УДК 621.313.333.2 DOI: 10.18324/2077-5415-2018-2-44-53

Математическое, численное и натурное моделирование параметров магнитного поля при несимметрии тока в фазах асинхронных электродвигателей

И.О. Бельский[a], А.В. Лукьянов[b]

Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского 15, Иркутск, Россия
[a]belskyigor92@gmail.com, [b]loukian@inbox.ru
[a]https://orcid.org/0000-0003-0804-3083, [b]https://orcid.org/0000-0002-5077-5408
Статья поступила 15.03.2018, принята 20.04.2018

В статье рассмотрены динамические характеристики асинхронных электродвигателей при возникновении и развитии дефекта несимметрия фаз питающего тока. В условиях реальной эксплуатации подводимое к оборудованию напряжение не всегда симметрично и одинаково по всем фазам. Возникновение неравномерного распределения может быть связано с такими причинами, как подключение мощной нагрузки на одну из фаз, замыкание или обрыв одного из фазных проводов. Для того чтобы предотвратить внезапный выход из строя электродвигателя, способный повлечь за собой остановку производственных процессов, создание аварийных ситуаций и увеличение экономических потерь, необходимо наиболее полно исследовать процессы, происходящие при зарождении и развитии дефектов. Произведены теоретические расчеты, позволяющие оценить зависимость изменения крутящего момента на валу асинхронного электродвигателя и распределения тангенциальной составляющей электромагнитных сил в воздушном зазоре от уровня развития дефекта. Полученные данные сопоставлены с результатами, рассчитанными при помощи разработанной авторами конечно-элементной модели, позволяющей оценить состояние асинхронного электродвигателя при возникновении и развитии дефекта несимметрии тока. Теоретически рассчитанные значения крутящего момента на валу совпадают с данными, полученными при конечно-элементном моделировании. Построены объемные графики распределения во времени рассчитанных значений тангенциальной составляющей электромагнитных сил по окружности воздушного зазора и магнитной индукции, полученной при конечно-элементном моделировании, графики изменения фазы вращающего момента и спектрального состава силовой результирующей тангенциальной составляющей сил. В результате проведенных исследований установлена зависимость между величиной вращающего момента и распределением тангенциальных сил в конкретный момент времени. Произведены экспериментальные измерения напряженности внешнего магнитного поля. Экспериментальные данные совпадают с теоретическими выкладками, полученными при численном расчете и конечно-элементном моделировании.

Ключевые слова: несимметрия тока; асинхронный двигатель; тангенциальные силы; крутящий момент; магнитная индукция; конечно-элементная модель.

Mathematical, numerical and full-scale modeling of magnetic field parameters in the asynchronous electric motors with nonsymmetrical current phases

I.O. Belsky[a], A.V. Lukyanov[b]

Irkutsk State Transport University; 15, Chernishevsky St., Irkutsk, Russia
[a]belskyigor92@gmail.com, [b]loukian@inbox.ru
[a]https://orcid.org/0000-0003-0804-3083, [b]https://orcid.org/0000-0002-5077-5408
Received 15.03.2018, accepted 20.04.2018

Dynamic characteristics of asynchronous electric motors are considered in the article in the process of emergence and development of a defect in the asymmetry of the phases in the supply current. In conditions of actual operation, the voltage supplied to the equipment is not always symmetrical and identical in all phases. Such reasons as the connection of a powerful load to one of the phases, the closure or breakage of one of the phase conductors may be the cause of the occurrence of uneven distribution. In order to prevent a sudden failure of the electric motor, which can lead to the shutdown of production processes, the creation of faulty situations and increase of economic losses it is necessary to investigate the processes that occur during the nucleation and development of defects. Theoretical calculations have been made to estimate the dependence of the change in the torque on the shaft of an induction motor and the distribution of the tangential component of the electromagnetic forces in the air gap from the defect development level. The obtained data are compared with the results calculated with the help of the finite element model developed by the authors, which makes it possible to estimate the state of an asynchronous electric motor in the event of the appearance and development of a current asymmetry defect. Theoretically calculated values of the torque on the shaft coincide with the data obtained for finite element simulation. The volumetric graphs of the time distribution have been constructed of calculated values of tangential component of the electromagnetic forces along the circumference of air gap and the magnetic induction obtained for finite-element simulation, the graphs of phase changes of torque and the *spectral composition of power resultant tangential component of the forces are constructed. As result of the researches the dependence between the magnitude of torque and distribution of the tangential forces at a particular moment of time is established. Experimental measurements of the strength of an external magnetic field are made. The experimental data coincide with the theoretical calculations obtained in numerical calculations and finite element simulation.*

Keywords: current asymmetry; asynchronous motor; tangential forces; torque; magnetic induction; finite element model.

Введение

Повышение надежности асинхронных машин как наиболее ответственного звена в комплексе производственного оборудования является актуальной задачей [1].

Асинхронные электродвигатели (АД) широко применяются в различных областях промышленности, где внезапный выход из строя может повлечь полную остановку всего производственного цикла, поэтому важен контроль состояния АД на протяжении всего периода эксплуатации [2].

