



4. Verigo M. F., Kogan A. Ya. Vzaimodeistvie puti i podvizhnogo sostava [The interaction of the track and rolling stock]. In Verigo M.F. (ed.). Moscow: Transport Publ., 1986. 559 p.
5. Danilov V.N. Zheleznodorozhnyi put' i ego vzaimodeistvie s podvizhnym sostavom [Railroad track and its interaction with rolling stock]. Moscow: Transzheldorizdat Publ., 1961. 111 p.
6. Petrov G. I. Otsenka bezopasnosti dvizheniya vagonov pri otkloneniyakh ot norm soderzhaniya khodovykh chastei i puti. Diss...dokt. tekhn nauk [Assessment of the safety of movement of cars with deviations from the norms of maintenance of running gears and tracks. D. Sci. (Engineering) diss.]. Moscow: MIIT Publ., 2000. 348 p.
7. Verigo M.F. Dinamika vagonov [The dynamics of cars]. Moscow, 1971. 176 p.
8. Mikhail'chenko G.S., Pogorelov D. Yu., Simonov V.A. Sovershenstvovanie dinamicheskikh kachestv podvizhnogo sostava zheleznykh dorog sredstvami kompyuternogo modelirovaniya [Improving the dynamic qualities of rolling stock of railways by computer simulation]. *Tyazheloe mashinostroenie [Heavy engineering construction]*, 2003. No.12. Pp. 2–6.
9. Golubenko A.L. Stseplenie koleasa s rel'som [Wheel-rail adhesion]. Kiev: 1993. 448 p.
10. Arnol'd V.I. Matematicheskie metody klassicheskoi mekhaniki [Mathematical methods of classical mechanics]. Moscow: Nauka Publ., 1974. 431 p.
11. Lazaryan V.A., Dlugach L.A., Korotenko M. L. Ustoichivost' dvizheniya rel'sovykh ekipazhei [Stability of the movement of rail-mounted vehicles]. Kiev: Nauk. Dumka Publ., 1972. 198 p.
12. Medel' V.B. Podvizhnoi sostav elektricheskikh zheleznykh dorog [The rolling stock of electric railways]. Moscow: Transport Publ., 1965. 280 p.
13. Pogorelov D.Yu., Simonov V.A. Pokazatel' dlya otsenki opasnosti skhoda podvizhnogo sostava putem vkatyvaniya koleasa na golovku rel'sa [An indicator for assessing the danger of rolling stock vanishing by rolling a wheel onto a rail head]. *Vestnik SNU im. V. Dallya [The Herald of V. Dahl's SNU]*. Lugansk, 2010. No. 6 (147). Ch.1. Pp. 64–70.
14. Kogan A. Ya., Chernyakov E. A. Otsenka dostatochnogo usloviya ustoichivosti koleasa na rel'se s uchetom veroyatnostnogo kharaktera vliyayushchego na nee nekotorykh faktorov [Assessment of a sufficient condition for the stability of a wheel on a rail taking into account the probabilistic nature of certain factors influencing it]. *Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute]*, 2008. No. 2. Pp. 36–41.
15. Sokol E. N. Skhody s rel'sov i stolknoveniya podvizhnogo sostava (Sudebnaya ekspertiza. Elementy teorii i praktiki) [Derailments and collisions of rolling stock (Forensic examination. Elements of theory and practice)]. Kiev: Transport Ukrainy Publ., 2004, 368 p.

Информация об авторах

Authors

Леоненко Елена Геннадьевна – преподаватель отделения «Электромеханическое», Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Красноярск, e-mail: leonenko-eg@mail.ru

Elena Gennad'evna Leonenko – Lecturer of the Electromechanical Subdepartment, Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, a branch of the Irkutsk State Transport University, Krasnoyarsk, e-mail: leonenko-eg@mail.ru

Для цитирования

For citation

Леоненко Е. Г. Взаимодействие пути и порожних грузовых вагонов при движении в прямых и кривых участках пути // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 148–154. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).148–154

Leonenko E. G. Vzaimodeistvie puti i porozhnykh gruzovykh vagonov pri dvizhenii v pryamykh i krivykh uchastkakh puti [Interaction of the track and empty freight cars when moving in direct and curved areas of the track]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2019. Vol. 63, No. 3, pp. 148–154. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).148–154

УДК 621, 621.313.333.2

DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).154–163

И. С. Куприянов, И. О. Бельский, А. В. Лукьянов

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация
Дата поступления: 12 апреля 2019 г.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДЕФЕКТАХ РОТОРА

Аннотация. Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором являются наиболее распространенным классом электрических машин в машиностроении, транспорте, а также в других отраслях промышленности. Это связано с простотой, высокой надежностью конструкции, экономичностью и механическими характеристиками. В статье рассматриваются вопросы моделирования асинхронных электродвигателей при возникновении дефектов ротора. Это особенно важно при определении признаков дефектов асинхронных электродвигателей, используемых в автоматизированных производственных комплексах современного машиностроения. В качестве предмета моделирования были выбраны токи статора и момент на валу двигателя. В работе исследуются вопросы изменения формы временного сигнала токов обмотки статора, его спектральных характеристик и электромагнитного момента в зависимости от степени развития дефектов стержней ротора.



Полученные теоретические результаты показывают, что развитие данных дефектов вызывает характерные изменения формы токов обмотки статора электродвигателя, их спектрального состава и момента на валу. Выявлена зависимость частот, кратных частоте скольжения, от степени развития дефекта. Данные признаки могут использоваться в качестве диагностических для дефектов стержней беличьей клетки ротора. Поскольку диагностические признаки наличия дефекта связаны с частотой скольжения, диагностику необходимо производить только под нагрузкой. Результаты математического моделирования позволяют оценить влияние дефектов стержней беличьей клетки ротора асинхронного электродвигателя на механические и электрические характеристики при различной степени их развития.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, математическая модель, обрыв стержней ротора, электрические дефекты.

