

## Исследование угловой скорости и магнитного поля при дефектах асинхронных электродвигателей

И.О. Бельский<sup>a</sup>, И.С. Куприянов<sup>b</sup>, А.В. Лукьянов<sup>c</sup>

Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского 15, Иркутск, Россия

<sup>a</sup>igor92@gmail.com, <sup>b</sup>xpress14@mail.ru, <sup>c</sup>loukian@inbox.ru

<sup>a</sup><https://orcid.org/0000-0003-0804-3083>, <sup>b</sup><https://orcid.org/0000-0003-4312-3644>

<sup>c</sup><https://orcid.org/0000-0002-5077-5408>

Статья поступила 2.11.2018, принята 12.11.2018

*Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором — наиболее распространенный класс электрических машин в машиностроении, а также в других отраслях промышленности. Асинхронные двигатели являются частью оборудования, не имеющего резерва, поэтому остро встает вопрос об определении их фактического состояния и остаточного ресурса. Имеющиеся способы диагностики безразборного контроля по параметрам питающей сети являются, по сути, лишь средствами защиты от аварий. В статье рассматриваются вопросы безразборного контроля технического состояния асинхронных электродвигателей и диагностики развивающихся дефектов во время их эксплуатации. Это особенно важно при использовании асинхронных электродвигателей в автоматизированных производственных комплексах современного машиностроения, вывод которых из эксплуатации по причине поломки или диагностики сопряжен с большими экономическими потерями. В качестве диагностических параметров асинхронных электродвигателей могут рассматриваться флуктуации угловой скорости вращения ротора и изменение характеристик внешнего магнитного поля. В этой связи исследованы вопросы изменения спектральных характеристик внешнего магнитного поля и угловой скорости вращения ротора асинхронного электродвигателя в зависимости от развития таких дефектов, как несимметрия тока в фазах, межвитковое замыкание в обмотках статора, обрыв стержней ротора. Полученные теоретические и экспериментальные результаты показывают, что развитие данных дефектов вызывает флуктуации скорости вращения и момента на валу электродвигателя. Развитие дефектов сопровождается деформацией круговой диаграммы внешнего магнитного поля. Дальнейшее исследование этих явлений и предложенный способ диагностики технического состояния асинхронных машин позволят выявлять указанные дефекты на ранней стадии развития, а также предотвращать внезапный выход технологического оборудования из строя.*

**Ключевые слова:** асинхронный электродвигатель; угловая скорость вращения ротора; спектр внешнего магнитного поля; межвитковое замыкание; несимметрия; обрыв стержней ротора.

## Research of angular velocity and magnetic field at defects development of asynchronous electric motors

I.O. Belsky<sup>a</sup>, I.S. Kupriyanov<sup>b</sup>, A.V. Lukyanov<sup>c</sup>

Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia

<sup>a</sup>igor92@gmail.com, <sup>b</sup>xpress14@mail.ru, <sup>c</sup>loukian@inbox.ru

<sup>a</sup><https://orcid.org/0000-0003-0804-3083>, <sup>b</sup><https://orcid.org/0000-0003-4312-3644>

<sup>c</sup><https://orcid.org/0000-0002-5077-5408>

Received 2.11.2018, accepted 12.11.2018

*Asynchronous electric motors with squirrel-cage rotor are the most common class of electric machines. They are widely used in engineering, transport and other industries. Since asynchronous motors are a part of equipment that does not have a reserve, there is an urgent need to determine their actual state and residual resource. The available methods of diagnostics of indiscriminate control over the parameters of the power supply network are just a means of protection against accidents. The article deals with the issues of indiscriminate control of the technical state of asynchronous electric motors and the diagnosis of developing defects during their operation. This is especially important when using asynchronous electric motors in automated industrial complexes of modern engineering, which are subject to large economic losses for decommissioning due to breakdowns or diagnostics. Fluctuations of the angular velocity of rotation of the rotor and the change in the characteristics of an external magnetic field can be considered as diagnostic parameters for asynchronous electric motors. In this regard, the issues of changing the spectral characteristics of an external magnetic field and the angular velocity of the rotor of an asynchronous motor depending on the development of such defects as current unbalance in phases, inter-turn short circuit in the stator windings, breakage of the rotor rods are investigated. The obtained theoretical and experimental results show that the development of these defects causes fluctuations in the speed of rotation and torque on the motor shaft. The development of defects is accompanied by the deformation of a circular diagram of an external magnetic field. Further study of these phenomena and the proposed method for diagnosing the technical state of asynchronous machines will make it possible to identify these defects at an early stage of development, as well as to prevent the sudden breakdown of process equipment.*

**Keywords:** asynchronous electric motor; rotor angular velocity; external magnetic field spectrum; inter-turn closure; asymmetry; breakage of rotor rods.

## Введение

Асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором являются наиболее распространенным классом электрических машин, преобразующих электрическую энергию в механическую. Это обусловлено простотой их конструкции, высокой надежностью и низкой стоимостью. Они наиболее широко применяются в современном машиностроении, на транспорте и в других отраслях промышленности. Использование АД в машинном оборудовании, не имеющем резерва, требует разработки систем контроля их технического состояния и диагностики развивающихся дефектов при эксплуатации без остановки и разборки. Это позволяет перейти на обслуживание и ремонт машин по фактическому состоянию, предотвратить аварийные ситуации и снизить издержки на unplanned ремонты [1; 2].