Для организации такого контроля необходимы методы, способные определить техническое состояние АД на текущий момент без остановки и вмешательства в нормальный режим работы оборудования. Исследования различных методов контроля представлены в [3–5].

В условиях реальной эксплуатации подводимое к оборудованию напряжение не всегда симметрично и одинаково по всем фазам. Возникновение неравномерного распределения может быть связано с подключением мощной нагрузки на одну из фаз и, как крайний случай, замыканием или обрывом одного из фазных проводов.

В результате работы АД в воздушном зазоре между ротором и статором возникают силы, имеющие вращающийся и пульсирующий характер [6, 7]. Амплитуда и частота данных силовых волн зависят от механических нагрузок и конструктивного исполнения электродвигателя.

В результате появления даже незначительной несимметрии (2–3 %) возникают тангенциальные колебания ярма статора на удвоенной частоте питающей сети, связанные с воздействием крутящего момента. Радиальные колебания способствуют развитию колебаний статора второй формы *r = 2*, при которых статор принимает форму эллипса.

Моделирование. Математически распределение тангенциальных магнитных сил в воздушном зазоре находится из следующих выражений [8]:

$$p_\tau = a(\vartheta,t)\cdot b(\vartheta,t)\cdot 10^2, \qquad (1)$$

где $a(\vartheta,t)$ — линейная токовая нагрузка статора или ротора; $b(\vartheta,t) = f(\vartheta,t)\cdot\Lambda(\vartheta,t)$ — магнитная индукция в воздушном зазоре в точке с координатой ϑ в момент времени t; $f(\vartheta,t)$ и $\Lambda(\vartheta,t)$ — мгновенные значения результирующей м.д.с. обмоток статора и ротора и магнитной проводимости зазора:

$$\begin{aligned} a(\vartheta,t) &= A_1\cos(p\vartheta-\omega_1 t-\varphi_{a1})+ \\ &+A_2\cos(p\vartheta+\omega_1 t-\varphi_{a2}), \end{aligned} \qquad (2)$$

$$\begin{aligned} b(\vartheta,t) &= B_1\cos(p\vartheta-\omega_1 t-\varphi_{b1})+ \\ &+B_2\cos(p\vartheta+\omega_1 t-\varphi_{b2}), \end{aligned} \qquad (3)$$

где $A_1; A_2$; $B_1; B_2$ — линейная токовая нагрузка статора и индукция результирующего магнитного поля в воздушном зазоре прямого и обратного следования фаз; p — число пар полюсов; $\omega_1 = 2\pi f_c$; f_c — частота сети (50 Гц); $\varphi_{a1};\varphi_{a2}$ — фазы прямого и обратного тока статора; $\varphi_{b1},\varphi_{b2}$ — фазы индукции магнитного поля в зазоре прямого и обратного следования.

Крутильные колебания статора ($r = 0$) возникают под воздействием тангенциальных сил.

Подставляя (2) и (3) в уравнение (1), получим выражение [9]:

$$p_\tau = 0{,}5\cdot 10^2(p_{\tau\,const}+p_{\tau\,p\vartheta}+p_{\tau\,\omega t}+p_{\tau\,p\vartheta\omega t}). \qquad (4)$$

Уравнение тангенциальных сил включает четыре составляющие:

– постоянные:

$$\begin{aligned} p_{\tau\,const} &= A_1B_1\cos(\varphi_{a1}-\varphi_{b1})+ \\ &+A_2B_2\cos(\varphi_{a2}-\varphi_{b2}); \end{aligned}$$

– зависящие от углового положения и числа пар полюсов:

$$\begin{aligned} p_{\tau\,p\vartheta} &= A_1B_2\cos(2p\vartheta-\varphi_{a1}-\varphi_{b2})+ \\ &+A_2B_1\cos(2p\vartheta-\varphi_{a2}-\varphi_{b1}); \end{aligned}$$

– зависящие от времени и угловой скорости:

$$\begin{aligned} p_{\tau\,\omega t} &= A_1B_2\cos(2\omega_1 t+\varphi_{a1}-\varphi_{b2})+ \\ &+A_2B_1\cos(2\omega_1 t-\varphi_{a2}+\varphi_{b1}); \end{aligned}$$

– зависящие от углового положения, числа пар полюсов, от времени и угловой скорости:

$$\begin{aligned} p_{\tau\,p\vartheta\omega t} &= A_1B_1\cos(2p\vartheta-2\omega_1 t-\varphi_{a1}-\varphi_{b1})+ \\ &+A_2B_2\cos(2p\vartheta+2\omega_1 t-\varphi_{a2}-\varphi_{b2}); \end{aligned}$$

Вращающий момент ротора, в зависимости от распределения по поверхности ротора тангенциальных магнитных сил, равен:

$$M_{вр} = 2\pi R^2 l\int_0^{2\pi} p_\tau d\vartheta. \qquad (5)$$

После интегрирования по угловой координате ϑ в диапазоне $\vartheta[0;\,2\pi]$ получим:

$$\begin{aligned} M_{вр} &= \pi R^2 l[A_1B_1 cos(\varphi_{b1}-\varphi_{a1})+ \\ &+A_2B_2 cos(\varphi_{b2}-\varphi_{a2})+ \\ &+A_1B_2 cos(2\omega_1 t+\varphi_{a1}-\varphi_{b2})+ \\ &+A_2B_1 cos(2\omega_1 t-\varphi_{a2}+\varphi_{b1})]. \end{aligned} \qquad (6)$$

Так как уравнение вращающего момента (6) содержит составляющие, изменяющиеся во времени с частотой, равной удвоенной круговой частоте сети, то в соответствии с монографией Шубова [8], где в качестве основной тангенциальной силы, возбуждающей крутильные колебания, принята:

$$p_{\tau}^{пр} = 0{,}5A_2B_1\cos(2\omega_1 t + \varphi_{b1} - \varphi_{a2}). \quad (7)$$

То есть, только четвертая компонента уравнения (5). При этом не учитывается третья компонента, также периодически изменяющаяся от времени. В связи с этим уравнение вращающего момента примет вид:

$$M_{вр}^{пр} = 2\pi R^2 l\, p_{\tau}^{пр}. \quad (8)$$

Линейная токовая нагрузка статора находится из выражения:

$$A_{1,2} = \frac{mn_в}{p\tau} I_{1,2}, \quad (9)$$

где $\tau = \frac{\pi d}{2p}$ — длина полюсного деления; m — число фаз; $n_в$ — число витков одной фазы в одной паре полюсов; d — диаметр ротора; $I_{1,2}$ — ток в фазах ротора при прямом и обратном следовании фаз.

Основное магнитное поле в воздушном зазоре определяется как:

$$b_0 = B_0\cos(p\vartheta - \omega_1 t - \varphi_{0r}), \quad (10)$$

где $B_0 = \frac{F_0}{k_н}\Lambda_0\mu_0$ — амплитуда основной волны магнитного поля; $F_0 = \frac{m\sqrt{2}}{\pi}\cdot\frac{n_в k_{об}}{p} I$ — амплитуда основной волны м.д.с. трехфазных обмоток; $k_{об}$ — обмоточный коэффициент; $\Lambda_0 = \frac{1}{\delta k_c}$ — постоянная составляющая магнитной проводимости; δ — воздушный зазор между статором и ротором; k_c — коэффициент Картера; $k_н$ — коэффициент насыщения стали; μ_0 — магнитная постоянная.

Отсюда индукция результирующего магнитного поля в воздушном зазоре прямого и обратного следования фаз:

$$B_{1,2} = \frac{m\sqrt{2}}{\pi}\cdot\frac{n_в k_{об}\mu_0}{pk_c\delta k_н} I_{1,2}. \quad (11)$$

При возникновении несимметрии фаз питающего тока распределение вращающегося магнитного потока примет эллиптическую форму. По аналогии с фазным током он может быть заменен на две вращающиеся в противоположные стороны составляющие: прямой последовательности — создающей движущий момент и обратной последовательности — тормозной.

Для численного расчета величины вращающего момента при возникновении несимметрии питающего тока зададим исходные данные: d = 0,0605 м; l = 0,065 м; δ = 0,00025 м; p = 2; m = 3; $n_в$ = 137; k_c = 1,044; $k_{об}$ = 0,966; $\omega_1 = 2\pi f_c$; f_c = 50 Гц ; $\mu = 4\pi\cdot 10^7$ Гн/м.

График вращающего момента, вычисленного по уравнению (6) [10], для уровня несимметрии 50 % (I_a = 2,95; I_b = 2,43; I_c = 1,17) представлен на рис. 1.

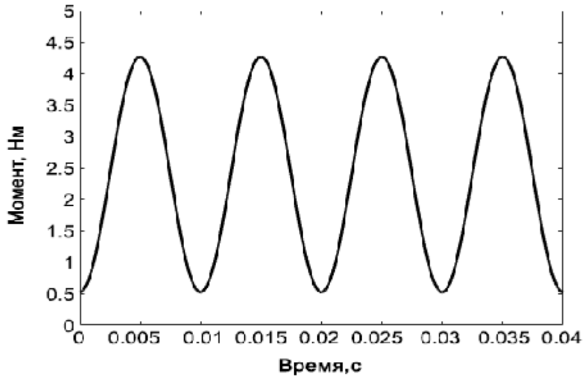


Рис. 1. Вращающий момент при уровне несимметрии 50 %

Проанализировав график на рис. 1, можно сделать вывод, что полученный в результате расчетов сигнал имеет постоянную составляющую с наложением на нее переменной периодом T = 0,01 с, т. е. с частотой $2f_c$ = 100 Гц (двойной частотой сети). Уровень постоянной составляющей сигнала равен 2,4 Нм.

На рис. 2 представлен график зависимости максимального $M_{вр.\max}$, среднего $M_{вр.ср.}$ и минимального $M_{вр.\min}$ значений вращающего момента на валу при различных уровнях несимметрии тока.

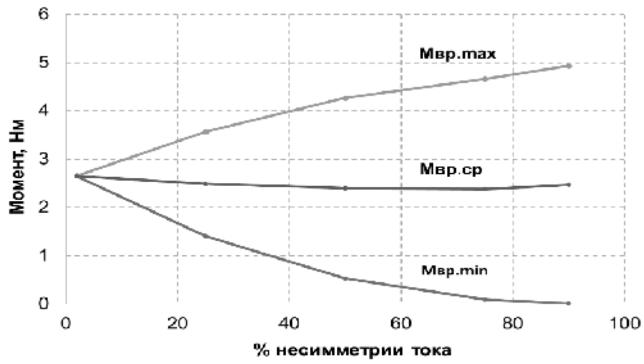
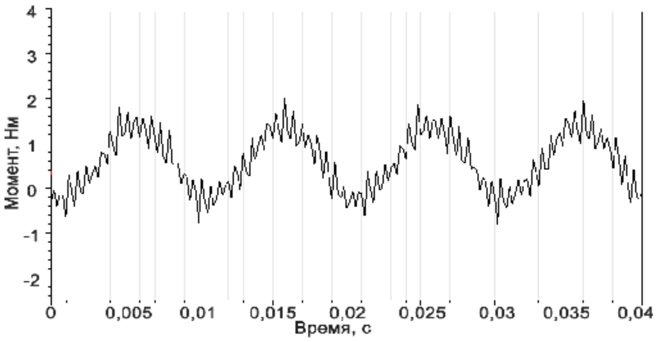


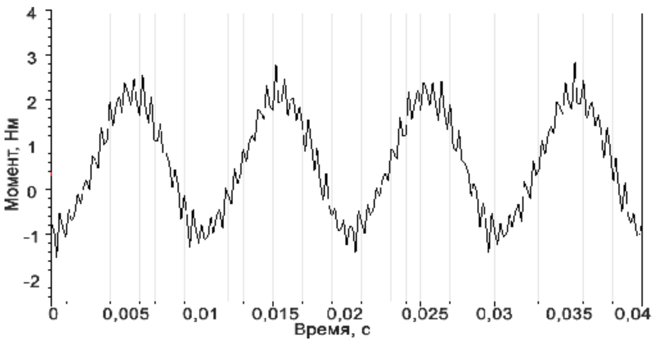
Рис. 2. Изменение вращающего момента от несимметрии тока одной фазы

На графиках (рис. 2) видно, что при возрастании уровня несимметрии увеличивается переменная составляющая временного сигнала, в то время как постоянная изменяется незначительно.

Для оценки правильности расчетов вращающего момента произведено моделирование работы электродвигателя с искусственно созданным дефектом несимметрии фаз питающего тока [11, 12] в программном пакете конечно-элементного моделирования ANSYS Maxwell, предназначенном для моделирования двумерных и трехмерных электромагнитных полей различных электромеханических систем. Модель была создана на основе геометрических размеров и характеристик реального двигателя [13]. На рис. 2 представлены графики вращающего момента при уровнях несимметрии 25 и 50 %.



а)



б)

Рис. 3. Изменение величины вращающего момента: *а* — несимметрия 25 %; *б* — несимметрия 50 %

Сравнив графики на рис. 1 и 3, можно сделать вывод о сходимости результатов расчета вращающего момента по формуле (6) с данными, полученными при конечно-элементном моделировании. Был получен сигнал с амплитудой, отличающейся не более чем на 10 %, и частотой 100 Гц.

На обоих графиках наблюдается наличие высокочастотной составляющей частотой 1 780 Гц, что объясняется наличием зубчато-пазовой структуры магнитопровода ротора [14, 15].

При номинальной частоте вращения 1 483 об/мин за одну секунду происходит 24,72 оборота, это значит, что один оборот ротора занимает время, равное 1/24,72 = 0,04 с. Так как количество стержней беличьей клетки равно 18, время прохода одного стержня через зубец статора равно 0,04/18 = 0,00225 с. Частота прохода пазов ротора равна 445 Гц. При количестве полюсов двигателя, равном четырем, имеем

445 · 4 = 1 780 Гц.

Наличие переменной составляющей частотой 100 Гц говорит о значительном вкладе токов обратной последовательности [1, 16] в возникновение вращающего момента. Токи обратной последовательности создают в статоре магнитное поле, вращающееся относительно ротора с двойной синхронной частотой в направлении, противоположном вращению ротора [17]. Из-за воздействия этих токов в АД возникает тормозной электромагнитный момент, приводящий к увеличению вибрации статора [18, 19], износу составных частей, нагреву АД и, как следствие этого, сокращению срока службы изоляции.

График на рис. 4 иллюстрирует изменение фазы максимального значения тангенциальных сил, действующей в воздушном зазоре при увеличении уровня несимметрии.

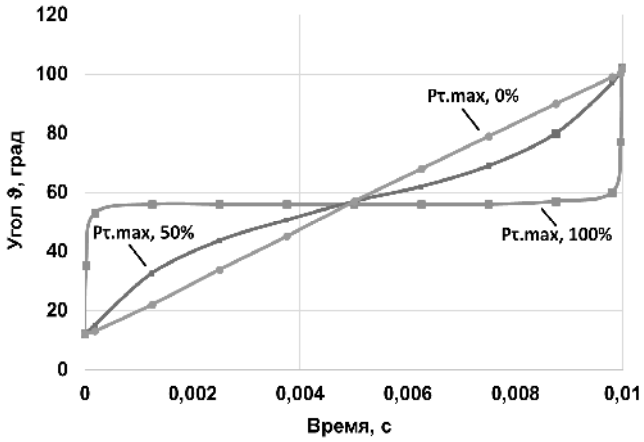


Рис. 4. Изменение минимального и максимального значения тангенциальных сил по окружности при уровне несимметрии 0; 50 и 100 %

На данном графике видно, что изменение амплитуды тангенциальных сил с течением времени происходит неравномерно. Так как тангенциальные силы создают крутящий момент, увлекающий за собой ротор, неравномерное их распределение вызовет скачкообразное изменение угловой скорости вращения с замедлением на некоторый промежуток временем и последующим быстрым проскоком, повторяющееся с частотой воздействия этих сил.

На рис. 5 представлено распределение тангенциальных сил в зависимости от изменения угловой координаты и времени.

При симметричной нагрузке на фазах по обмоткам статора протекает электрический ток, который создает магнитное поле в воздушном зазоре [20]. Как видно из рисунка, возникают волны тангенциальных электромагнитных полей, имеющие равномерно распределенные вдоль полюсных делений максимумы (гребни) и минимумы (впадины), которые, воздействуя на ротор, увлекают его за собой. Так как распределение магнитного поля является равномерным, вращение ротора происходит с постоянной угловой скоростью.

Картина распределения магнитной индукции, полученная при помощи конечно-элементной модели при уровне несимметрии тока 0 %, представлена на рис. 6.

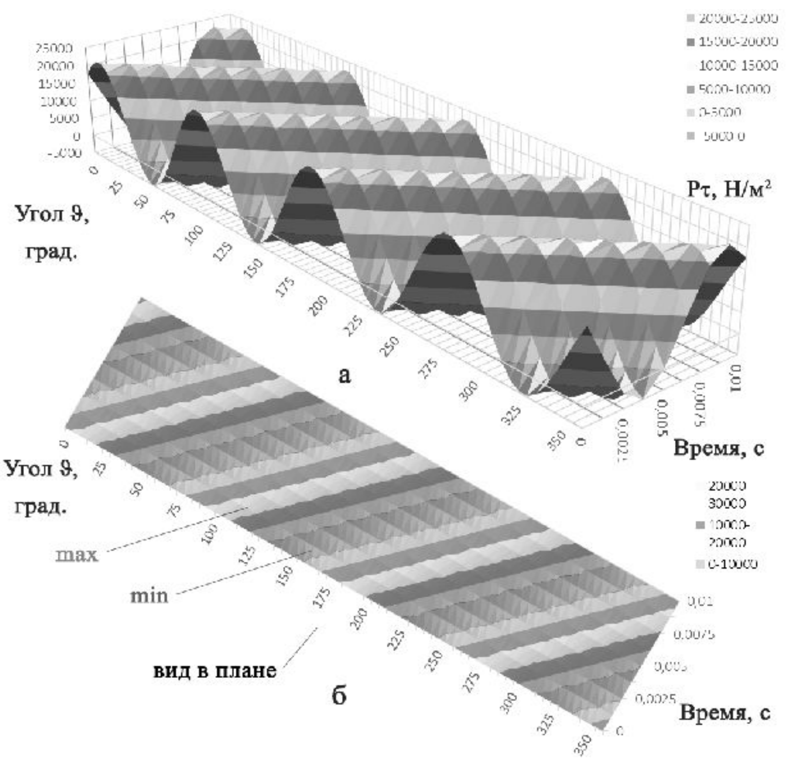


Рис. 5. Распределение тангенциальных сил при несимметрии 0 %

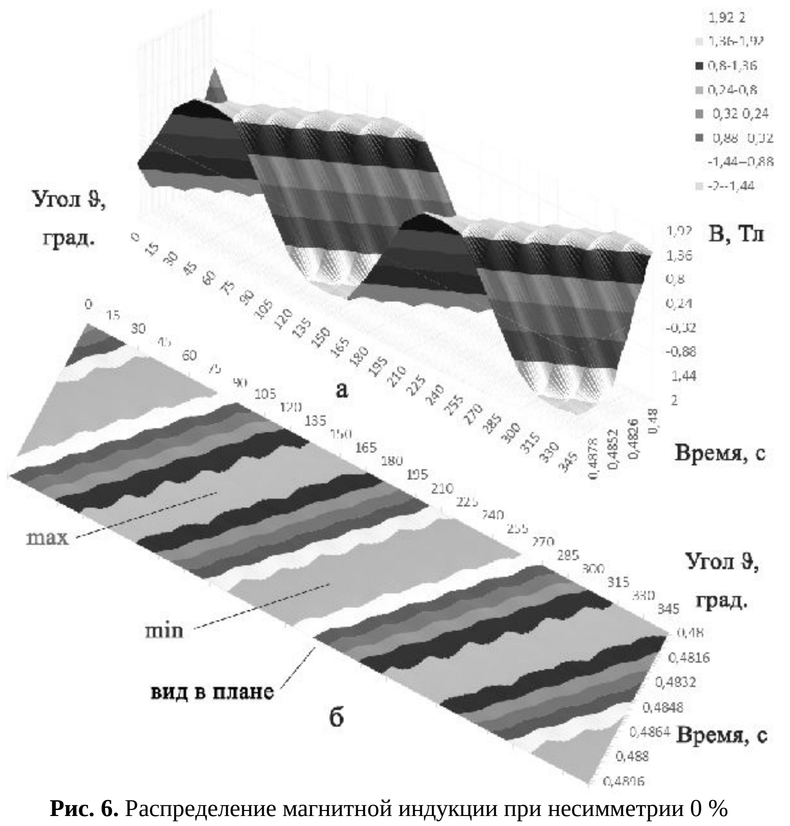


Рис. 6. Распределение магнитной индукции при несимметрии 0 %

Распределение магнитной индукции имеет равномерный характер, вращающееся магнитное поле равномерно увлекает за собой ротор, угловая скорость вращения которого постоянна во времени.

На рис. 7 представлено распределение тангенциальных сил в зависимости от изменения угловой координаты и времени при уровне несимметрии 50 %.

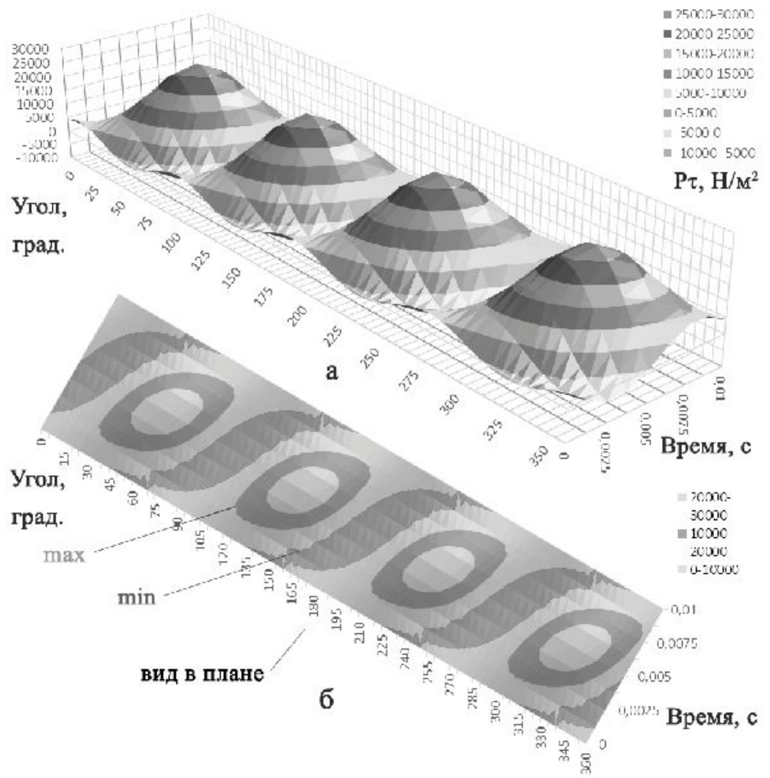


Рис. 7. Распределение тангенциальных сил при несимметрии 50 %

При возникновении и развитии несимметрии происходит изменение амплитуды тангенциальных сил, что приводит к их неравномерному распределению по окружности статора. За счет этого происходит неравномерное вращение ротора АД с замедлением в местах расположения обмотки фазы, в которой возникла несимметрия, и последующим быстрым проскоком в местах расположения двух других фаз.

На рис. 8 изображено распределение магнитной индукции в зависимости от изменения угловой координаты и времени при уровне несимметрии 50 %.

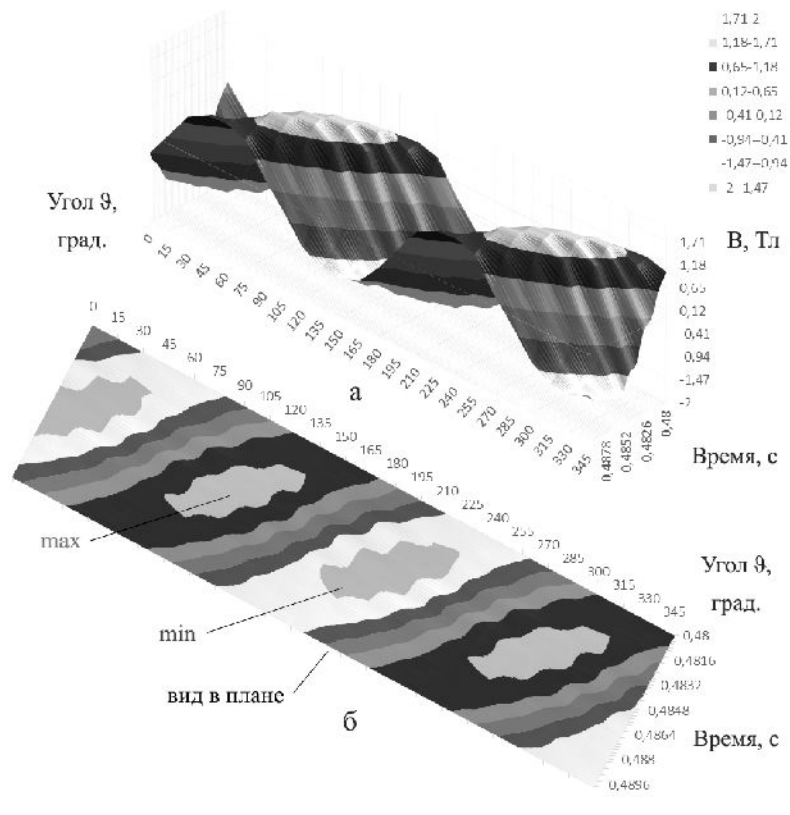


Рис. 8. Распределение магнитной индукции при несимметрии 50 %

На представленных рисунках видно, что при увеличении уровня несимметрии происходит искажение магнитного поля. Образуются минимумы (провалы) в местах расположения обмоток фазы, несимметрия которой создавалась, что связано с протеканием в них меньших токов, и максимумы (кучности) в местах расположения обмоток других фаз, что связано с возрастанием величины протекающих токов вследствие их перераспределения. Наличие данной неравномерности в распределении магнитного поля приводит к изменению угловой скорости вращения ротора АД с замедлением в местах расположения обмотки фазы, в которой наблюдается несимметрия, и быстрым проскоком в местах расположения обмоток других фаз. Данное явление приводит к увеличению уровня вибрации статора АД, так как происходит изменение величины действующих в воздушном зазоре тангенциальных сил, создающих крутящий момент.

Для того чтобы перейти от распределенной системы сил к n эквивалентным сосредоточенным силам, проинтегрируем выражение (4) в пределах $\vartheta_0 \div \vartheta_1$:

$$\int_{\vartheta_0}^{\vartheta_1} P_\tau(\vartheta)d\vartheta = \frac{A_1B_1}{2}(\vartheta_1-\vartheta_0)\cdot\cos(\varphi_{b1}-\varphi_{a1})+$$
$$+\frac{A_1B_2}{2p}\sin[p(\vartheta_1-\vartheta_0)]\cdot\cos[\varphi_{a1}+\varphi_{b2}-p(\vartheta_1+\vartheta_0)]+$$
$$+\frac{A_2B_1}{2p}\sin[p(\vartheta_1-\vartheta_0)]\cdot\cos[\varphi_{a2}+\varphi_{b1}-p(\vartheta_1+\vartheta_0)]+\frac{A_2B_2}{2}(\vartheta_1-\vartheta_0)\cdot\cos(\varphi_{b2}-\varphi_{a2})+$$
$$+\frac{A_1B_1}{2p}\sin[p(\vartheta_1-\vartheta_0)]\cdot\cos[2\omega_1t+\varphi_{a1}+\varphi_{b1}-p(\vartheta_1+\vartheta_0)]+$$
$$+\frac{A_1B_2}{2}(\vartheta_1-\vartheta_0)\cdot\cos(2\omega_1t+\varphi_{a1}-\varphi_{b2})+\frac{A_2B_1}{2}(\vartheta_1-\vartheta_0)\cdot\cos(2\omega_1t-\varphi_{a2}+\varphi_{b1})+$$
$$+\frac{A_2B_2}{2p}\sin[p(\vartheta_1-\vartheta_0)]\cdot\cos[2\omega_1t-\varphi_{a2}-\varphi_{b2}+p(\vartheta_1+\vartheta_0)]$$

Произведя интегрирование тангенциальной силы по углу ϑ в пределах $\vartheta[0;\,\pi/2]$ — периода переменной составляющей по выражению (4), получим сосредоточенную на этом участке постоянную тангенциальную силу, описывающуюся выражением:

$$R^2l\cdot\int_0^{\pi/2} p_\tau(\vartheta)d\vartheta = \frac{M_{вр}}{4}.$$

Это значит, что интегрирование в пределах $\vartheta[0;\,\pi/4]$ дает возможность перейти от распределенной системы сил к двум эквивалентным силам: максимальной — $P_{\tau\Sigma\max}$ и минимальной — $P_{\tau\Sigma\min}$, вращающимися с угловой скоростью статора с угловым и временным сдвигами, равными соответственно $\pi/4$ и T/4.

Так как действие сил $P_{\tau\Sigma\max}$ и $P_{\tau\Sigma\min}$ происходит в моменты времени $[0;\frac{\pi}{4}]$ и $[\frac{\pi}{4};\frac{\pi}{2}]$, при их суммировании получим результирующую интегральную силу $P_{\tau\Sigma\Sigma}$, действующую в воздушном зазоре и создающую переменную часть вращающего момента:

$$P_{\tau\Sigma\Sigma} = \int_0^{\pi/4} p_\tau(\vartheta)d\vartheta + \int_{\pi/4}^{\pi/2} p_\tau(\vartheta)d\vartheta = P_{\tau\Sigma\max}+P_{\tau\Sigma\min},$$

$$M_{вр.\mathrm{var}} = R^2l\cdot P_{\tau\Sigma\Sigma}.$$

На рис. 9 показано результирующее значение $P_{\tau\Sigma} = P_{\tau\Sigma\max} - P_{\tau\Sigma\min}$ при уровне несимметрии питающего тока 100 %.

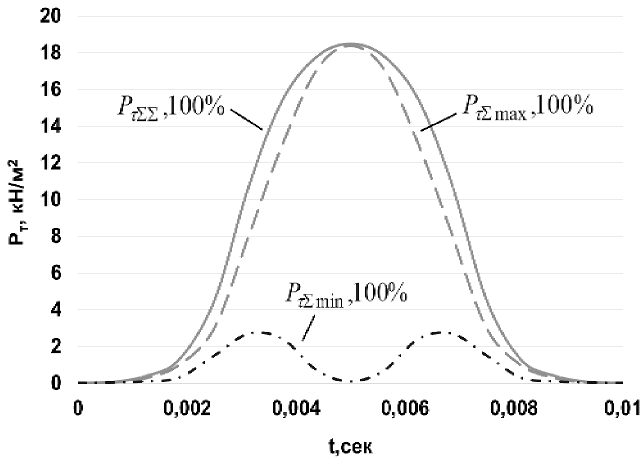


Рис. 9. Распределение результирующей силы $P_{\tau\Sigma}$

Спектральный состав силовой результирующей функции $P_{\tau\Sigma}(t)$ показан на рис. 10.

При спектральном анализе временного сигнала зависимости $P_{\tau\Sigma}(t)$ хорошо просматриваются составляющие на частотах, кратным 100 Гц. Также видны боковые частоты вокруг 2-й и 3-й гармоники частоты 100 Гц с интервалом $\pm f_s\cdot n$, где $n=1{,}2$; f_s — частота вращения магнитного поля.

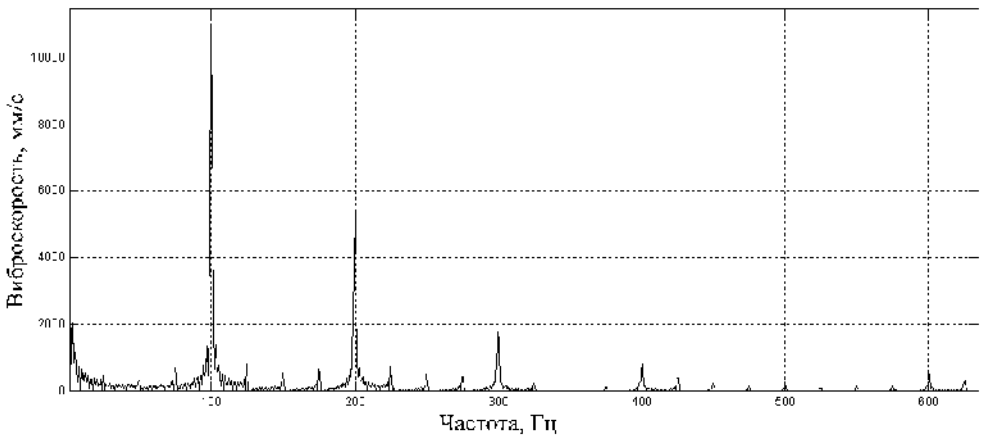


Рис. 10. Спектральный состав силовой результирующей функции $P_{\tau\Sigma}(t)$

Многоканальная система контроля внешнего магнитного поля (ВМП) АД. Экспериментальные исследования проводились при помощи разработанной авторами многоканальной (12 каналов) системы контроля напряженности ВМП рассеяния. На рис. 11 представлен опытный образец комплекса контроля ВМП.

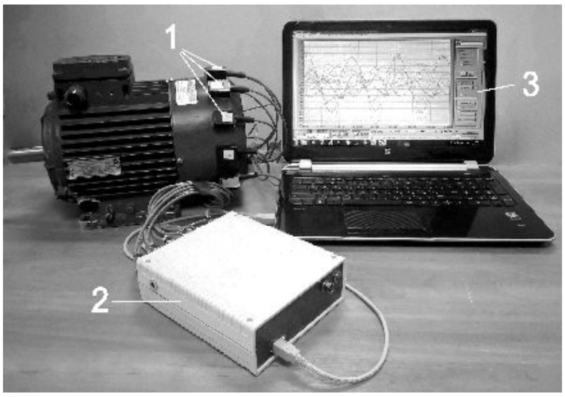


Рис. 11. