

## МЕТОДИКА ДИАГНОСТИКИ И ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ОБМОТОК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В РЕЖИМЕ ЕГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

В статье выполнен обзор методов диагностики неисправностей асинхронных двигателей. На основе обзора источников информации показано, что отсутствуют методики, аппаратные и программные комплексы, позволяющие определять неисправности обмоток асинхронных двигателей в режиме их функционирования. В работе предлагается методика, позволяющая определять место неисправностей обмоток АД, а также предсказывать развитие неисправностей. В данной работе дается научное обоснование методики диагностирования развития и идентификации неисправностей обмоток АД, основанное на регистрации реальных фазных напряжений питания, потребляемых токов и моделировании на их основе результирующего вращающегося магнитного поля двигателя, а также энергетические характеристики и последующего их сравнения с результирующим вращающимся магнитным полем двигателя с заведомо исправными и неисправными обмотками по признакам, определяющим искажения вращающегося магнитного поля статора, и идентификаторами неисправностей обмоток. Сформулирована постановка задачи. Задача заключается в разработке диагностических признаков неисправностей обмоток статора и ротора АД по осциллограммам фазных напряжений и токов, зарегистрированных при работе в режимах нормального функционирования электропривода. Критерием решения задачи является получение идентификаторов (признаков) витковых коротких замыканий и обрыва проводников  $i$ -х фаз обмотки статора, обрыва стержней короткозамкнутого ротора и ухудшения магнитной системы двигателя. В качестве идентификаторов приняты: координаты вектора магнитного потока статора на комплексной плоскости, определяющие форму его годографа; действующие значения фазных токов, полной, активной, реактивной мощностей, величины КПД и  $\cos \varphi$ . Задача решается методом математического моделирования результирующего вращающегося магнитного поля и его составляющих по величинам фазных токов статора, токов намагничивания и токов ротора, а также величин КПД и  $\cos \varphi$  асинхронного двигателя, работающего в симметричных и несимметричных режимах. Приводится пример решения задачи с применением предложенной методики и разработанного программного комплекса.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, диагностика, обмотки двигателя, неисправности обмоток двигателя, моделирование, идентификация, программный комплекс.

### ВВЕДЕНИЕ

При эксплуатации асинхронных электродвигателей (АД) они аварийно отключаются от источника электропитания, например, из-за перегрузок по току или вращающему моменту, повреждения обмоток статора или ротора, разрушения подшипников или из-за комбинации перечисленных причин. Аварийное отключение электропривода из-за повреждения обмоток или разрушения подшипников АД часто ведет к нарушению реализуемого технологического процесса, простою оборудования, утрате материальных ресурсов и значительным экономическим потерям. Кроме того, как правило, при повреждении обмоток электродвигатель выходит из строя и направляется на капитальный ремонт, что увеличивает эксплуатационные расходы предприятия. В итоге снижается конкурентная способность выпускаемой продукции. Для снижения числа аварийных ситуаций в асинхронных электроприводах применяются различные методы контроля и диагностики электрических и механических параметров, состояний обмоток и подшипников, а также режимов нагрева электродвигателей.

В данной работе предлагается методика и даётся её научное обоснование. Разработана программа диагно-

стирования и идентификации неисправностей обмоток асинхронного двигателя путем регистрации реальных сигналов фазных напряжений, токов и на их основе моделирования формы и координат вращающегося магнитного поля, действующих значений фазных токов, мощностей, КПД и  $\cos \varphi$  в режиме функционирования двигателя, затем сравнения полученных параметров с аналогичными параметрами заведомо исправного двигателя и с параметрами-идентификаторами тестовых неисправностей обмоток статора и ротора.

### *Научно-техническая проблема и её актуальность*

По экспертным оценкам в реальном секторе экономики РФ эксплуатируется до 180 млн единиц трехфазных асинхронных электродвигателей [1]. По оценкам специалистов электроремонтных предприятий, цехов и участков, ежегодно около 1,3% (до 1,36 млн единиц) парка АД выходит из строя по причине разрушения обмоток, из-за несвоевременного выявления разрушающих факторов и поступает на капитальный ремонт. Разумеется, диагностировать техническое состояние каждого АД не представляется возможным как по методическим, инструментальным, кадровым, так и по экономическим соображениям. Однако наиболее значимые и мощные асинхронные электроприводы, применяемые для реализации непрерывных технологических

процессов, например в металлургической, нефтегазовой, химической и других отраслях производства, а также в технологиях, обеспечивающих жизнедеятельность людей, должны диагностироваться.

Известны методы и средства диагностики технического состояния АД, основанные на измерении величин или токов, или температуры, или вибрации, или акустических характеристик электрических машин. Например, методика диагностики, основанная на непрерывном контроле температуры конкретной точки обмотки статора, сравнение её с температурой окружающей среды, определения превышения температуры над окружающей средой и выработки сигнала на отключение двигателя от источника электропитания [2, 3]. Однако эта методика не идентифицирует причину перегрева обмотки, т.е. не различает из-за какого фактора обмотка перегревается: из-за технологической перегрузки, из-за витковых замыканий или обрыва фаз обмотки статора (ротора) или из-за износа подшипников, или других причин.

Известна также методика, основанная на измерении фазных токов и его спектрального анализа, позволяющая диагностировать состояние подшипниковых узлов [4–7]. Сущность методики заключается в периодической регистрации и выполнении спектрального анализа потребляемых токов и получении спектральной характеристики токов АД. Она сравнивается с аналогичными спектральными характеристиками токов АД, полученными при работе с заведомо исправными подшипниками.

Идентифицировать неисправности обмоток статора (ротора) позволяет методика, основанная на регистрации токов АД и исследовании их спектра с применением вейвлет-преобразований [8]. Известна методика оценки параметров АД путем косвенного измерения сопротивления обмотки статора в режиме функционирования, основанная на формировании сигнала, пропорционального падению напряжения в меди обмотки статора [9]. Однако эта методика позволяет контролировать изменение величины сопротивления в функции температуры и не позволяет диагностировать вид неисправности обмоток АД. Известны методика и прибор для контроля энергетических характеристик асинхронных электроприводов в режиме их функционирования [10]. Однако они не выявляют неисправности электромагнитной системы АД.

Приведенные методики диагностирования АД по потребляемому току основаны на применении специальных компьютерных программ и требуют достаточно сложного математического обеспечения.

В данной работе дается научное обоснование методики диагностирования развития и идентификации неисправностей обмоток АД, основанное на регистрации реальных фазных напряжений питания, потребляемых токов и моделировании на их основе результирующего вращающегося магнитного поля двигателя, а также его энергетических характеристик и последующего их сравнения с результирующим вращающимся магнитным полем и энергетическими характеристиками двигателя с заведомо исправными и неисправными обмотками по признакам, определяющим искажения вращающегося магнитного поля статора, и идентификаторами неисправностей обмоток.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача заключается в разработке диагностических признаков неисправностей обмоток статора и ротора АД по осциллограммам фазных напряжений и токов, зарегистрированных при работе в режимах нормального функционирования электропривода.

## КРИТЕРИЙ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Критерием решения задачи является получение идентификаторов (признаков) витковых коротких замыканий и обрыва проводников  $i$ -х фаз обмотки статора, обмотки фазного ротора, обрыва стержней короткозамкнутого ротора и ухудшения магнитной системы двигателя. В качестве идентификаторов приняты: координаты вектора магнитного потока статора на комплексной плоскости, определяющие форму его годографа; действующие значения фазных токов, полной, активной, реактивной мощностей, величины КПД и  $\cos \phi$ .

## Условия, допущения и ограничения

1. Осциллографирование фазных напряжений и токов осуществляется с использованием штатных датчиков напряжений и токов в установившихся режимах при холостом ходе без отсоединения вала АД от вала рабочей машины и при работе с нагрузкой.

2. Продолжительность осциллографирования электрических сигналов от 180 до 300 с. При использовании аналоговых датчиков их сигналы оцифровываются.

3. Используются паспортные (каталожные) данные, параметры магнитной системы тестируемого АД и его трехфазная Т-образная электрическая схема замещения.

4. При исследовании учитывается первая гармоника синусоидального трехфазного напряжения, модуль, фаза и частота которого могут изменяться в пределах, определяемых ГОСТ 9630-80.

5. Трехфазный источник питания обладает большой мощностью, его внутреннее сопротивление бесконечно маленькое.

Задача решается методом математического моделирования результирующего вращающегося магнитного поля и его составляющих по величинам фазных токов статора, токов намагничивания и токов ротора, а также фазных мощностей, величин КПД и  $\cos \phi$  асинхронного двигателя, работающего в симметричных и несимметричных режимах.

## НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА

Из классической теории АД известно, что при подаче на его трехфазную обмотку симметричного трехфазного напряжения  $\dot{U}_1 = U_1 \cdot e^{j\psi_1}$ ,  $\dot{U}_2 = U_2 \cdot e^{j(\psi_1 - 120^\circ)}$ ,  $\dot{U}_3 = U_3 \cdot e^{j(\psi_1 + 120^\circ)}$  при идентичных эквивалентных фазных сопротивлениях  $Z_{\phi 1} = Z_{\phi 2} = Z_{\phi 3} = Z_\phi \cdot e^{j\psi_{Z_\phi}}$  в обмотке протекают одинаковые по модулю, но сдвинутые по начальной фазе на  $120^\circ$  токи:

$$\dot{I}_1 = I_1 \cdot e^{j(\psi_1 - \psi_{Z_\phi})};$$

$$\dot{I}_2 = I_2 \cdot e^{j(\psi_1 - \psi_{Z_\phi} - 120^\circ)};$$

$$\dot{I}_3 = I_3 \cdot e^{j(\psi_1 - \psi_{Z_\phi} + 120^\circ)}.$$

В установившихся режимах работы АД симметричная трехфазная система фазных токов статора, при расположении в пространстве магнитных осей фаз обмотки статора со сдвигом на 120 электрических градусов относительно друг друга, возбуждает круговое вращающееся магнитное поле статора. При нарушении симметрии источника питания или симметрии параметров обмоток АД, т.е. при  $Z_{s1} \neq Z_{s2} \neq Z_{s3}$ , что имеет место при неисправностях электромагнитной системы, трехфазная система токов статора становится несимметричной, а круговое вращающееся магнитное поле статора искажается в эллипсоидное вращающееся поле, которое характеризуется координатами – большим и маленьким диаметрами и углом наклона оси большого диаметра относительно вещественной оси комплексной плоскости.

Идея предлагаемого метода диагностирования и идентификации неисправностей обмоток АД основана на формировании годографа вектора вращающегося магнитного поля и его координат, полученных методом моделирования по реальным фазным токам, и сравнении с годографами векторов вращающихся магнитных полей, их координат и энергетических показателей заведомо исправного АД и этого же двигателя с моделируемыми тестовыми неисправностями, число которых  $N=2^k$ , где  $k=2^A$ ,  $A$  – число аргументов, определяющих место и вид неисправности обмотки.

Обоснование методики диагностирования неисправностей обмоток АД основано на анализе параметров электрической Т-образной схемы замещения (рис. 1), и их связи с реальными параметрами обмоток статора, ротора и параметрами магнитной системы электрической машины.

На рис. 1 введены обозначения:

$\dot{U}_i$  – напряжение  $i$ -й фазы источника питания;

$Z_{si} = k_{si} \cdot R_{s1} + j \cdot k_{si}^2 \cdot X_{s1}$  – комплексное сопротивление фазы обмотки статора;

$Z_{mi} = k_{mi} \cdot R_{mi} + j \cdot k_{mi} \cdot X_{mi}$  – комплексное сопротивление фазы ветви намагничивания (главное сопротивление двигателя);

$Z'_{ri} = k_{ri} \cdot R'_{r2} + j \cdot X'_{r2}$  – комплексное сопротивление фазы обмотки ротора, приведенное к обмотке статора;

$R_{\text{н}} = R'_{ri} \cdot (1/s_i - 1)$  – активное сопротивление, пропорциональное механической нагрузке АД,  $s_i$  – скольжение АД;

$k_{si}, k_{ri}, k_{mi}$  – коэффициенты, характеризующие неисправности, соответственно в обмотках статора, ротора и ветви намагничивания.

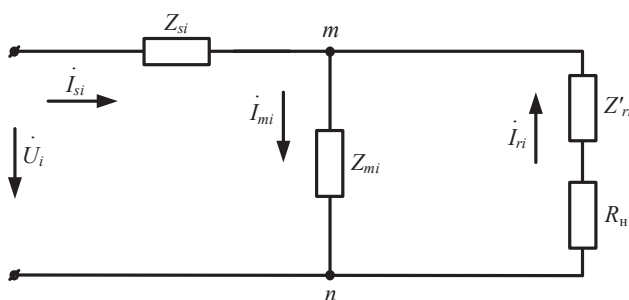


Рис. 1. Т-образная схема замещения  $i$ -ой фазы АД

Установим связи между величинами сопротивлений схемы замещения с реальными физическими параметрами обмотки статора с учетом возможных её неисправностей. Активное сопротивление  $R_1$  фазы в Ом исправной обмотки статора определяется известным соотношением [11]

$$R_1 = w_1 \cdot \frac{l_{\text{ср}}}{\gamma_\theta \cdot a_1 \cdot c_1 \cdot q \cdot 10^3}, \quad (1)$$

где  $w_1$  – число эффективных витков фазы обмотки статора;  $l_{\text{ср}}$  – средняя длина витка, мм;  $\gamma_\theta$  – удельная проводимость материала проводника (меди) при рабочей температуре  $\theta$ , См/мкм;  $a_1$  – число параллельных ветвей обмотки статора;  $c_1$  – число элементарных проводников в одном эффективном проводнике;  $q$  – площадь поперечного сечения элементарного проводника.

Удельная проводимость материала проводника (меди) в Ом при рабочей температуре  $\theta$  определяется по известной формуле

$$\frac{1}{\gamma_v} = \frac{1}{\gamma_{20}} \cdot [1 + \alpha \cdot (\theta - 20^\circ\text{C})],$$

где  $\gamma_{20}$  – удельная электрическая проводимость материала проводника при  $20^\circ\text{C}$ , См/мкм;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления,  $^\circ\text{C}^{-1}$ , для меди и алюминия  $\alpha = 0,004^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $\theta$  – температура обмотки АД.

Из выражения (1) видно, что активное сопротивление  $R_1$  фазы обмотки статора зависит от электрической проводимости материала, из которого изготовлена обмотка, числа эффективных витков, средней длины витка, числа элементарных проводников в одном эффективном проводнике, числа параллельных ветвей и от температуры АД. При витковых замыканиях обмотки активное сопротивление  $R_1$  уменьшается, а при обрыве элементарных проводников или параллельных ветвей – увеличивается. При математическом моделировании тестовых неисправностей эти признаки неисправностей обмотки статора учитываются коэффициентом

$$k_{si} = \frac{k_{w_i}}{k_{c_i} \cdot k_{a_i}}, \quad (2)$$

где  $k_{w_i} = (1 - \frac{w_{li}}{w_1})$ ,  $k_{c_i} = (1 - \frac{c_{li}}{c_1})$ ,  $k_{a_i} = (1 - \frac{a_{li}}{a_1})$ ;  $w_{li}$  – число короткозамкнутых витков обмотки статора;  $c_{li}$  – число разомкнутых (оборванных) элементарных проводников;  $a_{li}$  – число разомкнутых параллельных ветвей.

При решении поставленной задачи, используя выражение (2), представляется возможным моделировать тестовые короткие замыкания витков, обрывы элементарных проводников и параллельных ветвей обмотки статора. Поэтому при моделировании неисправностей обмоток статора активное сопротивление обмотки изменяется по формуле

$$R_{si} = k_{si} \cdot R_1.$$

Индуктивное сопротивление исправной обмотки статора  $X_1$ , Ом, обусловленное потоками рассеяния магнитного поля, определяется известным соотношением [11]



$$X_1 = \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot l_1 \cdot w_1^2 \cdot \lambda_1}{p \cdot q_1 \cdot 10^8}, \quad (3)$$

где  $f_1$  – частота тока, Гц;  $l_1$  – длина сердечника статора, мм;  $w_1$  – число эффективных витков фазы обмотки статора;  $p$  – число пар полюсов АД;  $q_1$  – число пазов на полюс и фазу;  $\lambda_1$  – коэффициент проводимости рассеяния обмотки статора, для АД средней и большой мощности  $\lambda_1=3,5 \div 4,3$ .

Из приведенного отношения (3) видно, что индуктивное сопротивление обмотки статора при витковых замыканиях обмотки, т.е. уменьшении числа эффективных витков, уменьшается в квадратичной зависимости. Поэтому при моделировании коротких замыканий витков, т.е. при  $k_{w1} \neq 1$  изменение индуктивного сопротивления обмотки статора в Ом учитывается выражением вида

$$X_{si} = k_{wi}^2 \cdot X_1. \quad (4)$$

С учетом изложенного комплексное сопротивление  $i$ -й фазы обмотки статора в Ом, при моделировании неисправностей обмотки, представляется векторной суммой

$$Z_{si} = k_{si} \cdot R_1 + jk_{wi}^2 \cdot X_1, \quad (5)$$

где  $R_1, X_1$  – параметры обмотки статора, определяемые по каталожным данным или из справочников по АД.

При решении задачи коэффициент  $k_{si}$  определяется отношением (2) и задается исследователем в зависимости от моделирования вида неисправностей: замыкания витков, числа разомкнутых элементарных проводников, числа разомкнутых параллельных ветвей.

Величина главного индуктивного сопротивления АД, Ом, определяется отношением [11]

$$X_m = \frac{E_{si}}{I_m} = \frac{k_e \cdot U_{1n}}{I_m}, \quad (6)$$

где  $k_e$  – коэффициент обмотки статора по ЭДС;  $k_e=0,95 \div 0,97$ ;  $U_{1n}$  – номинальное фазное напряжение АД, В;  $I_m$  – намагничивающий ток  $i$ -й фазы обмотки статора, А.

Намагничивающий ток (А), на один полюс обмотки статора определяется выражением [11]:

$$I_{mi} = \frac{2,22 \cdot F \cdot p}{m_1 \cdot w_1}, \quad (7)$$

где  $F$  – МДС обмотки статора или суммарное магнитное напряжение участков магнитной системы АД (воздушный зазор, зубцы статора, зубцы ротора, спинка ротора, спинка статора);  $m_1$  – число фаз двигателя.

После подстановки выражения (7) в (6) получим:

$$X_m = \frac{k_e \cdot U_{1n} \cdot m_1 \cdot w_1}{2,22 \cdot F \cdot p}. \quad (8)$$

Из анализа выражения (8) следует, что величина главного индуктивного сопротивления АД, при неизменных геометрических параметрах магнитной систе-

мы, прямо пропорциональна числу витков обмотки статора. Поэтому при решении поставленной задачи величина главного индуктивного сопротивления  $i$ -й фазы АД (Ом) определяется произведением

$$X_{mi} = k_{wi} \cdot X_m, \quad (9)$$

где  $X_m$  – находится по каталожным или справочным данным исследуемого АД.

Комплекс главного сопротивления,  $Z_m$ , двигателя содержит вещественную составляющую  $R_m$ . Эта величина пропорциональна магнитным потерям в электро-технической стали – потерям активной мощности в спинке и зубцах ферромагнитного сердечника статора. При заданных частоте тока, технологии изготовления сердечника, геометрических размерах сердечника и числа пазов статора магнитные потери пропорциональны квадрату магнитной индукции,  $B$ , или квадрату фазного напряжения, т.е.  $P_c \equiv B^2 \equiv U_{1n}^2$ . При среднем коэффициенте насыщения магнитной системы, равного отношению  $F/F_6=1,35 \div 1,77$ , где  $F_6$  – магнитное напряжение в воздушном зазоре АД и номинальном напряжении питания, магнитные потери можно считать неизменными. Поэтому при решении поставленной задачи вещественную составляющую комплекса главного сопротивления АД принято считать не зависимой от числа витков обмотки статора. С учетом изложенного комплексное сопротивление ветви намагничивания  $i$ -й фазы АД в Ом выражаются векторной суммой

$$Z_{mi} = R_{mi} + j \cdot k_{wi} \cdot X_{mi}, \quad (10)$$

где  $R_m = \frac{P_c}{m_1 I_m^2} = \frac{k_c \cdot P_{2n}}{m_1 I_m^2}$ ;  $k_c$  – коэффициент потерь

активной мощности в стали АД;  $k_c=0,01 \div 0,025$ .

Электрическая Т-образная схема замещения АД (рис. 1) содержит ветвь обмотки ротора. Комплексное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора, имеет вид:

$$Z_r' = R_2' + jX_2',$$

где  $R_2', X_2'$  – активное и реактивное сопротивления ротора, приведенные к обмотке статора.

Асинхронный двигатель может изготавливаться с короткозамкнутой обмоткой или с фазной обмоткой ротора. Вещественная составляющая сопротивления обмотки ротора  $R_2'$  зависит от электрической проводимости материала, числа пазов, числа эффективных витков  $w_2$ , длины витка  $l_2$ , числа параллельных ветвей  $a_2$ , числа элементарных проводников  $c_2$ , если обмотка фазная, и от числа короткозамкнутых стержней, геометрических размеров сердечника и его пазов, если обмотка короткозамкнутая.

При витковых замыканиях фазной обмотки ротора его активное сопротивление уменьшается с увеличением числа замкнутых витков и увеличивается при обрыве элементарных проводников и размыкании параллельных ветвей. Сопротивление (Ом) определяется произведением

$$R_{ri}' = k_{r2} \cdot R_2', \quad (11)$$

где

$$k_{r2i} = \frac{k_{w2i}}{k_{c2i} \cdot k_{a2i}}, \quad (12)$$

где  $k_{w2i} = \left(1 - \frac{w_{2i}}{w_2}\right)$ ,  $k_{c2i} = \left(1 - \frac{c_{2i}}{c_2}\right)$ ,  $k_{a2i} = \left(1 - \frac{a_{2i}}{a_2}\right)$ ;  $w_{2i}$  – число короткозамкнутых витков обмотки ротора;  $c_{2i}$  – число разомкнутых (оборванных) элементарных проводников;  $a_{2i}$  – число разомкнутых параллельных ветвей. При решении задачи  $k_{r2}$  определяется условиями моделирования неисправностей роторной обмотки АД, т.е. величинами коэффициентов  $k_{w2}$ ,  $k_{c2}$ ,  $k_{a2}$ .

Для АД с короткозамкнутым ротором возможны обрывы стержней короткозамкнутой обмотки. С увеличением числа оборванных стержней активное сопротивление  $R'_2$  увеличивается. При этом величина  $R'_{r2}$  (Ом) определяется отношением

$$R'_{r2} = \frac{R'_2}{k_{c2}}, \quad (13)$$

где  $k_{c2} = \left(1 - \frac{c_{2i}}{c_2}\right)$  – доля исправных стержней;  $c_{2i}$  – число разомкнутых стержней короткозамкнутого ротора.

Индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора,  $X'_2$  (Ом) пропорционально квадрату числа витков (стержней) и частоте тока ротора, определяемое скольжением  $s_i$ :

$$X_{ri} = k_{w2i}^2 \cdot X'_2 \cdot s_i. \quad (14)$$

При работе АД в режиме реального холостого хода скольжение  $s_i = s_{xx} = 0,005 \div 0,009$ , а при работе АД с нагрузкой в диапазоне  $(0,75 \div 1,0) \cdot P_{2н}$ , скольжение  $s_i = s_n = 0,025 \div 0,03$ . В справочниках по АД, или в каталогах,  $X'_2$  определяется для номинального скольжения. Поэтому при моделировании магнитного поля АД при работе без нагрузки, т.е. при холостом ходе, индуктивное сопротивление  $X_{ri}$  (Ом) снижается до величины, определяемой выражением:

$$X_{ri} = X'_{2xx} = k_{w2i}^2 \cdot X'_2 \cdot \frac{s_{xx}}{s_n}, \quad (15)$$

а при работе с номинальной нагрузкой

$$X_{ri} = X'_{2n} = k_{w2i}^2 \cdot X'_2. \quad (16)$$

При решении поставленной задачи комплексное сопротивление  $i$ -й фазы обмотки ротора в Ом определяется векторной суммой

$$Z'_{ri} = k_{r2} \cdot R'_2 + j \cdot k_{w2i}^2 \cdot X'_2. \quad (17)$$

При моделировании коэффициент  $k_{r2}$  задается исследователем.

Для учета механической мощности, приложенной к валу АД, последовательно с сопротивлением  $Z'_{ri}$  включено активное сопротивление  $R_{hi}$  (см. рис. 1). Величина этого сопротивления в Ом пропорциональна механической мощности и определяется известной формулой [11]

$$R_{hi} = R'_2 \cdot \left( \frac{1}{s_i} - s_i \right). \quad (18)$$

При моделировании результирующего магнитного поля учитывается, что при реальном холостом ходе двигатель преодолевает механическую мощность трения в подшипниках и мощность, затрачиваемую на вентиляцию. Из опыта эксплуатации АД механическая мощность реального холостого хода находится в диапазоне  $(0,005 \div 0,009) \cdot P_{2н}$ .

Из изложенного и с учетом рис. 1 эквивалентное сопротивление  $i$ -й фазы АД в Ом выражается равенством

$$Z_{\text{э}i} = Z_{si} + \frac{Z_{mi} \cdot (Z'_{ri} + R_{hi})}{Z_{mi} + Z'_{ri} + R_{hi}}. \quad (19)$$

Поэтому из приведенного анализа величин сопротивлений электрической Т-образной схемы замещения и их связи с реальными физическими параметрами обмоток статора, ротора и параметрами магнитной системы электрической машины трехфазный асинхронный двигатель при работе в симметричных и не симметричных (аварийных) режимах может быть представлен трехфазной электрической схемой замещения (рис. 2).

Для моделирования тестовых режимов работы двигателя расчет приведенной электрической схемы (см. рис. 2), осуществляется по известным выражениям, следующим из закона Ома:

$$I_1 = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_{Nn}}{Z_{\text{э}1}};$$

$$I_2 = \frac{\dot{U}_2 - \dot{U}_{Nn}}{Z_{\text{э}2}};$$

$$I_3 = \frac{\dot{U}_3 - \dot{U}_{Nn}}{Z_{\text{э}3}};$$

$$\dot{U}_{Nn} = \frac{\dot{U}_1 \cdot \frac{1}{Z_{\text{э}1}} + \dot{U}_2 \cdot \frac{1}{Z_{\text{э}2}} + \dot{U}_3 \cdot \frac{1}{Z_{\text{э}3}}}{\frac{1}{Z_{\text{э}1}} + \frac{1}{Z_{\text{э}2}} + \frac{1}{Z_{\text{э}3}}}.$$

Величины эквивалентных сопротивлений  $i$ -х фаз обмоток АД определяются по формуле (19).

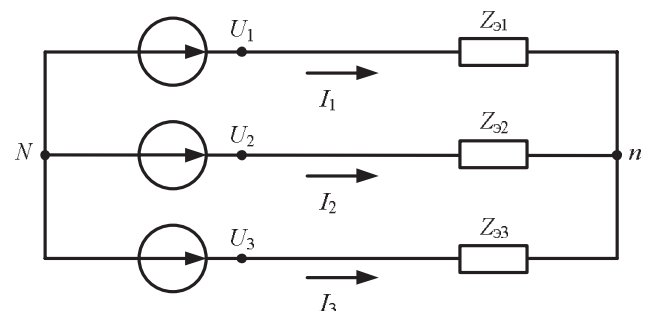


Рис. 2. Электрическая схема замещения трехфазного АД

Моделирование результирующего вращающегося магнитного потока АД основано на известном принципе векторного сложения магнитных потоков, возбужденных токами фаз обмоток статора, оси которых смещены в пространстве относительно друг друга на угол 120 электрических градусов, токами ротора и токами намагничивания [12]. При этом учитывается, что вектор магнитного потока  $\vec{\Phi}$  определяется потоком вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  через площадь  $\vec{S}$ :

$$\vec{\Phi} = \int_{\vec{S}} \vec{B} d\vec{S}.$$

Магнитная индукция является функцией от вектора напряженности магнитного поля  $\vec{H}$ , относительных магнитных проницаемостей вакуума  $\mu_0$  и ферромагнитного вещества  $\mu_r$ :

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H}.$$

Зависимость  $B(H)$  для ферромагнитного вещества нелинейная. На практике она представляется так называемой кривой намагничивания [12].

Напряженность магнитного поля связана с возбуждающими его токами  $\vec{I}_i$ , известным законом полного тока:

$$\sum_i \vec{I}_i \cdot \vec{w}_i = \oint \vec{H} d\vec{l}.$$

При решении поставленной задачи моделирование результирующего вращающегося магнитного поля и его составляющих осуществляется возбуждающими их токами ветвей схемы замещения  $i$ -х фаз АД (см. рис. 1). Токи фаз  $i$ -х ветвей схемы замещения АД определяются по закону Ома:

$$\dot{I}_{si} = \frac{\dot{U}_i}{Z_{si}};$$

$$\dot{I}_{mi} = \frac{\dot{U}_{mi}}{Z_{mi}};$$

$$\dot{I}_{ri} = \frac{\dot{U}_{mi}}{Z'_{ri} + R_H};$$

$$\dot{U}_{mn} = \dot{U}_i - \dot{I}_i \cdot Z_{si}.$$

Формирование признаков неисправностей обмоток АД осуществляется компьютерным моделированием по программе исследования.

Программа моделирования числа  $N$ , тестовых неисправностей обмоток АД формируется с учетом числа аргументов, влияющих на неисправности. Определим число аргументов, вызывающих несимметричный режим работы АД. Для этого все аргументы разделим на две группы.

Группа № 1 – аргументы, определяющие место неисправности: обмотка статора  $s$ ; обмотка ротора  $r$ ; фаза статора  $s_1$ , фаза статора  $s_2$ , фаза статора  $s_3$ ; фаза ротора  $r_1$ , фаза ротора  $r_2$ , фаза ротора  $r_3$ ; замыкание витков обмотки статора  $w_{1i}$ ; обрыв элементарного проводника обмотки статора  $c_{1i}$ ; размыкание (обрыв) параллельной

ветви обмотки статора  $a_{1i}$ ; замыкание витков обмотки ротора  $w_{2i}$ ; оообрыв элементарного проводника обмотки ротора  $c_{2i}$ ; размыкание (обрыв) параллельной ветви обмотки ротора  $a_{2i}$ . Группа № 1 содержит число аргументов  $A_1=14$ .

Группа № 2 – аргументы, определяющие развития неисправностей в обмотках АД:  $\Delta w_{1i}$ ,  $\Delta c_{1i}$ ,  $\Delta a_{1i}$ ,  $\Delta w_{2i}$ ,  $\Delta c_{2i}$ ,  $\Delta a_{2i}$ . Эта группа аргументов содержит число  $A_2=6$ . Причем аргументы при моделировании тестовых неисправностей могут задаваться исследователем с шагом:  $\Delta w_{1i}=(0,1 \div 0,25)w_1$ ;  $\Delta c_{1i}=(1 \div 7)$ ;  $\Delta a_{1i}=(1 \div 4)$ ;  $\Delta w_{2i}=(0,1 \div 0,25)w_2$ ;  $\Delta c_{2i}=(1 \div 7)$ ;  $\Delta a_{2i}=(1 \div 4)$ . Максимальные значения аргументов  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  определяются обмоточными данными АД. Величина шага аргументов определяет точность диагностирования развития неисправностей обмоток АД.

Таким образом, место неисправностей обмоток АД определяется числом тестов  $N_{A_1}=2^{A_1}=2^{14}=16384$ . Минимальное число тестов, определяющих развитие неисправностей обмоток АД при  $\Delta w_{1i}=w_1$ ,  $\Delta w_{2i}=w_2$ ,  $c_{1i}=1$ ,  $c_{2i}=1$ ,  $a_{1i}=1$ ,  $a_{2i}=1$ , равно  $N_{A_2}=2^{A_2}=2^6=64$ . Максимальное число тестов, определяющих развитие неисправностей, зависит от заданного шага изменения аргументов  $A_2$ . Аргументы  $c_{1i}$ ,  $c_{2i}$ ,  $a_{1i}$ ,  $a_{2i}$  – целые числа.

После формирования тестовых годографов векторов вращающихся магнитных полей и энергетических показателей АД выполняется сравнение реального годографа и энергетических показателей АД, полученных по зарегистрированным фазным напряжениям и токам. Если координаты годографа вектора вращающегося магнитного поля и энергетические показатели отличаются от годографа вектора магнитного поля и энергетических показателей исправного двигателя не более чем на 3-5%, то двигатель будет считаться исправным. Если показатели режимов работы АД отличаются больше чем на 5%, то выполняется сравнение реального годографа и энергетических показателей АД, полученных по зарегистрированным фазным напряжениям и токам с аналогичными параметрами тестовых неисправностей АД. В результате сравнения параметров выявляется номер тестовой неисправности обмоток АД. Признаки неисправностей обмоток при моделировании симметричных и несимметричных режимов работы АД формируются по алгоритмам [13-15].

#### ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДИКИ ДИАГНОСТИКИ И ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ОБМОТОК ДВИГАТЕЛЯ

Моделируются неисправности обмотки статора двигателя с номинальными данными:  $P_{2H}=30$  кВт,  $U_{1H}=220$  В;  $f_1=50$  Гц;  $n_{2H}=2945$  об/мин;  $n_1=3000$  об/мин;  $\eta_H=0,905$ ;  $\cos \varphi=0,9$ ; обмоточные данные, о.е.:  $r_s=0,003$ ,  $x_s=0,073$ ,  $r_m=0,928$ ,  $x_m=3,8$ ,  $r'_r=0,018$ ,  $x'_r=0,11$  [16]. При осциллографировании зарегистрированы фазные токи  $i_1=98 \cdot \sin(\omega \cdot t - 23^\circ)$ ,  $i_2=91 \cdot \sin(\omega \cdot t + 100^\circ)$ ,  $i_3=89 \cdot \sin(\omega \cdot t - 144^\circ)$ .

Для исправного двигателя вычислены параметры:  $I_{1H}=55,8$  А;  $Z_H=3,942$  Ом;  $R_s=0,012$  Ом;  $X_s=0,288$  Ом;  $R_m=3,658$  Ом;  $X_m=14,98$  Ом;  $R'_r=0,07$  Ом;  $X'_r=0,434$  Ом.

Программа исследования неисправностей обмоток статора и ротора АД определяются таблицами истинности, табл. 1 и 2, комбинациями их функций  $f_s$  и  $f_r$ , а также приращениями коэффициентов  $k_{si}$ ,  $k_{ri}$ .

Таблица 1

Программа формирования  
неисправностей обмотки статора

№ п/п	Вход			Выход
	$S_3$	$S_2$	$S_1$	$f_s$
0	0	0	0	$f_0 = \bar{S}_3 \cdot \bar{S}_2 \cdot \bar{S}_1$
1	0	0	1	$f_1 = \bar{S}_3 \cdot \bar{S}_2 \cdot S_1$
2	0	1	0	$f_2 = \bar{S}_3 \cdot S_2 \cdot \bar{S}_1$
3	0	1	1	$f_3 = \bar{S}_3 \cdot S_2 \cdot S_1$
4	1	0	0	$f_4 = S_3 \cdot \bar{S}_2 \cdot \bar{S}_1$
5	1	0	1	$f_5 = S_3 \cdot \bar{S}_2 \cdot S_1$
6	1	1	0	$f_6 = S_3 \cdot S_2 \cdot \bar{S}_1$
7	1	1	1	$f_7 = S_3 \cdot S_2 \cdot S_1$

Таблица 2

Программа формирования  
неисправностей обмотки ротора

№ п/п	Вход			Выход
	$r_3$	$r_2$	$r_1$	$f_r$
0	0	0	0	$f_0 = \bar{r}_3 \cdot \bar{r}_2 \cdot \bar{r}_1$
1	0	0	1	$f_1 = \bar{r}_3 \cdot \bar{r}_2 \cdot r_1$
2	0	1	0	$f_2 = \bar{r}_3 \cdot r_2 \cdot \bar{r}_1$
3	0	1	1	$f_3 = \bar{r}_3 \cdot r_2 \cdot r_1$
4	1	0	0	$f_4 = r_3 \cdot \bar{r}_2 \cdot \bar{r}_1$
5	1	0	1	$f_5 = r_3 \cdot \bar{r}_2 \cdot r_1$
6	1	1	0	$f_6 = r_3 \cdot r_2 \cdot \bar{r}_1$
7	1	1	1	$f_7 = r_3 \cdot r_2 \cdot r_1$

В табл. 1, 2 строки под номером 0 соответствуют заведомо исправному асинхронному двигателю.

Решение задачи осуществляется по алгоритму:

1. Задаются исходные данные двигателя и оцифрованные сигналы инструментально зарегистрированных фазных напряжений и токов.

2. Вычисляются параметры Т-образной схемы замещения АД.

3. Задаются коэффициенты  $k_{si}$  и  $k_{ri}$ , характеризующие неисправности обмоток АД.

4. Для заданных неисправностей обмоток вычисляются токи ветвей электрической схемы (см. рис. 2), проверяются законы Кирхгофа, баланс мощностей, определяются действующие значения фазных токов, мощностей, КПД,  $\cos \varphi$ ; создается таблица тестовых данных.

5. Для комбинаций строк табл. 1, 2 и коэффициентов  $k_{si}$  и  $k_{ri}$  формируются годографы векторов результирующих вращающихся магнитных полей двигателя и составляются серии энергетических данных (координаты главных осей годографа, действующие значения фазных токов, мощностей, КПД,  $\cos \varphi$ ).

6. Главные координаты вращающихся магнитных полей, соответствующие коэффициентам, характеризующим неисправности обмоток АД, строки 1-7 табл. 1 и 2, сравниваются с соответствующими координатами нулевой строки – координатами магнитных полей, КПД и  $\cos \varphi$  заведомо исправного двигателя.

7. Формируется результирующее вращающееся магнитное поле и энергетические параметры двигателя по инструментально зарегистрированным фазным токам.

8. Осуществляется сравнение параметров реального результирующего вращающегося магнитного поля и энергетических характеристик с параметрами вращающихся магнитных полей и энергетических характеристик, полученных моделированием для заданных неисправностей обмоток АД.

9. Определяются совпадающие признаки параметров неисправностей реальной обмотки АД с параметрами, полученным методом моделирования, и идентифицируется номер комбинации неисправностей.

С помощью разработанной методики и программного комплекса при заданных  $\Delta w_1 = 0,25$ ,  $\Delta c_1 = 1$ ,  $\Delta a_1 = 1$ ,  $\Delta w_2 = 1$ ,  $\Delta c_2 = 1$ ,  $\Delta a_2 = 1$  смоделированы годограф вращающегося магнитного поля исправного двигателя (рис. 3, сплошная линия) и годограф вектора вращающихся магнитного поля, сформированного по осциллограммам токов (рис. 3, пунктирная линия). Сравнительный анализ годографов векторов магнитных полей показывает следующие идентификаторы (показатели): круговое вращающееся магнитное поле для зарегистрированных фазных токов формирует эллипсоидный годограф с большим диаметром, равным 1,16 ед. и маленьким диаметром, равным 0,94 ед. от диаметра кругового вращающегося поля исправного двигателя; ось большого диаметра расположена под углом  $\varphi = 155^\circ$ ; действующие значения фазных токов, А:  $I_1 = 69,6$ ,  $I_2 = 64,5$ ,  $I_3 = 63,1$ .

Идентификаторы (показатели) исправного двигателя: годограф круговой с диаметром равным 1,0; угол  $\varphi = 0^\circ$ ; действующие значения фазных токов, А:  $I_1 = 61,84$ ,  $I_2 = 61,84$ ,  $I_3 = 61,84$ .

Сравнение идентификаторов годографов исправного и испытуемого АД показывает, что отличительные признаки соответствуют строке под номером один табл. 1 и строке под номером нуль для табл. 2, что соответствует короткому замыканию витков в первой фазе обмотки статора. Идентификаторы развития неисправностей свидетельствуют о замыкании витков в пределах  $(0,2 \div 0,25)w_1$ . Точность предсказания может быть повышена изменением шага  $\Delta w_1$  и предварительной обработкой тестовых данных.

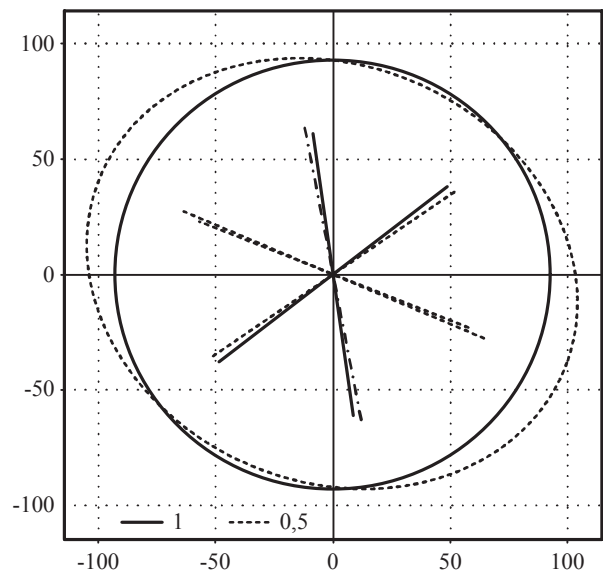


Рис. 3. Годографы вращающихся магнитных полей: для исправного и для испытуемого двигателей



# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методика диагностирования и идентификации неисправностей обмоток АД в режиме нормального функционирования, основанная на построении годографов векторов вращающихся магнитных полей и моделирования энергетических характеристик двигателя, работающего в симметричных и несимметричных режимах.

2. Разработаны алгоритм и программный комплекс, реализующие методику диагностирования и идентификации неисправностей обмоток АД.

3. Методика и программный комплекс позволяют диагностировать и идентифицировать неисправности обмоток АД с точностью не ниже 86,6%.

4. Методика и программный комплекс рекомендуются к применению в службах главного энергетика, электрикам цехов промышленных предприятий для периодического мониторинга функционирующих асинхронных электроприводов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электротехника: учеб. пособие для вузов. Э45 / под ред. В.С. Панитюшина. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1976. 560 с.
2. ГОСТ 8865-93. Системы электрической изоляции. Оценка неисправности и классификации.
3. ГОСТ 7217-87. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний.
4. Барков А.В., Борисов А.А. Современные возможности диагностирования машины с электроприводом по току двигателя // Металлургические процессы и оборудование. 2013. № 1 (31). С. 61-65.
5. Obaid R.R., Habelter T.G., Stack J.R. Stator current analysis for bearing damage detection in induction motors // The 4th IEEE International symposium on diagnostics for electrical machines, power electronics and drives, SDEMPED 2003. Proceedings. New Jersey. 2003. P. 182-187.

6. Silva J.L.H., Cardoso A.J.M. Bearing failures diagnosis in three-phase induction motors by extended Park's vector approach // The 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society (IECON). 2005. P. 2591-2596.
7. Onel I.Y., Dalci K.B., Senol I. Detection of outer raceway bearing defects in small induction motors using stator current analysis // Sadhana-Academy Proceedings in Engineering Sciences. 2005. Vol. 30 (6). P. 713-722.
8. Купцов В.В., Петушков М.Ю., Сарваров А.С. Современные методы диагностирования асинхронных двигателей и их развитие: монография. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. 247 с.
9. Брякин И.В., Бочкарев И.В., Келебаев К.К. Диагностика параметров электрических машин переменного тока // Электротехнические системы и комплексы. 2017. №4 (37). С. 38-44.
10. Малайон А.С., Малайон Н.В. Контроль энергетических характеристик асинхронных электроприводов с преобразователями частоты в условиях производства // Труды IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу. АЭП-2016. Пермь, 3-7 октябрь 2016. Пермь: Изд-во Перм. нац. иссл. политехн. ун-та 2016. С. 68-70.
11. Гурин Я.С., Кузнецов В.И. Проектирование серий электрических машин. М.: Энергия, 1978. 480 с.
12. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая шк., 1964. 480 с.
13. Bentley J.L. Multidimensional binary search trees used for associative searching // Communications of the ACM. 1975. Vol. 18 (9). P. 509-517.
14. Breiman L., Friedman J.H., Olshen R.A., Stone C.J. Classification and regression trees. Monterey, CA: Wadsworth & Brooks/Cole Advanced Books & Software. 1984. P. 368.
15. Cortes C., Vapnik V. Support-vector networks // Machine Learning. 1995. Vol. 20. P. 273-297.
16. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Саболенская Е.А. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с.

Поступила в редакцию 19 мая 2018 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### METHOD OF INDUCTIONS MOTOR MALFUNCTION DIAGNOSTICS AND IDENTIFICATION DURING OPERATION

Rif G. Mugalimov

D.Sc. (Eng.), Associate Professor, Professor, Department of Industrial Power Supply, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: Energosberegenie@rambler.ru.

Aliya R. Mugalimova

Ph.D. (Eng.), Engineer, Limited Liability Company MSTU – Energy Saving +, Magnitogorsk, Russia. E-mail: Energosberegenie@rambler.ru.

Yurij A. Kalugin

Undergraduate student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: py-ro74rus@gmail.com.

Konstantin E. Odintsov

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of Industrial Power Supply, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

The article contains an overview of methods for diagnostics of malfunctions in induction motors (IMs). Based on the review of information sources, it is shown that there are no methods, hardware or software complexes that make it possible to determine the malfunctions of windings of induction motors during their operation. In this paper, the technique that allows us

to determine the location of faults in the windings of an IM, as well as to predict the development of faults, is purposed. In this paper, scientific justification for the procedure of diagnostics for the development and identification of malfunctions in the windings of AD is given. The procedure is based on recording of real phase supply voltages, consumed currents, and simulating the



resultant rotating magnetic field of the motor on their basis, as well as energy characteristics and their subsequent comparison with the resulting rotating magnetic field of the engine with obviously serviceable and faulty windings on the grounds determining the distortions of the rotating magnetic field of the stator, and by the fault indicators of the windings. The investigation problem is formulated. The problem consists in developing diagnostic signs of malfunctions in the stator winding and rotor windings from the oscillograms of phase voltages and currents registered during normal operation of the electric drive. The criterion of problem solving is obtaining the identifiers (signs) of the short-circuiting malfunctions and conductor breaking of stator winding  $i$ -th phases, short-circuited rotor rod breaking and deteriorating of the motor magnetic system. The coordinates of the vector of the stator magnetic flux on the complex plane, which determine the shape of its hodograph; effective phase currents values, full, active and reactive powers, energy conversation efficiency and  $\cos \varphi$  values are taken as identifiers. The problem is solved by mathematical modeling of the resultant rotating magnetic field and its components in terms of the magnitude of the stator phase currents, magnetizing currents and rotor currents, as well as the values of the energy conversation efficiency and  $\cos \varphi$  of the asynchronous motor operating in symmetric and asymmetric modes. An example of the solution of the problem with the application of the proposed method and the developed software package is given.

**Keywords:** asynchronous motor, diagnostics, motor windings, motor winding malfunctions, simulation, identification, software complex.

#### REFERENCES

1. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. Textbook for universities. Ed. V.S. Panityushin. Moscow, 1976. 560 p. (In Russian)
2. GOST 8865-93. Electrical insulation systems. Malfunction evaluation and classification. (In Russian)
3. GOST 7217-87. Electric rotating machines. The engines are asynchronous. Test methods. (In Russian)
4. Barkov A.V., Borisov A.A. Possibilities of diagnostics for machines with electric drive using motor current. *Metallurgicheskie protsessy i oborudovanie* [Metallurgical processes and equipment]. 2013, no. 1 (31), pp. 61-65. (In Russian)
5. Obaid R.R., Habelter T.G., Stack J.R. Stator current analysis for bearing damage detection in induction motors. The 4th IEEE International symposium on diagnostics for electrical machines, power electronics and drives, SDEMPED 2003. Proceedings. New Jersey, 2003, pp. 182-187.
6. Silva J.L.H., Cardoso A.J.M. Bearing failures diagnosis in three-phase induction motors by extended Park's vector approach. The 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society (IECON). 2005, pp. 2591-2596.
7. Onel I.Y., Dalci K.B., Senol I. Detection of outer raceway bearing defects in small induction motors using stator current analysis. *Sadhana-Academy Proceedings in Engineering Sciences*. 2005, vol. 30(6), pp. 713-722.
8. Kuptsov V.V., Petushkov M.Yu., Sarvarov A.S. *Sovremennye metody diagnostirovaniya asinkhronnykh dvigatelej i ikh razvitiye* [Modern methods of asynchronous motor diagnostics]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2010. 247 p. (In Russian)
9. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Kelebaev K.K. Diagnostics of AC electrical machines. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2017, no. 4(37), pp. 38-44. (In Russian)
10. Malatsion A.S., Malatsion N.V. Control of power characteristics of induction motors equipped with frequency converter in manufacturing environment. *Trudy IX Mezhdunarodnoj (XX Vserossijskoj) konferentsii po avtomatizirovannomu ehlektroprivodu. AEHP-2016* [Proceedings of IX (XX All Russian) conference on automatic electric drive]. Perm, 3-7 October, 2016. Perm, 2016, pp. 68-70. (In Russian)
11. Gurin YA.S., Kuznetsov V.I., *Proektirovanie serij ehlektritcheskikh mashin* [Design of electrical machines]. Moscow: Energiya, 1978. 480 p. (In Russian)
12. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy ehlektrotekhniki* [Fundamentals of electrical engineering]. Moscow: Vysshaya shkola, 1964. 480 p. (In Russian)
13. Bentley J.L. Multidimensional binary search trees used for associative searching. *Communications of the ACM*. 1975, vol. 18 (9), pp. 509-517.
14. Breiman L., Friedman J.H., Olshen R.A., Stone C.J. Classification and regression trees. Monterey, CA: Wadsworth & Brooks/Cole Advanced Books & Software. 1984. P. 368.
15. Cortes C., Vapnik V. Support-vector networks. *Machine Learning*. 1995, vol. 20, pp. 273-297.
16. Kravchik A.Eh., Shlaf M.M., Afonin V.I., Sabolenskaya E.A. *Asinkhronnye dvigateli serii 4A* [Asynchronous motors of 4A series]. Moscow: Energoizdat, 1982. 504 p.

---

Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р., Калугин Ю.А., Одинцов К.Э. Методика диагностики и идентификации неисправностей обмоток асинхронного двигателя в режиме его функционирования // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 3(40). С. 70-78. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3\(40\)-70-78](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3(40)-70-78)

---



---

Mugalimov R.G., Mugalimova A.R., Kalugin Yu.A., Odintsov K.E. Method of Inductions Motor Malfunction Diagnostics and Identification During Operation. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 3(40), pp. 70-78. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3\(40\)-70-78](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3(40)-70-78)

---