I. S. Kupriyanov, I. O. Bel'skii, A. V. Luk'yanov

Irkutsk State University of railway Transport, Irkutsk, Russian Federation

Received: April 12, 2019

MATHEMATICAL MODELING OF PARAMETERS OF ASYNCHRONOUS MOTORS WITH ELECTRIC DEFECTS OF THE ROTOR

Abstract. Asynchronous electric motors with a squirrel-cage rotor are the most common class of electric machines in mechanical engineering, transportation, and also in other industries. This is due to the simplicity, high reliability of the design, efficiency and mechanical characteristics. The article deals with the problems of modeling asynchronous electric motors if any rotor defects occur. This is especially important in determining the signs of defects in asynchronous electric motors used in automated production in modern engineering complexes. The stator currents and torque on the motor shaft were chosen as the subject of the simulation. A study has been conducted; the issues of changing the shape of the temporary signal of the stator winding current, its spectral characteristics and the electromagnetic torque depending on the degree of development of rotor bar defects are being examined. The obtained theoretical results show that the development of these defects cause characteristic changes in the shape of the stator windings of the electric motor, their spectral composition and torque on the shaft. The dependence of frequencies that are multiples of the slip frequency on the degree of defect development was revealed. These signs can be used as diagnostic ones for defects in squirrel-cage rotor bars. Since the diagnostic signs of the presence of a defect are related to the slip frequency, diagnostics needs to be performed only under load. The results of mathematical modeling allow us to estimate the effect of defects in the bars of the squirrel-cage of the rotor of the asynchronous electric motor on the mechanical and electrical characteristics at various degrees of their development.

Keywords: asynchronous electric motor, mathematical model, asymmetry, breakage of rotor bars, electrical defects.

Введение

Асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором являются наиболее распространенным классом электрических машин, преобразующих электрическую энергию в механическую. Это обусловлено простотой конструкции, высокой надежностью и их низкой стоимостью. Они наиболее широко применяются в современном машиностроении, на транспорте и других отраслях промышленности [1].

При эксплуатации АД могут возникать различные режимы, отрицательно сказывающиеся на техническом состоянии. В таком случае наибольшее влияние оказывают неисправности, связанные с качеством подаваемой электроэнергии, а также с повреждением или выходом из строя составных частей АД. Для исследования влияния этих режимов на надежность АД возникает необходимость анализа данных о мгновенных значениях основных характеристик электропривода, к которым относятся напряжения, токи статора и ротора, угловая скорость вращения и т. д. Одним из основных инструментов анализа является математическое

моделирование, на основании результатов которого можно делать выводы о неисправности АД.

Математическое моделирование асинхронного двигателя

Одной из самых распространенных причин отказа АД в машиностроении, особенно двигателей большой мощности, являются повреждения стержня беличьей клетки ротора [2].

Для изучения процессов, происходящих в АД при возникновении и развитии дефектов, необходимо построить математическую модель, отображающую не только механические характеристики АД, но и распределение токов в фазных обмотках статора и ротора. При построении модели необходимо отталкиваться от известных заранее параметров машины, приведенных в справочных материалах [3].

Расчет мгновенных значений токов статора является более простой задачей по сравнению с вычислением токов ротора [3].

Ниже представлена Т-образная схема замещения АД с короткозамкнутым ротором (рис. 1).

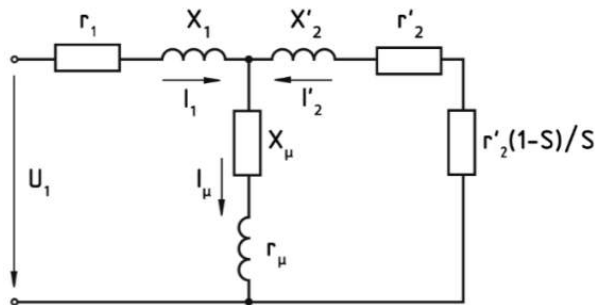


Рис. 1. Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

Т-образная схема замещения является стандартной для расчета процессов, происходящих в АД. В качестве исходной для моделирования дефекта «обрыв стержней ротора» рассмотрим асинхронную машину с одной фазной обмоткой статора в конкретный момент времени.

Для определения активного сопротивления стержня фазы ротора r_c воспользуемся уравнением

$$r_c = \rho \Psi_r \frac{l_2}{q_c}, \quad (1)$$

где l_2 – длина магнитопровода; q_c – площадь поперечного сечения стержня; $\rho \Psi_r$ – удельное сопротивление материала беличьей клетки ротора [4, 5].

Так как при возникновении и развитии дефекта уменьшается площадь поперечного сечения поврежденного стержня, возникает необходимость во введении дополнительного коэффициента r_c , показывающего отношение текущей площади поперечного сечения к полной площади целого стержня, в связи с этим выражение (1) примет вид

$$r_c = \rho \Psi_r \frac{l_2}{q_c \cdot k_u},$$

где k_u – коэффициент поперечного сечения стержня, изменяющийся в пределах [0...1].

Найдем сопротивление участка короткозамыкающего кольца фазы ротора, расположенного между двумя соседними стержнями согласно выражению

$$r_{кл} = \rho \Psi_r \cdot \frac{\pi \cdot D_{ксп}}{Z_2 \cdot q_{кл}},$$

где Z_2 – число стержней ротора; $D_{ксп}$ – средний диаметр короткозамыкающих колец; $q_{кл}$ – поперечное сечение короткозамыкающих колец [4].

Тогда активное сопротивление фазы ротора можно рассчитать из выражения

$$r_2 = r_c + \frac{2 \cdot r_{кл}}{\Delta^2},$$

где Δ – коэффициент, зависящий от числа полюсов и числа стержней статора АД [6].

Исходя из тех же принципов, установим индуктивное сопротивление фазы ротора. Для этого определим коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния:

$$\lambda_{n2} = \left(\frac{h_0}{3 \cdot b_{1r}} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot b_{1r}^2}{8 \cdot q_c \cdot k_u} \right) + 0,66 - \frac{b_{u2}}{2 \cdot b_{1r}} \right) \cdot k_D + \frac{h_{u2}}{b_{u2}},$$

где h_0 – высота паза; b_{1r} – ширина паза ротора; b_{u2} – ширина шлица паза; k_D – коэффициент условий номинального режима работы; h_{u2} – высота шлица паза [5].

Индуктивное сопротивление фазы статора определяется по формуле

$$x_2 = 7,9 \cdot f_1 \cdot l_{\delta rr} \cdot (\lambda_{n2} + \lambda_{\lambda 2} + \lambda_{\delta 2} + \lambda_{ск}),$$

где f_1 – частота питающей сети; $l_{\delta rr}$ – длина магнитопровода; $\lambda_{\lambda 2}$ – коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния; $\lambda_{\delta 2}$ – коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния; $\lambda_{ск}$ – коэффициент магнитной проводимости скоса [6].

Умножив активное и индуктивное сопротивление на коэффициент приведения к статорной обмотке, получим приведенные значения x'_2 и r'_2 для подстановки в схему замещения. Номинальный действующий ток статорной обмотки машины при отсутствии повреждений в статоре и дефектов питающей сети определяется по выражению

$$I_{нф} = \frac{P_{2н}}{m \cdot U_1 \cdot \cos \varphi \cdot \eta_n},$$

где $P_{2н}$ – номинальная мощность АД; U_1 – среднее действующее напряжение сети; $\cos \varphi$ – коэффициент мощности; η_n – номинальный КПД [5].

Из значений номинальных напряжения и тока электрической сети по закону Ома найдем базисное сопротивление [4, 6]:

$$z_{баз} = \frac{U_1}{I_{нф}}.$$

Исходя из известных параметров схемы замещения можно посчитать полное сопротивление ротора

$$Z_2 = \frac{r'_2}{s} + j \cdot x'_2,$$



где s – скольжение [6, 7].

Взаимное фазное сопротивление обмотки статора и ротора определяется как

$$Z_{12} = \frac{(r_{12} + j \cdot x_{12}) \cdot Z_2}{(r_{12} + j \cdot x_{12}) + Z_2},$$

где r_{12} – взаимное активное сопротивление фазы статора и ротора; x_{12} – взаимное индуктивное сопротивление фазы статора и ротора [4].

Полное входное сопротивление фазы определяется из выражения

$$Z_{ex} = (r_1 + j \cdot x_1) + Z_{12}.$$

Ток фазы статора в зависимости от скольжения и параметров ротора можно найти из выражения

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_{ex}}.$$

Ток фазы ротора [4]:

$$I_2 = \frac{U_1 - I_1 \cdot (r_1 + j \cdot x_1)}{Z_2}.$$

Определим полную механическую мощность на валу двигателя согласно формуле [4, 5]:

$$P_2 = p \cdot \left(I_2^2 \cdot \frac{r_2(1-s)}{s} \right).$$

Момент на валу АД находится как

$$M = \frac{P_2}{n_1 \cdot (1-s)},$$

где n_1 – скорость вращения магнитного поля статора [3–5, 8].

Для определения тока, протекающего в стержне, необходимо определить углы между МДС статора и зубцами ротора. Фазовый сдвиг между током и напряжением, создаваемый реактивной нагрузкой обозначим ϕ и определим аргумент вектора тока статора. Также определим величину ϕ_2 – угол фазового сдвига между током фазы ротора и ее ЭДС.

Введем величины ϕ_{deg} , ϕ_{2deg} получаемые при преобразовании фазового сдвига ϕ и ϕ_2 в радианы.

Стержни ротора, в отличие от статорных обмоток, проектируют так, чтобы добиться максимального вытеснения тока для увеличения пускового момента [2, 6, 7]. В номинальном режиме работы вытеснение тока становится незначительным. Отсюда можно сделать вывод, что плотность тока распределена равномерно по всему сечению пазов статора и ротора. Поэтому для установившегося режима становится возможным определить ток статора, исходя из справочных данных.

Рассмотрим момент времени, когда ток в фазе имеет положительный знак и равен амплитудному значению.

Угол между векторами МДС статора и ротора – $\phi_{прст}$ (в электрических градусах) есть отношение угла между токами статора и ротора [8].

Исходя из положения вектора МДС статора, сдвинутого от рассматриваемой точки на угол α_{F1} по часовой стрелке, найдем угол отклонения МДС ротора от оси фазы:

$$\alpha_{F2} = \alpha_{F1} - \phi_{прст}.$$

Определим МДС основных гармоник статора и ротора согласно выражению

$$F_{1m} = \frac{m \cdot \sqrt{2} \cdot I_1 \cdot w_1 \cdot k_{o\sigma 1}}{\pi \cdot p},$$

где $k_{o\sigma 1}$ – обмоточный коэффициент статора; w_1 – число витков фазы статора [4, 5, 10].

Полный ток машины, приведенный к обмотке статора определяется как

$$I_1 + I_2 \cdot \frac{m_2 \cdot w_2 \cdot k_{o\sigma 2}}{m \cdot w_1 \cdot k_{o\sigma 1}} = I_1 + I_2' = I_{10},$$

где w_2 – число витков обмотки ротора; m_2 – число фаз статора, равное количеству стержней; $k_{o\sigma 2}$ – обмоточный коэффициент ротора [8, 10].

Отсюда получаем выражение для вычисления МДС ротора через МДС статора:

$$F_{2m} = \frac{m \cdot \sqrt{2} \cdot I_1 \cdot I_{2oe}' \cdot w_1 \cdot k_{o\sigma 1}}{\pi \cdot p},$$

где I_{2oe}' – ток ротора, приведенный к обмотке статора в относительных единицах [4–7].

Для того чтобы определить токи в стержнях ротора примем, что распределение МДС вдоль воздушного зазора имеет синусоидальный вид. Тогда ток, протекающий по стержню ротора, будет равен разности МДС двух соседних с ним зубцов при условии того, что определены пространственные (угловые) координаты вектора МДС [4, 7, 10].

Так как ток в обмотке статора зависит от углового положения рассматриваемой точки относительно начала координат, то для определения МДС зубцов ротора при смещении от начального положения, необходимо умножить значение МДС ротора F_{2m} на косинус текущего рассматриваемого угла. Отсюда становится возможным определить ток, протекающий в стержне ротора, как разницу МДС двух соседних зубцов:

$$i_{st} = F_{z2}(z2+1) - F_{z2}(z2).$$

Произведем расчет основных параметров четырехполюсного АД с короткозамкнутым ротором общепромышленного применения АИР63В4 (табл. 1).



Т а б л и ц а 1

Характеристики электродвигателя

Характеристика	Значение
Мощность, кВт	0,37
КПД, %	68
Число пар полюсов	2
Частота вращения, об/мин	1500
cosφ	0,7
Критическое скольжение, %	15,2
Сопrotивление обмотки статора, Ом	21,5

Ниже представлен полученный в результате расчетов график зависимости момента на валу АД в зависимости от скольжения при 100, 75, 50 и 25 % сечения стержня от номинального (рис. 1).

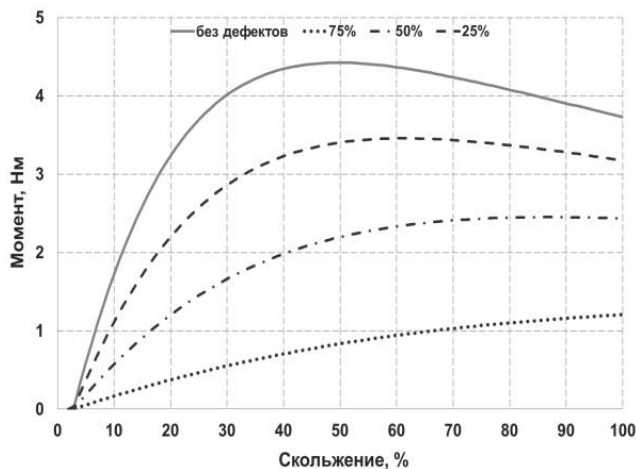


Рис. 1. Зависимость момента на валу асинхронного двигателя от скольжения

Анализ кривых вращающихся моментов показывает, что при возникновении и развитии дефекта и увеличении нагрузки на валу АД происходит уменьшение величины крутящего момента при прохождении дефектного стержня через полюс.

Для изучения влияния дефекта на нагрузочные характеристики АД в динамике необходимо рассмотреть изменение вращающего момента в зависимости от угла поворота ротора относительно неподвижного статора. Далее показано изменение нагрузочной характеристики в динамике при различных уровнях развития дефекта (рис. 2).

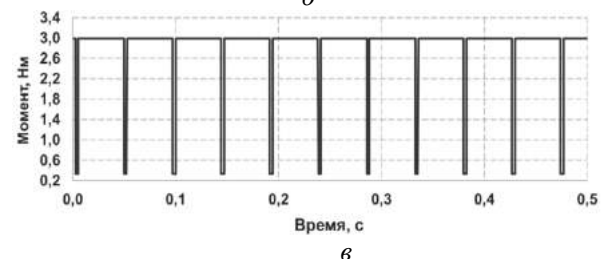
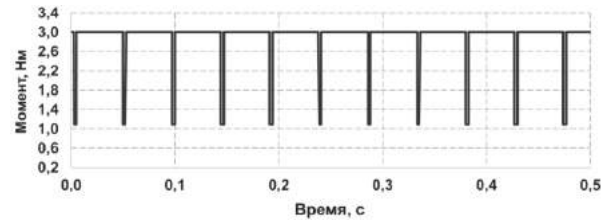
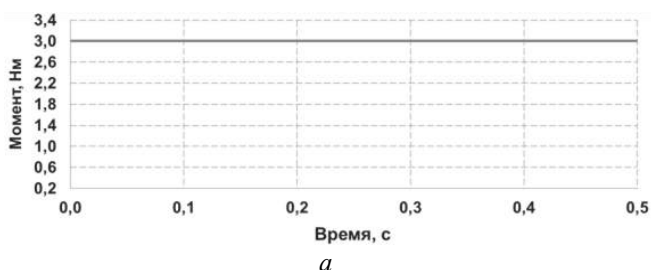


Рис. 2. Зависимость момента на валу асинхронного двигателя от времени при различных величинах сечения стержней: а – 100 %; б – 50 %; в – 25 %

Из графиков видно, что при развитии дефекта происходит резкое изменение величины крутящего момента при прохождении дефектного стержня через полюс. Развитие дефекта негативно влияет на нагрузочную способность АД, при этом появляются провалы, проявляющиеся в динамике и зависящие от текущего скольжения асинхронной машины.

Рассмотрим влияние дефекта на ток, протекающий в обмотке статора. приведены графики зависимости тока в обмотках статора в зависимости от скольжения АД при площади поперечного сечения рассматриваемого стержня 100, 75, 50 и 25 % от номинального (рис. 3).

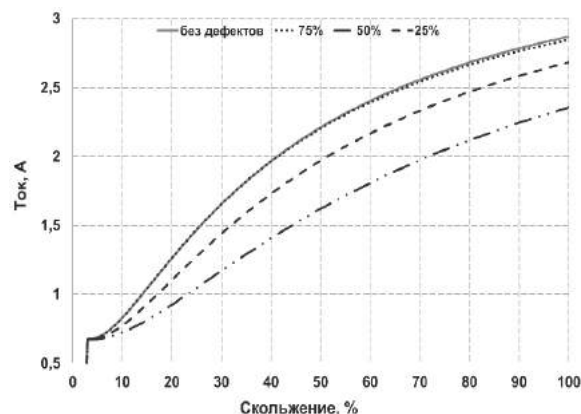


Рис. 3. Ток в обмотках статора в зависимости от скольжения

При прохождении дефектного стержня через полюс АД величина тока, протекающего по обмоткам статора, уменьшается пропорционально уменьшению площади поперечного сечения рассматриваемого стержня.



В данной математической модели ротор рассматривается как короткозамкнутая беличья клетка без сердечника, изготавливаемого из электротехнической стали. В реальных АД следует учитывать влияние целостности стержня на распространение магнитных силовых линий, в том числе и по сердечнику ротора.

В результате возникновения и развития дефекта по стержням, расположенным за дефектным, начинает протекать больший по величине ток. Это связано с перераспределением токов во всей беличьей клетке. При этом в следующем по направлению вращения стержне величина тока значительно возрастает. Ток начинает протекать в обход поврежденного стержня, образуя контур со следующим по направлению движения стержнем, при этом увеличивая в нем ток [11–14].

В случае обрыва стержня магнитные силовые линии проходят через зубцы ротора, которые имеют большую магнитную проницаемость, поэтому происходит их насыщение основным потоком намагничивания [15, 16].

Для оценки влияния электрических дефектов на межфазное взаимодействие используем другую модель, при этом примем следующие допущения:

- магнитную проницаемость материалов, из которых изготовлены статор и ротор будем считать бесконечной;
- насыщением и потерями в стали можно пренебречь;
- обмотки статора и ротора рассматриваются пофазно;
- обмотка ротора в связи с ее симметричностью рассматривается целиком;
- механические потери не учитываются.

В качестве исходного рассмотрим симметричный АД с обмотками, соединенными «звездой», и имеющими одинаковое число витков в каждой из них. Отсюда следует, что сумма фазных токов в фазных обмотках равна нулю:

$$i_A + i_B + i_C = 0,$$

где i_A, i_B, i_C – токи в фазах А, В и С [5].

Для изучения влияния дефектов на процессы, происходящие в АД, необходимо рассмотреть систему уравнений, учитывающую процессы во всем двигателе. Уравнения ЭДС фазных обмоток статора и обмотки ротора для общего случая имеют вид

$$\begin{cases} u_A = R_A \cdot i_A + \frac{d\psi_A}{dt}, \\ u_B = R_B \cdot i_B + \frac{d\psi_B}{dt}, \\ u_C = R_C \cdot i_C + \frac{d\psi_C}{dt}, \\ u_r = R_r \cdot i_r + \frac{d\psi_r}{dt}, \end{cases} \quad (2)$$

где R_A, R_B, R_C – активные сопротивления обмоток фаз А, В и С; R_r – активное сопротивление фазы обмотки ротора [3, 9].

Потокоцепления контуров для фаз статора и ротора [3, 8, 9] определяются из выражений

$$\psi_A = L_{AA}i_A + L_{AB}i_B + L_{AC}i_C + L_{Ar}i_r,$$

$$\psi_B = L_{BB}i_B + L_{BA}i_A + L_{BC}i_C + L_{Br}i_r,$$

$$\psi_C = L_{CC}i_C + L_{CA}i_A + L_{CB}i_B + L_{Cr}i_r,$$

$$\psi_r = L_{rr}i_r + L_{rA}i_A + L_{rB}i_B + L_{rC}i_C.$$

Полные индуктивности фаз статора и ротора находятся как

$$L_{AA} = L_{GA} + L_{\sigma A},$$

$$L_{BB} = L_{GB} + L_{\sigma B},$$

$$L_{CC} = L_{GC} + L_{\sigma C},$$

$$L_{rr} = L_{Gr} + L_{\sigma r},$$

где $L_{GA}, L_{GB}, L_{GC}, L_{Gr}$ – главные индуктивности фазных обмоток статора и ротора; $L_{\sigma A}, L_{\sigma B}, L_{\sigma C}, L_{\sigma r}$ – индуктивности рассеяния фазных обмоток статора и ротора; L_{AB}, L_{AC}, L_{BC} – главные взаимные индуктивности между фазными обмотками статора; L_{Ar}, L_{Br}, L_{Cr} – взаимные индуктивности фазных обмоток статора с обмоткой ротора; L_{rA}, L_{rB}, L_{rC} – взаимные индуктивности фазных обмоток ротора с обмотками статора [8, 9].

Для получения уравнений с постоянными коэффициентами запишем их в системе осей, вращающихся с синхронной скоростью. Уравнения установившегося режима записываются для синусоидально изменяющихся периодических величин.

Примем, что обратные сопротивления и индуктивности контура тока обратной последовательности равны соответствующим параметрам контура тока прямой последовательности.

Для установившегося режима работы машины из общих уравнений (2) получим

$$\begin{aligned} \dot{U}_A = [R_A + j\omega_s(L_{GA} + L_{\sigma A})]\dot{I}_A + j\omega_s L_{AB}\dot{I}_B + \\ + j\omega_s L_{AC}\dot{I}_C + j\omega_s L_{Ar}\dot{I}_r + j\omega_s L_{Aoo}\dot{I}_{об}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_B = [R_B + j\omega_s(L_{GB} + L_{\sigma B})]\dot{I}_B + j\omega_s L_{BA}\dot{I}_A + \\ + j\omega_s L_{BC}\dot{I}_C + j\omega_s L_{Br}\dot{I}_r + j\omega_s L_{Boo}\dot{I}_{об}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_C = [R_C + j\omega_s(L_{GC} + L_{\sigma C})]\dot{I}_C + j\omega_s L_{CA}\dot{I}_A + \\ + j\omega_s L_{CB}\dot{I}_B + j\omega_s L_{Cr}\dot{I}_r + j\omega_s L_{Coo}\dot{I}_{об}. \end{aligned}$$

Для обмотки ротора уравнение имеет вид

$$0 = \dot{U}_r = [R_r + j\omega_s(L_{Gr} + L_{\sigma r})]\dot{I}_r +$$



$$+ j\omega_s L_{rA} \dot{I}_A + j\omega_s L_{rB} \dot{I}_B + j\omega_s L_{rC} \dot{I}_C .$$

Уравнение напряжений контура тока обратной последовательности на роторе имеет следующий вид

$$0 = [R_r + j\omega_s(2-s)(L_{\Gamma r} + L_{\sigma r})] \dot{I}_{o\bar{o}} + j\omega_s(2-s)L_{rA} \dot{I}_A + j\omega_s(2-s)L_{rB} \dot{I}_B + j\omega_s(2-s)L_{rC} \dot{I}_C .$$

Полные сопротивления обмоток статора и ротора [3, 7–9]:

$$Z_A = R_A + j(\omega_s L_{\Gamma A} + \omega_s L_{\sigma A}), \quad (3)$$

$$Z_B = R_B + j(\omega_s L_{\Gamma B} + \omega_s L_{\sigma B}), \quad (4)$$

$$Z_C = R_C + j(\omega_s L_{\Gamma C} + \omega_s L_{\sigma C}), \quad (5)$$

$$Z_r = R_r + j(\omega_s L_{\Gamma r} + \omega_s L_{\sigma r}). \quad (6)$$

Сопротивления взаимной индукции фаз статора [3, 7–9]:

$$Z_{AB} = -j\omega_s L_{AB}, \quad (7)$$

$$Z_{AC} = -j\omega_s L_{AC}, \quad (8)$$

$$Z_{BA} = -j\omega_s L_{BA}, \quad (9)$$

$$Z_{BC} = -j\omega_s L_{BC}, \quad (10)$$

$$Z_{CA} = -j\omega_s L_{CA}, \quad (11)$$

$$Z_{CB} = -j\omega_s L_{CB}. \quad (12)$$

Сопротивление взаимной индукции фаз статора и обмотки ротора [3, 8, 9]:

$$Z_{Ar} = j\omega_s L_{Ar}, \quad (13)$$

$$Z_{Br} = j\omega_s L_{Br} \alpha, \quad (14)$$

$$Z_{Cr} = j\omega_s L_{Cr} \alpha^2. \quad (15)$$

Сопротивление взаимной индукции обмотки ротора и фазных обмоток статора [3, 8, 9]:

$$Z_{rA} = j\omega_s L_{rA}, \quad (16)$$

$$Z_{rB} = j\omega_s L_{rB} \alpha^2, \quad (17)$$

$$Z_{rC} = j\omega_s L_{rC} \alpha. \quad (18)$$

Полное сопротивление фазы контура тока обратной последовательности на роторе:

$$Z_{o\bar{o}} = R_r + j\omega_s(2-s) \cdot (L_{\Gamma r} + L_{\sigma r}). \quad (19)$$

Сопротивление взаимной индукции фаз статора и обратного контура ротора:

$$Z_{Ao\bar{o}} = j\omega_s L_{Ao\bar{o}}, \quad (20)$$

$$Z_{Bo\bar{o}} = j\omega_s L_{Bo\bar{o}} \alpha^2, \quad (21)$$

$$Z_{Co\bar{o}} = j\omega_s L_{Co\bar{o}} \alpha. \quad (22)$$

Сопротивление взаимной индукции обратного контура ротора и фаз статора [3, 8, 9]:

$$Z_{o\bar{o}A} = j(2-s)\omega_s L_{o\bar{o}A}, \quad (23)$$

$$Z_{o\bar{o}B} = j(2-s)\omega_s L_{o\bar{o}B} \alpha, \quad (24)$$

$$Z_{o\bar{o}C} = j(2-s)\omega_s L_{o\bar{o}C} \alpha^2. \quad (25)$$

Уравнения (3–25) преобразуются в систему, из которой по известным параметрам контуров и приложенным фазным напряжениям можно определить токи контуров в различных режимах работы:

$$\begin{pmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_A & Z_{AB} & Z_{AC} & Z_{Ar} & Z_{Aoo} & 10^{10} \\ Z_{BA} & Z_B & Z_{BC} & Z_{Br} & Z_{Boo} & 10^{10} \\ Z_{CA} & Z_{CB} & Z_C & Z_{Cr} & Z_{Coo} & 10^{10} \\ Z_{rA} & Z_{rB} & Z_{rC} & Z_r & Z_{roo} & 10^{10} \\ Z_{o\bar{o}A} & Z_{o\bar{o}B} & Z_{o\bar{o}C} & Z_{o\bar{o}r} & Z_{o\bar{o}} & 10^{10} \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_r \\ I_{o\bar{o}} \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Данная система отражает электрические процессы работы электродвигателя, соответствующих установившемуся режиму.

Для определения процессов, происходящих в электродвигателе при таких дефектах, как обрыв стержня ротора, модифицируем матрицу, пересчитав некоторые ее члены. Для пересчета параметров при развитии дефектов ротора воспользуемся схемой замещения.

Пересчитаем активное и индуктивное сопротивление фазы ротора $x_2'(ns)$ и $r_2'(ns)$, где ns – номер стержня. Исходя из того, что число оборотов АД изменяется с течением времени, переопределим активное и индуктивное сопротивление фазы ротора в зависимости от времени, $x_2'(t)$ и $r_2'(t)$.

Индуктивность рассеяния обмотки ротора будет определяться по формуле [8, 9]:

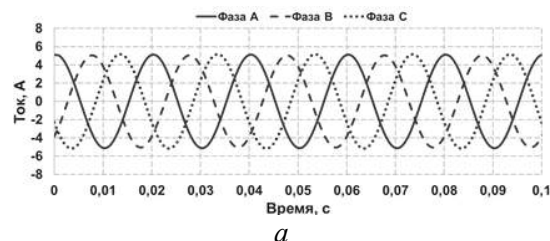
$$L_{\sigma r}(t) = \frac{x_2'(t)}{2\pi f_1}.$$

Обмотки ротора:

$$L_{\Gamma r}(t) = \frac{mr \cdot \mu_0}{p \cdot \pi^2} \cdot \left(\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot k_{st}(t) \right)^2 \cdot \left(\tau \cdot \frac{l\delta}{\delta \cdot k\delta \cdot k\mu} \right),$$

где $k_{st}(t)$ – коэффициент, отражающий отношение текущей площади поперечного сечения стержня к номинальной.

Рассмотрим реакцию системы на уменьшение площади поперечного сечения одного из стержней. Представлены графики тока в фазных обмотках статора при номинальной площади поперечного сечения стержня и уменьшении на 50 и 99 % (рис. 4).



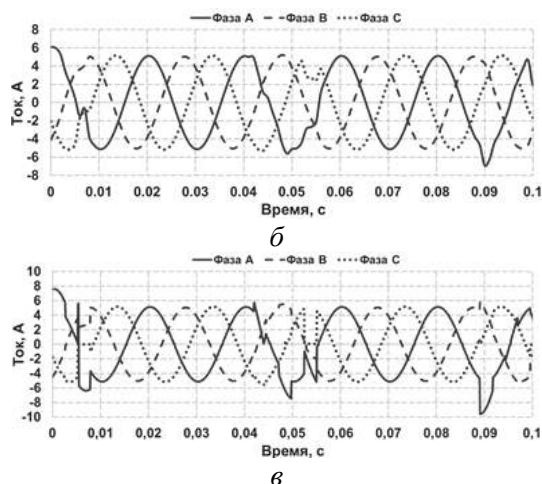


Рис. 4. Токи статора при уменьшении площади поперечного сечения стержня:
a – 0 %; *б* – 50 %; *в* – 99 %

При анализе кривых токов в обмотках статора видно, что поврежденный стержень, вращаясь во времени, поочередно оказывает влияние на форму сигнала тока в каждой из трех фазных обмоток. Амплитуда и форма модуляций меняется с увеличением уровня развития дефекта.

В связи с изменением формы и площади поперечного сечения происходит изменение величины электрического сопротивления стержня, ток перераспределяется по всей беличьей клетке. Рассмотрим частотный состав временных сигналов (рис. 5).

Из данных графиков видно, что при уменьшении площади поперечного сечения одного из стержней наблюдается рост амплитуды гармоник, кратных частоте сети 50 Гц, что объясняется увеличением тока в обмотках статора при прохождении дефектного стержня.

Так же прослеживается рост амплитуды боковых составляющих основной гармоники 50 Гц на частотах $\pm 15, 18$ Гц, кратным удвоенной частоте скольжения ротора 2^*s .

Появление в спектре токов статора данного набора характерных частот может быть использовано в качестве диагностических признаков наличия дефектов стержней беличьей клетки ротора.

Изменение амплитуды характерных гармоник при диагностике может указывать степень развития дефекта.

Так как диагностические признаки наличия

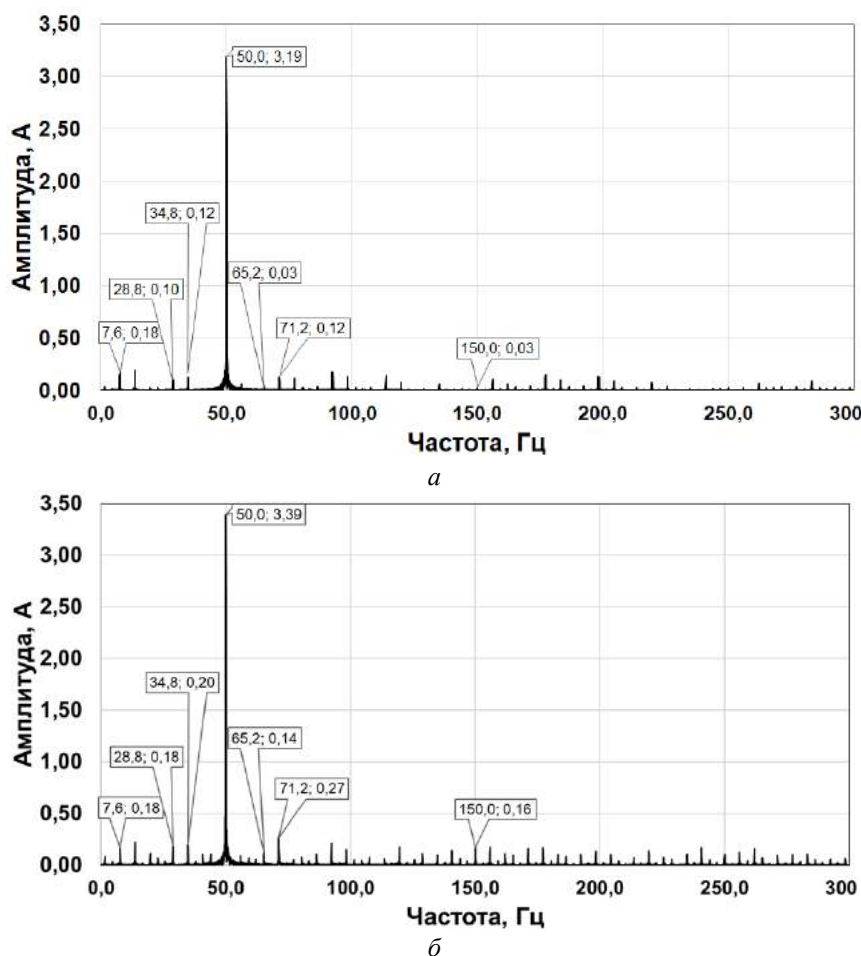


Рис. 5. Частотный состав тока в фазе А:
a – 50 %; *б* – 99 %



дефекта возникают на частотах, кратных частоте скольжения, диагностику АД необходимо проводить под нагрузкой.

Заключение

В данной статье представлены результаты математического моделирования АД при наличии дефекта стержней беличьей клетки ротора.

В результате проведения математического моделирования выявлена зависимость изменения механических характеристик АД при возникновении и развитии дефекта.

Получены данные, позволяющие сделать вывод о влиянии дефектов на амплитуду харак-

терных гармоник фазных токов в обмотках статора, выявленных при спектральном анализе временного сигнала. Появление данных частот может служить диагностическим признаком наличия дефектов стержней беличьей клетки ротора при проведении диагностики АД.

Результаты, полученные при моделировании, могут быть использованы в диагностических системах и системах мониторинга состояния АД ответственных применений для предупреждения и снижения риска развития дефектов стержней беличьей клетки ротора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Ключев, Ф.Р. Соснин, А.В. Ковалев и др. М. : Машиностроение. 2005. 1017 с.
2. Benbouzid M.E.H. Bibliography on induction motors faults detection and diagnosis. *IEEE Trans. Energy Convers.*, 1999. Vol. 14. № 4. P. 1065–1074.
3. Алиев И.Б. Асинхронные двигатели в трехфазном и однофазном режимах. М. : РадиоСофт, 2004. 128 с.
4. Асинхронные двигатели серии 4А / А.Э. Кравчик и др. Энергоиздат, 1982. 504 с.
5. Теоретические основы электротехники: электрические цепи. М. : Высш. школа, 1978. 528 с.
6. Копылов И.П., Константинович К.Б. Проектирование электрических машин. М. : Юрайт. 2011. 766 с.
7. Электротехника : учебно-методический комплекс / под редакцией Н. В. Клиначева. Челябинск, 2006.
8. Вольдек А.И. Электрические машины. Л. : Энергия, 1978. 832 с.
9. Шубов И.Г. Шум и вибрация электрических машин. Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние. 1986. 208 с.
10. Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л. Испытания и надежность электрических машин. М. : Высш. шк., 1988. 232 с.
11. А.Н. Назарычев, А.А. Скоробогатов, Е.М. Новоселов. Экспериментальное исследование внешнего магнитного поля асинхронного электродвигателя для контроля обрыва стержней короткозамкнутой обмотки ротора // Вестник ИГЭУ. 2012. № 1. С. 1–6.
12. Тонких В.Г. Исследование процессов изменения формы внешнего магнитного поля электродвигателя при развитии в нем различных дефектов // Измерение, контроль, информатизация : материалы Девятой Междунар. науч.-техн. конф. Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2006. С. 56.
13. Бельский И.О., Куприянов И.С., Лукьянов А.В. Исследование угловой скорости и магнитного поля при дефектах асинхронных электродвигателей // Системы. Методы. Технологии. 2018 Т. 40. № 4. С. 62–69.
14. Загирняк М.В., Ромашихина Ж.И., Калинов А.П. Диагностика повреждений стержней ротора в асинхронном двигателе на основании анализа его магнитного поля // Вестник НТУ "ХПИ". 2012. № 49 (955). С. 38–48.
15. Бельский И.О., Лукьянов А.В. Исследование параметров внешнего магнитного поля в задачах диагностики асинхронных электродвигателей // Проблемы механики современных машин : материалы VI междунар. конф. Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ. Т. 1. С. 8
16. 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. et al. Nerazrushayushchii kontrol' i diagnostika: Spravochnik [Non-destructive testing and diagnostics: A reference book]. In Klyuev V.V. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2005. 1017 p.
2. Benbouzid M. E. H. Bibliography on induction motors faults detection and diagnosis. *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 14. No. 4. Pp. 1065–1074. Dec. 1999.
3. Aliev I.B. Asinkhronnye dvigateli v trekhfaznom i odnofaznom rezhimakh [Asynchronous motors in three-phase and single-phase modes]. Moscow: RadioSoft Publ., 2004. 128 p.
4. Kravchik A.E., Shlaf M.M., Afonin V.I., Sobolevskaya E.A. Asinkhronnye dvigateli serii 4A [Asynchronous motors of 4A series]. Energoizdat Publ., 1982. 504p.
5. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki: elektricheskie tsepi. Uchebnik dlya studentov elektrotekhnicheskikh, energeticheskikh i priborostroitel'nykh spetsial'nostei vuzov [Theoretical foundations of electrical engineering: electrical circuits. A textbook for students of electrical, energy and instrument engineering specialties of universities]. 7th ed., revised and enlarged. Moscow: Vyssh. Shkola Publ., 1978. 528 p.
6. Kopylov I.P., Konstantinovich K.B. Proektirovanie elektricheskikh mashin [Design of electrical machines]. 4th ed., revised and enlarged. Moscow: Yurait Publ., 2011.
7. Kogol' I. M., Dubovitskii G. P., Borodyanko V. N., Gun V. S. et al. Elektrotekhnika: Uchebno-metodicheskii kompleks [Electrical Engineering: An educational and methodical complex]. In Klinachev N. V. (ed.). Offline version. Chelyabinsk, 2006.
8. Vol'dek A.I. Elektricheskie mashiny [Electric cars]. Leningrad: Energiya Publ., 1978. 832 p.
9. Shubov I.G. Shum i vibratsiya elektricheskikh mashin [The noise and vibration of electrical machines]. Leningrad: Energoatomizdat Publ., 1986. 208 p.
10. Kotelenets N. F., Kuznetsov N.L. Ispytaniya i nadezhnost' elektricheskikh mashin: ucheb. posobie dlya vuzov po spets. «Elektromekhanika» [Testing and reliability of electrical machines: A textbook for university students majoring in electromechanics]. Moscow: Vyssh. shk. Publ., 1988. 232 p.



11. Nazarychev A.N., Skorobogatov A.A., Novoselov E.M. Eksperimental'noe issledovanie vneshnego magnitnogo polya asinkhronnogo elektrodvigatelya dlya kontrolya obryva sterzhnei korotkozamknutoi obmotki rotora [An experimental study of the external magnetic field of an asynchronous motor to control the breakage of the bars of the short-circuited rotor winding]. *Zhurnal – Vestnik IGEU*, 2012. No. 1. Pp. 1–6.

12. Tonkikh V. G. Issledovanie protsessov izmeneniya formy vneshnego magnitnogo polya elektrodvigatelya pri razvitiy v nem razlichnykh defektov [Investigation of the processes of changing the shape of the external magnetic field of an electric motor during the development of various defects in it]. *Izmerenie, kontrol', informatizatsiya: materialy Devyatoi Mezhdunarodnoi NTK [Measurement, control, informatization: materials of the Ninth International SRC]*. Barnaul: AltGTU Publ., 2006. Pp. 56.

13. Bel'skii I.O., Kupriyanov I.S., Luk'yanov A.V. Issledovanie uglovoi skorosti i magnitnogo polya pri defektakh asinkhronnykh elektrodvigatelye [The study of angular velocity and magnetic field with defects of asynchronous electric motors]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technologies]*, 2018, Vol. 40, No.4. Pp. 62–69.

14. Zagirnyak M.V., Romashikhina Zh.I., Kalinov A.P. Diagnostika povrezhdenii sterzhnei rotora v asinkhronnom dvigatele na osnovanii analiza ego magnitnogo polya [Diagnosis of damage to rotor rods in an induction motor based on the analysis of its magnetic field]. *Visnik NTU "KhPI" [The herald of SRU "KhPI"]*, 2012. No. 49 (955). Pp. 38–48.

15. Bel'skii I.O., Luk'yanov A.V. Issledovanie parametrov vneshnego magnitnogo polya v zadachakh diagnostiki asinkhronnykh elektrodvigatelye [Investigation of the parameters of an external magnetic field in the problems of diagnostics of asynchronous electric motors]. *Materialy VI mezhdunarodnoi konferentsii «Problemy mekhaniki sovremennykh mashin», 29 iyunya - 4 iyulya 2015 g.* [Materials of the VI international conference "Problems of the mechanics of modern machines", June 29 - July 4, 2015]. Ulan-Ude: VSGUTU Publ., Vol.1, p. 8.

16. D'yakonov V.P. MATLAB 6.0/6.1/6.5+SP1 + Simulink 4/5. Obrabotka signalov i izobrazhenii [MATLAB 6.0 / 6.1 / 6.5 + SP1 + Simulink 4/5. Signal and image processing]. Moscow: SOLON-Press Publ., 2005. 592 p.

Информация об авторах

Authors

Куприянов Иван Сергеевич – аспирант кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: xpress14@mail.ru.

Бельский Игорь Олегович – аспирант кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: belskyigor92@gmail.com.

Лукьянов Анатолий Валерианович – д. т. н., профессор кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: loukan@inbox.ru.

Ivan Sergeevich Kupriyanov – Ph.D. student at the Subdepartment of Physics, Mechanics and Instrumentation, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: xpress14@mail.ru.

Igor' Olegovich Belskii – Ph.D. student at the Subdepartment of Physics, Mechanics and Instrumentation, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: belskyigor92@gmail.com.

Anatolii Valerianovich Luk'anov – Doctor of Engineering Science, Prof. at the Subdepartment of Physics, Mechanics and Instrumentation, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: loukan@inbox.ru.

Для цитирования

For citation

Куприянов И. С. Математическое моделирование параметров асинхронных двигателей при электрических дефектах ротора / И. С. Куприянов, И. О. Бельский, А. В. Лукьянов // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.* – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 154–163. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).154–163

Kupriyanov I. S., Bel'skii I. O., Luk'anov A. V. Matematicheskoe modelirovanie parametrov asinkhronnykh dvigatelei pri elektricheskikh defektakh rotora [Mathematical modeling of parameters of asynchronous motors with electric defects of the rotor] *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2019. Vol. 63, No. 3, pp. 154–163. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).154–163

УДК 629.423.1

DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).163–171

Т. В. Волчек, О. В. Мельниченко, А. О. Линьков, С. Г. Шрамко

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

Дата поступления: 17 апреля 2019 г.

РАЗРАБОТКА СПОСОБА И УСТРОЙСТВА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПУЛЬСАЦИИ ТОКА ВОЗБУЖДЕНИЯ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОВОЗА В РЕЖИМЕ ОСЛАБЛЕНИЯ ПОЛЯ

Аннотация. Одной из важнейших задач программы ОАО «РЖД» «Стратегия научно-технического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030» является повышение надежности и ресурса работы технических средств электроподвижного состава. Эффективная и безотказная работа эксплуатируемого парка электровозов во многом зависит от надежности коллекторных тяговых электрических двигателей, в связи с этим в данной статье рассмотрена статистика отказов их элементов по сети железных дорог Восточного полигона за 2018 г. Выя-