a$ . Параметр  $K_{\omega}$  на 6...12% менее чувствителен, однако по указанным выше причинам его целесообразнее использовать в качестве диагностического.

Из экспериментальных данных нетрудно установить, что параметры частоты вращения изменяются в функции степени задаваемых неисправностей. Очевидно, что адекватность линейной зависимости от степени неисправности для  $\omega_0 - \omega_{cp}$  и  $K_{\omega}$  во многом обусловлена относительно большой погрешностью их измерения. Полученные экспериментальные зависимости для  $\omega_a$  не вполне адекватны, а являются лишь первым приближением для существующей погрешности измерения.

Влияние межфазного замыкания

Режим неисправности	Параметры частоты вращения		
	$\omega_0 - \omega_{cp}, c^{-1}$	$\omega_a, c^{-1}$	$K_{\omega}, c^{-1}$
Неисправность отсутствует ( $i_{кз} = 0 A$ )	2,1	0,5 / 0,6	0,24/0,29
Неисправность задана; $i_{кз} = \dots$			
1A	2,5	1,1 / 1,3	0,44 / 0,52
5A	4,0	3,3 / 3,5	0,83 / 0,88
10A	5,1	7,3 / 7,5	1,43 / 1,47
$S_0$	0,50	0,93/0,92	0,87/0,81
Аппроксимирующее уравнение	$0,30i_{кз} + 2,19$	$0,67i_{кз} + 0,35 /$ $0,68i_{кз} + 0,50$	$0,12i_{кз} + 0,28 /$ $0,11i_{кз} + 0,34$
$\sigma_{ад}^2$	0,037	0,084 / 0,073	0,007 / 0,002
$\sigma_{изм}^2$	0,0225	0,003	0,0225
F	1,61	28,0 / 24,3	0,31 / 0,07

Примечания. 1. Для  $\omega_a$  и  $K_{\omega}$  в числителе приведены данные при  $\Omega = 24 c^{-1}$ , в знаменателе – при  $\Omega = 48 c^{-1}$ . 2. Результаты экспериментов соответствуют  $k_m = 0,4$  и суммарному моменту инерции, равному тройному моменту инерции двигателя. 3. Значения  $\omega_0 - \omega_{cp}$  и  $\omega_a$  соответствуют номинальным показателям сети.

Таблица 2

Влияние межвиткового замыкания

Режим неисправности	Параметры частоты вращения		
	$\omega_0 - \omega_{cp}, c^{-1}$	$\omega_a, c^{-1}$	$K_{\omega}, c^{-1}$
Неисправность отсутст- вует ( $i_{кз} = 0 A$ )	2,1	0,5 / 0,6	0,24 / 0,29
Неисправность задана; $i_{кз} = \dots$			
1A	2,3	0,8 / 0,9	0,35 / 0,39
5A	2,8	3,1 / 3,3	1,11 / 1,18
10A	3,2	5,0 / 5,3	1,56 / 1,66
$S_0$	0,34	0,90/0,83	0,83/0,83
Аппроксимирующее уравнение	$0,11i_{кз} + 2,17$	$0,46i_{кз} + 0,50 /$ $0,48i_{кз} + 0,59$	$0,14i_{кз} + 0,27 /$ $0,14i_{кз} + 0,31$
$\sigma_{ад}^2$	0,0055	0,0418 / 0,0802	0,0362 / 0,0118
$\sigma_{изм}^2$	0,0225	0,003	0,0225
F	0,24	13,93 / 0,027	1,61 / 0,52

Примечания. 1. Для  $\omega_a$  и  $K_{\omega}$  в числителе приведены данные при  $\Omega = 24 c^{-1}$ , в знаменателе – при  $\Omega = 48 c^{-1}$ . 2. Результаты экспериментов соответствуют  $k_m = 0,4$  и суммарному моменту инерции, равному тройному моменту инерции двигателя. 3. Значения  $\omega_0 - \omega_{cp}$  и  $\omega_a$  соответствуют номинальным показателям сети.



## Влияние механического дефекта

Режим неисправности	Параметры частоты вращения		
	$\omega_0 - \omega_{cp}, c^{-1}$	$\omega_a, c^{-1}$	$K_{\omega}, c^{-1}$
Неисправность отсутствует ( $\delta = 0,01$ мм)	2,1	0,5 / 0,6	0,24 / 0,29
Неисправность задана; $\delta = \dots$			
0,03 мм	2,2	0,6 / 0,8	0,29 / 0,36
0,05 мм	2,4	0,8 / 1,0	0,32 / 0,42
0,10 мм	2,8	1,3 / 1,6	0,46 / 0,57
$S_0$	0,28	0,68 / 0,69	0,53 / 0,49
Аппроксимирующее уравнение	$7,66\delta + 1,94$	$8,66\delta + 0,30 / 10,76\delta + 0,38$	$2,47\delta + 0,19 / 3,09\delta + 0,23$
$\sigma_{ад}^2$	0,0072	0,015 / 0,0178	0,0006 / 0,0043
$\sigma_{изм}^2$	0,0225	0,003	0,0225
F	0,32	5,00 / 5,93	0,03 / 0,19

*Примечания.* 1. Для  $\omega_a$  и  $K_{\omega}$  в числителе приведены данные при  $\Omega = 24 c^{-1}$ , в знаменателе – при  $\Omega = 48 c^{-1}$ . 2. Результаты экспериментов соответствуют  $k_m = 0,4$  и суммарному моменту инерции, равному тройному моменту инерции двигателя. 3. Значения  $\omega_0 - \omega_{cp}$  и  $\omega_a$  соответствуют номинальным показателям сети.

При других видах повреждений (пробое корпусной изоляции при наличии заземления или зануления) изменения параметров частоты вращения имеют подобный характер.

Для раннего выявления неисправности необходимо знать предельные значения диагностического параметра при соответствующих режимах работы. Непосредственное измерение рекомендуемого диагностического параметра  $K_{\omega}$  в рабочем режиме не представляет значительных трудностей и не требует больших затрат.

Как следует из данных табл. 1...3, по мере усиления степени исследуемой неисправности значение  $K_{\omega}$  увеличивается. Следовательно, превышение диагностическим параметром некоторого предельного значения  $K_{\omega}$  пред может служить предупреждением о возникновении неисправности в двигателе.

Так же можно рассматривать нормативное значение  $K_{\omega \text{ норм}}$ , определяемое на исправном двигателе, прошедшем программу испытаний и установленном на поршневой машине.

Очевидно, что даже для двух различных двигателей одного типоразмера имеются различия как для  $K_{\omega \text{ пред}}$ , так и  $K_{\omega \text{ норм}}$  из-за технологического разброса параметров. Поэтому целесообразно нормировать их разность  $\Delta K_{\omega}$ .

Введем показатель – нормативное отклонение коэффициента пульсаций частоты вращения

$$\Delta K_{\omega \text{ норм}} = K_{c1 \text{ пред}} - K_{\omega \text{ норм}} \quad (10)$$

В момент превышения  $\Delta K_{\omega}$  нормативного значения однозначно в двигателе имеется дефект, и двигатель находится в неисправном, однако работоспособном состоянии, т. е. дефект еще недостаточно развит, чтобы привести к отказу двигателя. В этот момент и целесообразно выводить двигатель в ремонт.

Определим значение  $\Delta K_{\omega \text{ норм}}$  для нашего случая при  $\Omega = 24 \text{ с}^{-1}$ .

Отраслевыми инструкциями установлены следующие предельные показатели для асинхронного двигателя. В частности, для рассматриваемого двигателя 4А100S4 отсутствие МФЗ, МВЗ имеет место при следующих условиях:

сопротивление межфазной изоляции должно быть не менее 0,5 МОм (т. е.  $i_{кз} \leq 0,76 \text{ мА}$ );

сопротивления различных фаз обмотки должны отличаться друг от друга не более чем на 2 % (т. е.  $i_{кз} \leq 0,14 \text{ А}$ );

предельное значение зазора  $\delta = 0,05 \text{ мм}$ .

Этим параметрам соответствует  $K_{\omega \text{ пред}}$ : МФЗ – 0,30  $\text{с}^{-1}$ ; МВЗ – 0,29; МД – 0,32  $\text{с}^{-1}$ . Близость этих величин, а с учетом погрешности измерения и практическая идентичность еще раз доказывают, что между основными функциональными узлами электрической машины существуют тесные электромагнитные и механические связи.

Таким образом, имеем  $\Delta K_{\omega \text{ норм}} = 0,08...0,11 \text{ с}^{-1}$ . Учитывая погрешности измерения и то, что в реальной установке момент нагрузки имеет несколько отличный от (1) характер, целесообразно принять  $\Delta K_{\omega \text{ норм}} = 0,20 \text{ с}^{-1}$ . В момент превышения данного значения двигатель будет однозначно неисправен, но работоспособен.

Введем более универсальный показатель – приведенное нормативное значение отклонения коэффициента пульсаций частоты вращения  $\Delta K'_{\omega \text{ норм}}$  (при  $k_m = 1$ ). Для рассматриваемого случая  $\Delta K'_{\omega \text{ норм}} = 0,50 \text{ с}^{-1}$ . Для любого значения

$$\Delta K'_{\omega \text{ норм}} = \Delta K_{\omega \text{ норм}} k_m. \quad (11)$$

Теперь оценим возможность применения изложенных положений по отношению к другим типоразмерам двигателей и для других суммарных моментов инерции.

Рассмотрим вопрос подобия процессов различных двигателей по методике [12]. Для решения поставленной задачи вполне достаточно установления неполного (электромеханического) подобия. Примем, что для множества различных процессов:  $k_m = \text{idem}$ ;  $\Omega = \text{idem}$ . Тогда (6) можно представить в виде

$$\varphi(K_{\omega}, T_3, T_m) = 0. \quad (12)$$

Методика анализа размерностей позволяет получить выражение для критериев подобия в наиболее общем случае, когда математическое описание процесса неизвестно.

Выберем независимый параметр применительно к системе основных единиц измерения (в нашем случае используется  $T$  – единица измерения времени). Тогда остальные единицы измерения величин:

$$[T_M] = [T]; [K_\omega] = [T]^p; \quad (13)$$

$$[T_3] = [T]$$

Выражение для критериев подобия:

$$\pi_1 = \frac{[K_\omega]}{[T_3]^\gamma}; \pi_2 = \frac{[T_M]}{[T_3]^\gamma}, \quad (14)$$

где  $\gamma$  – показатель степени критерия подобия.

Приравнивая показатели степени в числителе и знаменателе, получим:

$$\pi_1 = \frac{[T]^p}{[T_3]^\gamma} \Rightarrow \gamma = 0;$$

$$\pi_2 = \frac{[T_M]^p}{[T_3]^\gamma} \Rightarrow \gamma = 1.$$

Таким образом, критерии подобия имеют вид:

$$\pi_1 = K_\omega; \pi_2 = \frac{T_M}{T_3}. \quad (15)$$

Их значения являются одинаковыми для любого числа подобных процессов, протекающих в разных системах, сходные параметры для которых пропорциональны.

Запишем критериальное уравнение для нашего случая

$$\pi_1 = \Phi(\pi_2) \quad (16)$$

или

$$K_\omega = \Phi\left(\frac{T_M}{T_3}\right). \quad (17)$$

Зависимый критерий  $\pi_1 = \Phi(\pi_2)$  при соблюдении независимых критериев выполняется автоматически. Следовательно, процессы будут подобны для различных двигателей при выполнении условия

$$\frac{T_m}{T_s} = \text{idem} . \quad (18)$$

Всякое уравнение типа (12), представленное в критериальной форме, будучи разрешено относительно какого-либо критерия подобия, позволяет выразить его как функцию других критериев подобия.

С учетом данных положений исследовалась зависимость  $\Delta K'_{\omega \text{ норм}}$  от соотношения постоянных времени.

На стенде соотношение  $T_m/T_s$  изменялось путем установки инерционных масс на второй (свободный) вал тормоза. Значения  $T_m$  и  $T_s$  вычислялись по формулам [3]:

$$T_m = \frac{J_{\Sigma}}{\beta} ; \beta = \frac{2M_k}{\omega_0 s_k} ; \quad (19)$$

$$T_s = \frac{1}{\omega_0 p_n s_k} , \quad (20)$$

где  $p_n$  – число пар полюсов;  $s_k$  – критический момент;  $M_k$  – критическое скольжение двигателя;  $J_{\Sigma}$  – суммарный момент инерции.

Полученные результаты приведены на рис. 4.