**Контроль параметров внешнего магнитного поля.** Наиболее распространенными видами дефектов АД в машиностроении являются [3]:

- обрыв стержня «беличьей клетки» ротора;
- межвитковое замыкание обмотки статора;
- обрыв фазы питающего напряжения.

При питании АД от переменного тока в статоре электродвигателя возникает вращающееся магнитное поле, силовые линии которого пронизывают обмотки статора и ротора.

Чтобы выяснить влияние дефектов на работу АД, рассмотрим магнитное поле электрической машины с произвольным числом  $S$  контуров обмоток в статоре и роторе. Магнитную цепь машины будем считать линейной (имеет место при бесконечно большой магнитной проницаемости сердечников). Тогда ее магнитное поле при заданных токах в контурах  $i_m$ , где  $m = 1, 2, \dots, S$  можно определить в виде суммы частичных полей, каждое из которых образовано током только одного контура  $i_m$ . Тогда суммарный магнитный поток всех витков катушки, или потокосцепление этого поля с контуром  $k$  складывается из магнитных потоков  $\Phi_{mk(j)}$  через поверхности  $S_{kj}$ , опирающиеся на отдельные витки контура с индексами  $j = 1, 2, \dots, w_k$ , где  $w_k$  — число витков одной фазы обмотки статора [4]:

$$\Psi_{mk} = \sum_{j=1}^{w_k} \Phi_{mk(j)}, \quad (1)$$

где  $\Phi_{mk(j)} = \int_{S_{kj}} B_n dS$  — магнитный поток витка  $j$  контура  $k$ ;  $B_n = \vec{B} \cdot \vec{n}$ ;  $\vec{n}$  — нормаль к поверхности.

Поскольку у бездефектной машины магнитный поток всех витков контура одинаков,  $\Phi_{k1} = \Phi_{k2} = \dots = \Phi_{kj} = \Phi_{mk} = \text{const}$ , тогда суммарный магнитный поток обмотки можно принять равным [4; 5]:

$$\Psi_{mk} = w_k \Phi_{mk}, \quad (2)$$

где  $\Phi_{mk}$  — поток, сцепленный с одним из витков.

Взаимная индуктивность  $L_{mk}$  между двумя контурами  $m$  и  $k$  есть отношение потокосцепления  $\Psi_{mk}$

магнитного поля, образованного током  $i_m$  в контуре  $m$ , с контуром  $k$  [5; 6]:

$$L_{mk} = \frac{\Psi_{mk}}{i_m}. \quad (3)$$

Как видно из уравнения (3), главную индуктивность фазы можно определить главным потокосцеплением, образованным током в этой фазе. Для этого примем, что в фазе в положительном направлении по синусоидальному закону протекает амплитудный ток  $i_\phi = \sqrt{2}I_\phi$ . Тогда амплитуда основной гармонической МДС фазы, определяется по формуле [5]:

$$F_\phi = \frac{2\sqrt{2}I_A w_1 k_1}{\pi p}, \quad (4)$$

где  $k_1, k_2$  — обмоточный коэффициент;  $p$  — количество полюсов машины.

МДС образует в зазоре распределенное магнитное поле взаимной индукции, индукция которого на оси фазы равна [5; 7]:

$$B_\phi = \mu_0 F_\phi \lambda_0 = \frac{2\sqrt{2}I_A k_1 \mu_0}{\pi p \delta k_\delta}, \quad (5)$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная;  $\delta$  — воздушный зазор между ротором и статором;  $k_1, k_2$  — обмоточные коэффициенты;  $\lambda_0$  — проницаемость магнитного воздушного зазора;  $k_\delta$  — коэффициент воздушного зазора.

Определим потокосцепление магнитного поля с фазой. Поскольку обмотка фазы есть контур с произвольным числом витков, можно вычислить главную индуктивность, исходя из общего определения [8]:

$$L_\phi = \frac{\Psi_\phi}{i_\phi} = \frac{2}{\pi} (w_1 k_1)^2 \frac{\tau l_\delta}{\delta k_\delta}, \quad (6)$$

где  $l_\delta$  — длина сердечника ротора;  $\Psi_\phi$  — потокосцепление обмотки фазы;  $\tau = \frac{\pi \cdot D_{\text{вн}}}{p}$  — полюсное деление.

Взаимная индуктивность между фазой статора и ротором зависит от косинуса электрического угла между осями рассматриваемых фаз первичной и вторичной обмоток. Кроме того, при определении потокосцепления поля фазы А обмотки статора с фазой b обмотки ротора необходимо учесть, что фаза обмотки ротора имеет иное число витков  $w_2$  и другой обмоточный коэффициент  $k_2$ .

Если электрический угол между осями фаз А и b равен в данный момент  $\alpha_{bA}$ , то потокосцепление с фазой b определяется [8; 9]:

$$\Psi_{bAm} = w_2 k_2 \Phi_m \cos \alpha_{bA} = \Psi_{aAo} \cos \alpha_{bA}. \quad (7)$$

Тогда максимальная взаимная индуктивность между статором и ротором  $L_m$  будет [8; 9]:

$$L_m = \frac{4 \cdot \mu_0}{p \pi^2} (w_1 k_1 w_2 k_2) \frac{\tau l_\delta}{\delta k_\delta}. \quad (8)$$

Соответственно, главная взаимная индуктивность между фазами А и b определяется выражением:

$$L_{bA} = \frac{\Psi_{bAm}}{i_A} = L_m \cos \alpha_{bA}. \quad (9)$$

Тогда результирующим магнитный поток в воздушном зазоре машины  $\Phi_{mk}$  от фазы статора для всего контура при  $k_\delta \delta = const$  будет:

$$\Phi_m = \frac{4 \cdot \mu_0}{p\pi^2} \tau l_\delta B. \quad (10)$$

Учитывая (10), перепишем уравнение для потокоцепления машины:

$$\begin{aligned} \Psi_\phi &= w_1 k_1 w_2 k_2 \Phi_m \cos \alpha_{bA} = \\ &= \frac{4 \cdot \mu_0}{p\pi^2} \tau l_\delta w_1 k_1 w_2 k_2 B \cos \alpha_{bA}. \end{aligned} \quad (11)$$

Отсюда магнитная индукция машины:

$$B = \frac{\Psi_\phi i_A \pi^2 p \cos \alpha_{bA}}{4 l_\delta w_1 k_1 w_2 k_2 \tau}. \quad (12)$$

Как видно из выражения (12), индукция внешнего магнитного поля (ВМП) бездефектного электродвигателя имеет одинаковую амплитуду и установившуюся симметричную форму распределения по всей окружности вращения ротора. При возникновении дефектов симметрия ВМП нарушится [10]. При обрыве стержней «беличьей клетки» в момент прохождения дефектной частью ротора полюса машины амплитуда магнитного поля будет увеличиваться. Изменится величина момента, а значит, будет изменяться и угловая скорость вращения ротора (УСВР). При межвитковых замыканиях обмотки статора магнитное поле будет изменяться в месте расположения дефектной обмотки из-за сокращения количества витков.

Для проверки теоретических выводов были проведены экспериментальные исследования зависимости изменения ВМП и УСВР от вида и степени развития дефекта. Измерения проводились на общепромышленном АД с короткозамкнутым ротором АИР63В4 с характеристиками [11], представленными в таблице.

#### Характеристики электродвигателя

Характеристика	Значение
Мощность, кВт	0,37
КПД, %	68
Число пар полюсов	2
Частота вращения, об/мин	1 500
Cos φ	0,7
Момент инерции ротора, кг·м <sup>2</sup>	0,0014
Скольжение, %	8,7
Сопrotивление обмотки статора, Ом	21,5

Реализация предложенного авторами способа контроля АД основана на регистрации ВМП рассеяния электродвигателя. Измерения проводились при помощи разработанной многоканальной системы, позволяющей производить регистрацию ВМП рассеяния и УСВР АД [12–15].

Для измерения УСВР был разработан дополнительный модуль, включающий оптический датчик щелевого типа TCST2103.

Для регистрации ВМП рассеяния были использованы датчики Холла, для записи сигналов от датчиков угловой скорости вращения и ВМП рассеяния применялась многоканальная (12+1 каналов) система регистрации (рис. 1).

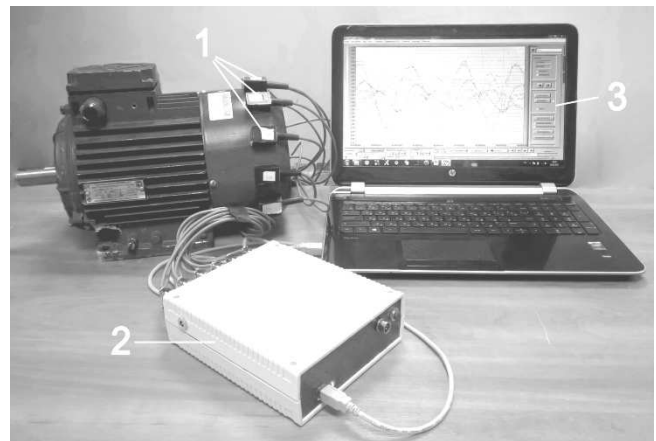


Рис. 1. Многоканальная система: 1 — датчики магнитного поля на корпусе АД (12 шт.); 2 — измерительный блок; 3 — ПК с программой визуализации

Данная система включает в себя многоканальный усилитель аналогового сигнала с блоком фильтров и АЦП с частотой выборки 400 кГц, позволяющий производить точные измерения параллельно по всем измерительным каналам. Усилительный каскад с регулируемым коэффициентом усиления осуществляет измерение напряженности ВМП АД различной мощности, малогабаритные датчики позволяют производить диагностику АД различных габаритов. Калибровка измерительной части проводилась согласно методике, описанной в [16].

**Дефект «межвитковое замыкание обмотки статора».** На данный вид дефекта, по разным данным, приходится от 20 до 40 % от общего числа неисправностей АД. Причинами межвитковых замыканий могут служить повышенные нагрузки на валу АД, брак изготовления обмоток или нанесения изоляции, износ или старение изоляции обмоток, неправильная эксплуатация и хранение АД.

На рис. 2 представлен временной сигнал ВМП рассеяния в месте расположения дефекта.

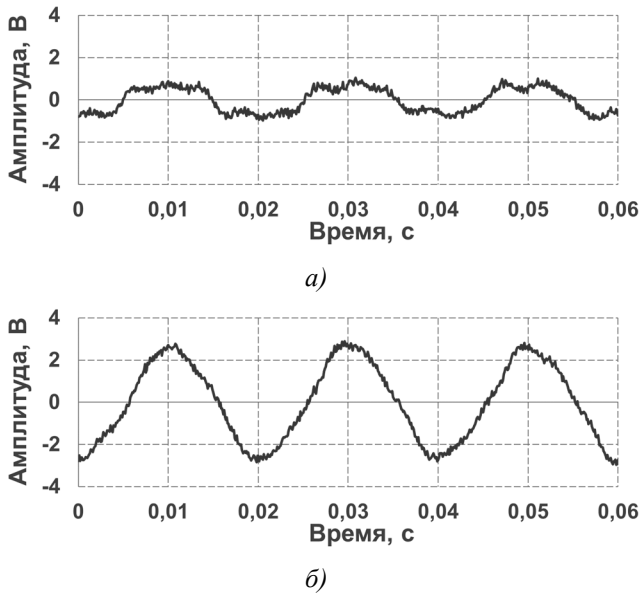


Рис. 2. Временной сигнал ВМП рассеяния без замыкания (а) и с замыканием шести витков (б)

При увеличении количества замкнутых витков уменьшается сопротивление обмотки, и происходит увеличение силы протекающего тока [17], что влияет на распределение ВМП рассеяния в месте расположения дефекта. Амплитуда временного сигнала ВМП увеличивается, изменяется его форма, так как на распределение магнитного поля начинает влиять магнитное поле, создаваемое обмотками других фаз, расположенных рядом с точкой измерения. На рис. 3 представлен график зависимости амплитуды ВМП рассеяния, измеренного в месте расположения дефекта, от количества замкнутых проводников. Здесь и далее амплитуда ВМП представлена в размерности сигнала с датчиков ( $1 \text{ В} = 46 \text{ А/м}$ ).

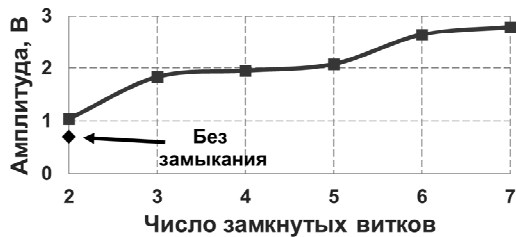


Рис. 3. Зависимость амплитуды ВМП от числа замкнутых проводников

Для того чтобы оценить влияние развития дефекта на частотный состав ВМП рассеяния рассмотрим разностный спектр, полученный как разница между спектром АД с дефектом и при работе в нормальном режиме (рис. 4).

При межвитковом замыкании наблюдается рост амплитуды гармоники линейной частоты сети 50 Гц из-за увеличения тока при уменьшении электрического сопротивления обмотки. Происходит также смещение гармоники частоты 240,48 на 0,18 Гц из-за изменения частоты скольжения ротора АД при нарушении симметрии ВМП.

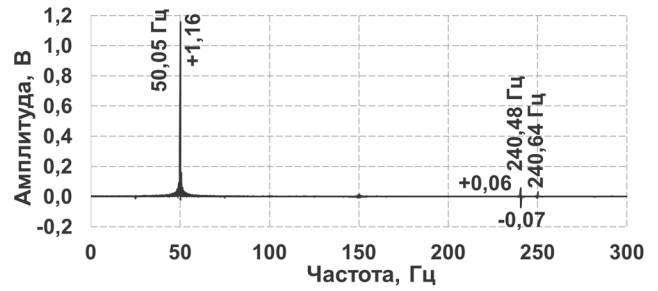


Рис. 4. Разностный спектр ВМП в месте замыкания шести витков

При увеличении дефекта на противоположном конце обмотки, расположенном со смещением  $90^\circ$  относительно места расположения дефекта, наблюдаются уменьшение амплитуды сигнала ВМП и модуляция формы временного сигнала магнитным полем обмоток фаз, расположенных рядом с дефектной.

На рис. 5 представлен разностный спектр временного сигнала ВМП между спектром АД с дефектом и спектром при работе в нормальном режиме в части обмотки, смещенной на  $90^\circ$  относительно места расположения замыкания шести витков.

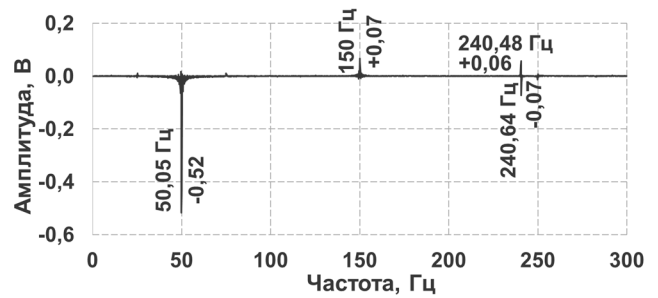


Рис. 5. Разностный спектр временных сигналов ВМП в месте замыкания шести витков

С развитием дефекта происходят уменьшение амплитуды 1-й гармоники частоты сети 50 Гц и рост амплитуды 3-й гармоники 150 Гц. Это связано с наведением на дефектную обмотку магнитных полей от обмоток двух других фаз, векторы намагничивающих сил которых смещены на  $30^\circ$  относительно расположения дефектной обмотки.

На рис. 6 представлено распределение угловой скорости вращения ротора АД от угла поворота ротора при отсутствии и при замыкании шести витков в одной из обмоток статора.

График иллюстрирует возникновение импульсов скорости вращения в фиксированных точках ( $2\pi$ ) углов поворота ротора. Уменьшение УСВР при протекании тока по дефектной обмотке и ее последующий импульс связаны с резким увеличением протекающего тока и магнитодвижущей силы обмотки статора в месте расположения замыкания. Это позволяет локализовать место расположения дефекта.

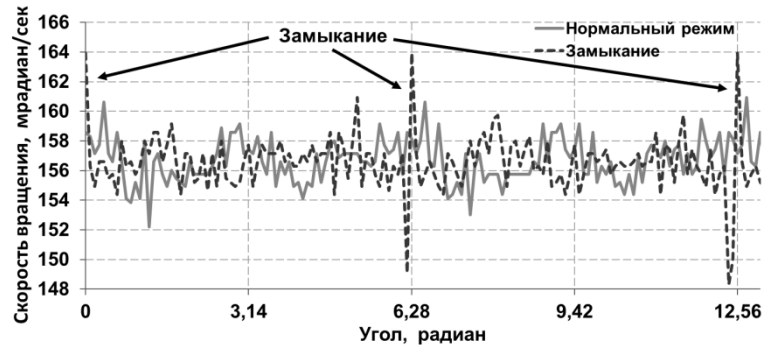


Рис. 6. График угловой скорости вращения ротора

**Дефект «обрыв стержней ротора».** Обрыв или трещины в месте крепления стержней короткозамкнутого ротора («беличьей клетки») связаны с перегревом и знакопеременными деформациями в местах соединения стержней с короткозамкнутыми кольцами. Оборванные стержни, изгибаясь под действием центробежных сил, могут повредить изоляцию лобовых частей АД, привести к межвитковым и межфазным замыканиям или задеванию ротора о статор. При появлении дефекта ВМП перестает равномерно вращаться и приобретает пульсирующий характер. Появляется пульсация момента и скорости вращения ротора. Из-за перераспределения тока в «беличьей клетке» увеличивается ток, протекающий по исправным стержням [18], возрастает механическая и тепловая нагрузка. Однако этот дефект проявляется только при возникновении нагрузки на ротор.

Влияние дефекта на распределение временного сигнала ВМП АД представлено на рис. 7.

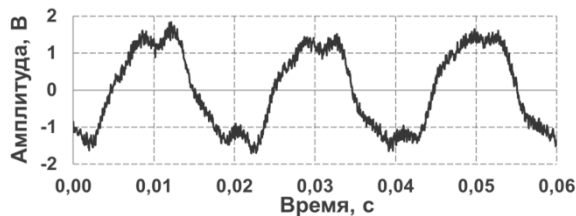


Рис. 7. Временной сигнал ВМП рассеяния при обрыве одного стержня

В поврежденном стержне отсутствует ток, в момент прохождения стержня через полюс в АД происходит насыщение зубцов сердечника ротора, расположенных вблизи поврежденного стержня. Происходят увеличение амплитуды тока в обмотке статора, модуляция временного сигнала и увеличение амплитуды ВМП. Спектр временного сигнала при возникновении дефекта «обрыв стержня ротора» представлен на рис. 8.

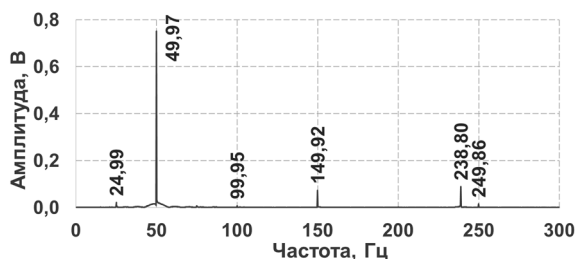


Рис. 8. Спектр ременного сигнала ВМП при обрыве стержня

При обрыве стержня ротора наблюдается рост амплитуд 1-й (50 Гц) и 3-й (150 Гц) гармоник частоты сети. Измерение УСВР при данном дефекте на АД, работающем в режиме холостого хода, не показало отклонений от нормального режима работы.

Была разработана конечно-элементная (КЭ) модель реального АД [19] при возникновении и развитии данного дефекта. Производился КЭ расчет магнитных параметров АД при разной степени развития дефекта в режимах номинальной нагрузки и холостого хода. На рис. 9 приведен график скорости вращения ротора при работе АД с дефектом «обрыв стержня ротора» при отсутствии нагрузки и под нагрузкой.

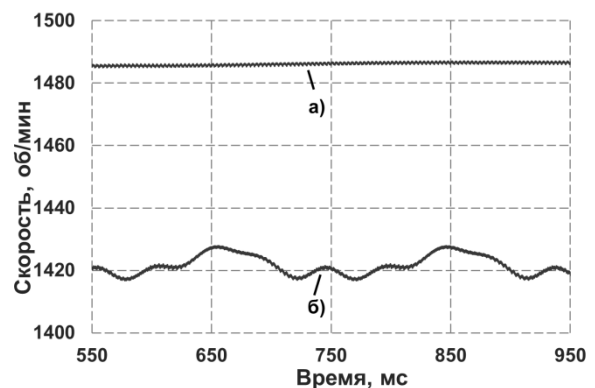


Рис. 9. График УСВР при обрыве стержня и работе без нагрузки (а) и под нагрузкой (б)

Возникновение дефекта в отсутствие нагрузки на валу не изменяет скорость вращения ротора. При развитии дефекта и работе АД под номинальной нагрузкой возрастает скольжение, что приводит к флуктуациям скорости вращения.

Для бездефектного АД частота скольжения равна 0,94 %, с появлением дефекта: в случае работы без нагрузки — 0,93 %, под нагрузкой — 4,87 %.

В результате моделирования работы АД можно сделать вывод, что диагностирование по УСВР дефекта «обрыв стержней ротора» возможно только при наличии нагрузки на валу АД. КЭ моделирование магнитных параметров АД показало, что после обрыва одного стержня дефект развивается на следующем по ходу вращения ротора стержне. Уровень дефектных стержней (обрыв) 25–30 % является критическим. При этом двигатель не может выйти на номинальный режим работы.

**Дефект «обрыв фазы питающего тока».** Проведенные экспериментальные исследования показали, что при возникновении данного дефекта происходит уменьшение амплитуды ВМП в местах расположения обмотки оборванной фазы. Это связано с отсутствием

протекающего по ней тока [20]. В то же время, в результате перераспределения тока уровень ВМП обмоток других фаз возрастает [9]. Влияние данного режима работы на УСВР АД представлено на рис. 10.

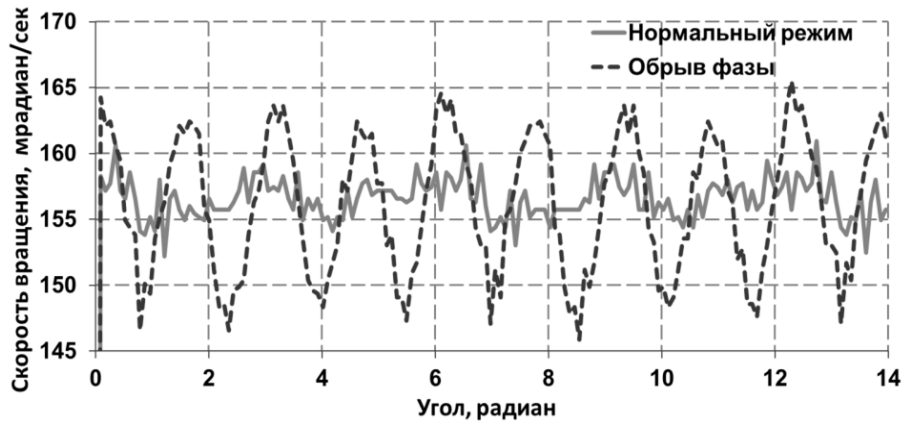


Рис. 10. График изменения угловой скорости ротора от угла поворота

Как видно на графике УСВР, возникающие импульсы за период вращения соответствуют числу полюсов. Графики круговых диаграмм УСВР (рис. 11) при обрыве каждой из фаз показывают, что угловая скорость уменьшается при проходе ротора через место расположения обмотки дефектной фазы каждого по-

люса и увеличивается при прохождении через обмотки двух других фаз.

На рис. 12 представлено распределение ВМП рассеяния при обрыве каждой из фаз, измеренное в местах расположения обмоток всех трех фаз каждого из 4-х полюсов АД (12 точек).

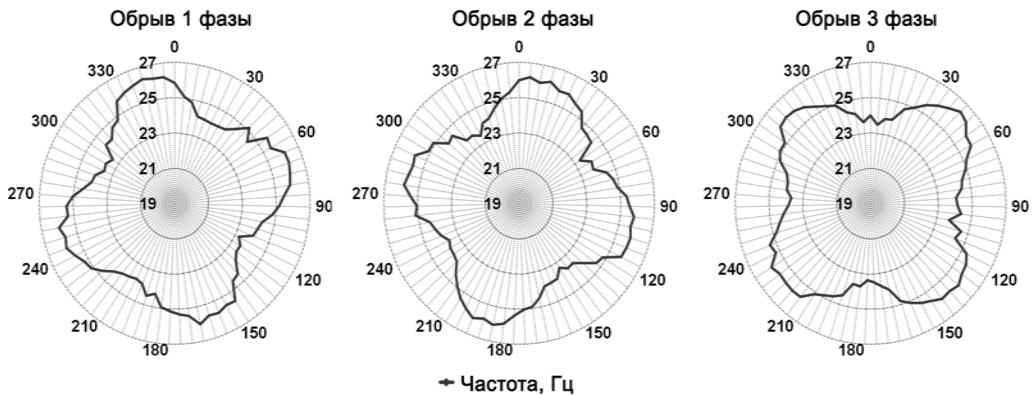


Рис. 11. Круговые диаграммы распределения УСВР при обрыве трех фаз



Рис. 12. Диаграммы распределения ВМП

Круговые диаграммы на рис. 11 и 12 показывают, что распределение УСВР и ВМП рассеяния имеют взаимосвязанный характер. При обрыве фазы распре-

### Заключение

Проведено исследование теоретических принципов диагностирования АД на основе анализа параметров его УСВР и ВМП. Особое внимание уделено вопросам определения зависимости УСВР и ВМП электродвигателя от наличия и степени развития различных дефектов АД.

Данные экспериментальных исследований позволили выявить зависимости УСВР и параметров ВМП рассеяния АД. Определены диагностические признаки дефектов: межвитковое замыкание обмотки статора, обрыв стержня ротора. В ходе работы доказана связь между УСВР и ВМП электродвигателя и видом дефекта. Дополнение диагностического признака ВМП данными датчика УСВР повышает достоверность диагностирования электрических дефектов АД.

### Литература

1. Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Ковалев А.В. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник. М.: Машиностроение, 2005. 1017 с.
2. Nandi S., Toliyat H.A., Xiaodong L. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors—A review // IEEE Trans. Energy Convers. 2005. Vol. 20, № 4. P. 719–729.
3. М. Е. Н. Benbouzid, “Bibliography on induction motors faults detection and diagnosis,” IEEE Trans. EnergyConvers. 1999. Vol. 14. № 4. P. 1065–1074.
4. Теоретические основы электротехники: электрические цепи М.: 1978. 528 с.
5. Копылов И.П., Константинович К.Б. Проектирование электрических машин. 4 издание, переработанное и дополненное. М.: Юрайт, 2011.
6. Коголь И.М., Дубовицкий Г.П., Бородяно В.Н., Гун В.С., Клиначев Н.В., Крымский В.В., Эргард А.Я., Яковлев В.Н. Электротехника. Челябинск, 2006.
7. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1978. 832 с.
8. Шубов И.Г. Шум и вибрация электрических машин. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние. 1986. 208 с.
9. Лукьянов А.В., Романовский А.И., Лукьянов Д.А. Динамика асинхронного привода при несимметрии тока в фазах // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2010. № 3 (27). С. 96–102.
10. Тонких В.Г. Исследование процессов изменения формы внешнего магнитного поля электродвигателя при развитии в нем различных дефектов // Измерение, контроль, информатизация: материалы Девятой междунар. науч.-технической конф. Барнаул, 2006. 56 с.
11. Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболевская Е.А. Асинхронные двигатели серии 4А. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с.
12. Лукьянов А.В., Мухачев Ю.С., Бельский И.О. Исследование комплекса параметров вибрации и внешнего магнитного поля в задачах диагностики асинхронных электродвигателей // Системы Методы Технологии. 2014. № 2 (22). С. 61-69.
13. Бельский И.О., Лукьянов А.В. Исследование параметров внешнего магнитного поля асинхронных электродвигателей при несимметрии фаз питающего тока // Современные

деление ВМП становится неравномерным, что влияет на угловую скорость вращения при проходе ротора через место расположения обмоток оборванной фазы. технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016, № 2 (50). С. 186-192.

14. Бельский И.О., Куприянов И.С., Лукьянов А.В. Исследование параметров внешнего магнитного поля в задачах диагностики асинхронных электродвигателей // Материалы Восьмой междунар. науч.-практической конф. «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» 28 марта – 1 апр. 2017 г. Иркутск, 2017. Т. 2. С. 536-542.

15. Бельский И.О., Лукьянов А.В. Исследование параметров внешнего магнитного поля в задачах диагностики асинхронных электродвигателей // Материалы VI междунар. конф. «Проблемы механики современных машин», 29 июня - 4 июля 2015 г. Улан-Удэ, 2015. Т.1. С. 8-14.

16. Лукьянов А.А., Мухачев Ю.С., Бельский И.О., Савватеев А.А. Лабораторный стенд для регистрации магнитных полей рассеяния трехфазных асинхронных электродвигателей // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы четвертой всерос. науч.-практической конф. с междунар. участием. Иркутск, 2013. Т. 1. С. 279-283.

17. Никиян Н.Г., Омон А.Б. Электромагнитные процессы и токи трехфазного асинхронного двигателя при межвитковых коротких замыканиях // Электричество. 2010. № 5. С. 53-56.

18. Бельский И.О. Численное моделирование параметров магнитного поля при обрыве стержней электродвигателей машиностроительного производства // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2018. Т. 57, № 1. С. 60-70.

19. Tavner P., Ran L., Penman J., Sedding H. Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines, 2nd ed. Stevenage, U.K.: IET, 2008.

20. Дьяконов В.П. MATLAB 6.0/6.1/6.5+SP1 + Simulink 4/5. Обработка сигналов и изображений. М.: СОЛОН - Пресс, 2005. 592 с.

### References

1. Klyuev V.V., Sosnin F.R., Kovalev A.V. Nondestructive testing and diagnostics: spravochnik. M.: Mashinostroenie, 2005. 1017 p.
2. Nandi S., Toliyat H.A., Xiaodong L. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors - A review // IEEE Trans. Energy Convers. 2005. Vol. 20, № 4. P. 719-729.
3. M.E.N. Benbouzid. Bibliography on induction motors faults detection and diagnosis. IEEE Trans. Energy Convers. 1999. Vol. 14. № 4. P. 1065-1074.
4. Teoreticheskie osnovy ehlektrotekhniki: ehlektricheskie cepi. M., 1978. 528 s.
5. Kopylov I.P., Konstantinovich K.B. Design of electric cars. 4 izdanie, pererabotannoe i dopolnennoe. M.: Yurajt, 2011.
6. Kogol' I.M., Dubovickij G.P., Borodyanko V.N., Gun V.S., Klinachev N.V., Krymskij V.V., Ergard A.Ya., Yakovlev V.N. Electrical Engineering: ucheb.-metodicheskij kompleks. Chelyabinsk, 2006.
7. Vol'dek A.I. Electric machinery. L.: Energiya, 1978. 832 p.
8. Shubov I.G. Noise and vibration of electric mashinery. L.: Energoatomizdat. Leningr. otd-nie. 1986. 208 p.
9. Luk'yanov A.V., Romanovskij A.I., Luk'yanov D.A. Dynamics of asynchronous drive with current unbalance in phases // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2010. № 3 (27). P. 96-102.

10. Tonkih V.G. The study of the processes of change in the shape of the external magnetic field of an electric motor with the development of various defects // *Izmerenie, kontrol', informatizaciya: materialy Devyatoj mezhdunar. nauch.- tekhnicheskoy konf. Barnaul, 2006.* 56 p.
11. Kravchik A.Eh., Shlaf M.M., Afonin V.I., Sobolevs-kaya E.A. 4A Series Asynchronous Motors. M.: Energoizdat, 1982. 504 p.
12. Luk'yanov A.V., Muhachev Yu.S., Bel'skij I.O. Researching the complex of vibration parameters and external magnetic field in the problems of diagnostics of asynchronous electric motors // *Systems Methods Technologies.* 2014. № 2 (22). P 61-69.
13. Bel'skij I.O., Luk'yanov A.V. Research parameters of external magnetic field of asynchronous electric motors with unbalanced supply current // *Modern technologies. System analysis. Modeling.* 2016. № 2 (50). P. 186-192.
14. Bel'skij I.O., Kupriyanov I.S., Luk'yanov A.V. Researching the complex of vibration parameters and external magnetic field in the problems of diagnostics of asynchronous electric motors // *Materialy Vos'moj mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona» 28 marta- 1 apr.2017 g. Irkutsk, 2017.* T. 2. P. 536-542.
15. Bel'skij I.O., Luk'yanov A.V. Researching the complex of vibration parameters and external magnetic field in the problems of diagnostics of asynchronous electric motors // *Materialy VI mezhdunar.j konf. «Problemy mekhaniki sovremennyh mashin», 29 iyunya - 4 iyulya 2015 g. Ulan-Udeh, 2015.* T. 1. P. 8-14.
16. Luk'yanov A.A., Muhachev Yu.S., Bel'skij I.O., Savvateev A.A. Laboratory stand for registration of magnetic stray fields of three-phase asynchronous electric motors // *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona: materialy chetvertoj vseros. nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem. Irkutsk, 2013.* T. 1. P. 279-283.
17. Nikiyan N.G., Omon A.B. Electromagnetic processes and currents of a three-phase asynchronous motor during interturn short circuits // *Elektrichestvo.* 2010. № 5. P. 53-56.
18. Bel'skij I.O. Numerical modeling of magnetic field parameters of the asynchronous electric motors with broken bars in machine-building production // *Modern technologies. System analysis. Modeling.* 2018. T. 57, № 1. P. 60-70.
19. Tavner R., Ran L., Penman J., Sedding H. Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines, 2nd ed. Stevenage, U.K.: IET, 2008.
20. D'yakonov V.P. MATLAB 6.0/6.1/6.5+SP1 + Simulink 4/5. Signal and Image Processing. M.: SOLON- Press, 2005. 592 p.

УДК 519.63

DOI: 10.18324/2077-5415-2018-4-69-75

## Разработка эффективных огнезащитных покрытий для специализированных лесных машин

А.С. Устинов<sup>a</sup>, Е.А. Питухин<sup>b</sup>

Петрозаводский государственный университет, пр. Ленина 33, Петрозаводск, Республика Карелия

<sup>a</sup>anton-ustinov@psu.karelia.ru, <sup>b</sup>Eugene@petrsu.ru

<sup>a</sup><https://orcid.org/0000-0002-5254-0549>, <sup>b</sup><https://orcid.org/0000-0002-7021-2995>

Статья поступила 19.10.2018, принята 7.11.2018

*Статья посвящена созданию эффективных огнезащитных покрытий для специализированных лесных машин, которые работают в чрезвычайных ситуациях, подвергаются тепловому воздействию при тушении лесных пожаров. Одним из путей решения данного вопроса является разработка технологии приготовления и применения композитов, после нанесения которых на защищаемую поверхность замедляется ее прогрев. Отличие большинства композитных материалов (КМ) от традиционных состоит в том, что процесс их изготовления может быть совмещен с процессом изготовления изделия. Жидкое натриевое стекло в качестве связующего ценно такими свойствами, как экологическая чистота производства и применения, негорючесть и нетоксичность, а также дешевизна и доступность исходного материала. Обладая высокими адгезионными свойствами, жидкое стекло хорошо склеивает различные материалы. Применение графита в качестве наполнителя обусловлено его высокой термической и химической стойкостью. Получены образцы жидкостекляного КМ с частицами наполнителя (графита) размером 1–10 мкм. Подобрано соотношение компонентов, при котором образцы сохраняют свои адгезионные свойства и не разрушаются при нагреве до температуры 718°C. Установлено, что образцы КМ обладают повышенной термостойкостью и способны сохранять неизменным химическое строение при нагреве до 718°C, что подтверждено методами терморавиметрии, рентгеноструктурного анализа и электронной микроскопии. Определен предел огнестойкости предложенного огнезащитного КМ по потере теплоизолирующей способности на уровне И15, установлен его состав в начальном состоянии, на промежуточных стадиях процесса нагрева и состав остатка. В результате исследования адгезионных, теплоизоляционных и огнестойких свойств нового композита показано, что предлагаемый огнезащитный материал с полученными характеристиками может использоваться в качестве защитного покрытия для лесопожарных машин.*

**Ключевые слова:** композитный материал; тепловое воздействие; тепловая защита; лесопожарные машины.