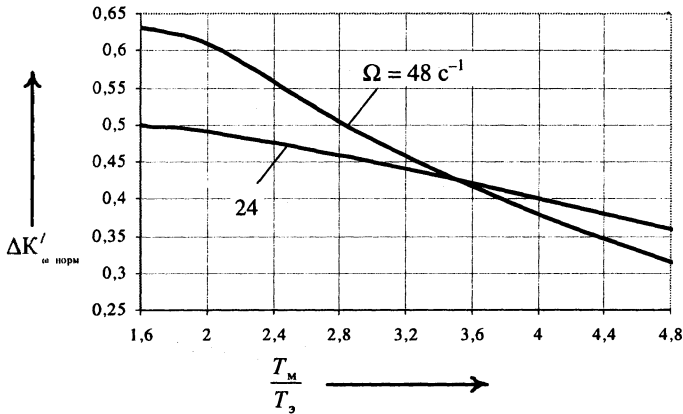


Рис. 4. Приведенные нормативные отклонения коэффициента пульсации частоты вращения

Таким образом, оценив значения  $k_m$  и  $T_m/T_s$  для привода конкретной поршневой машины, можно найти  $\Delta K_{\omega \text{ норм}}$ . Параметр  $k_m$  следует оценивать на валу двигателя для учета влияния упругих связей в кинематической цепи, а оценивая суммарный момент инерции, необходимо брать его среднее значение за период пульсаций.

## ВЫВОДЫ

1. В настоящее время не существует общепринятых методов контроля технического состояния асинхронных электродвигателей на работающих машинах, учитывающих изменение внешних факторов.

2. На параметры частоты вращения, за исключением коэффициента пульсаций частоты вращения, значительное влияние оказывает качество электроснабжения.

3. Изменение параметров частоты вращения в функции степени неисправностей происходит по линейному закону.

4. Коэффициент пульсаций частоты вращения может эффективно использоваться для контроля технического состояния асинхронных электродвигателей приводов поршневых машин в качестве обобщенного диагностического параметра.

В заключение необходимо отметить, что изложенные положения к настоящему времени проверены на экспериментальном стенде, модельных примерах и частично на электродвигателях приводов холодильных компрессоров. Более обобщенные выводы могут быть сделаны после накопления достаточного опыта практического использования данных положений для контроля асинхронных двигателей поршневых машин.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Русан В. И., Серков А. В. Анализ существующих методов контроля технического состояния электродвигателей // Аграрная энергетика в XXI в.: Матер. междунар. науч.-техн. конф. – Мн.: УП «Технопринт», 2001. – С. 31–33.

2. Кулизаде К. Н., Али-заде П. Г., Хайкин И. Е. Синхронный электропривод с пульсирующей нагрузкой. – М.: Энергия, 1978. – 80 с.

3. Чиликин М. Г., Ключев В. И., Сандлер А. С. Теория автоматизированного электропривода. – М.: Энергия, 1979. – 616 с.

4. Геращенко В. В., Яскевич М. Я., Серков А. В. Контроль технического состояния асинхронных двигателей // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1999. – № 11. – С. 16–17.

5. Семидуберский М. С. Насосы, компрессоры, вентиляторы. – М.: Высш. шк., 1974. – 232 с.

6. Холодильные компрессоры / Под ред. А. В. Быкова. – М.: Колос, 1992. – 304 с.

7. Котеленец Н. Ф., Кузнецов Н. Л. Испытания и надежность электрических машин. – М.: Высш. шк., 1988. – 232 с.

8. Гаран В. П. Диагностирование электрооборудования. – Киев: Техника, 1983. – 200 с.

9. Русан В. И., Моисейчик В. А., Рузов Л. С. Надежность и эффективность использования электропривода в сельскохозяйственном производстве. – Мн.: БелНИИТИ, 1989. – 40 с.

10. Геращенко В. В., Серков А. В. Определение быстродействия электрических приводов мобильных средств механизации в строительстве // Механизация строительства. – 1998. – № 10. – С. 16–17.

11. Моисеева Е. Е. Динамическая тепловая модель асинхронных двигателей // Электротехника. – 1994. – № 3. – С. 42–44.

12. Веников В. А., Веников Г. В. Теория подобия и моделирования. – М.: Высш. шк., 1984. – 439 с.

Представлена Ученым советом  
РУП «БелНИИагроэнерго»

Поступила 5.12.2001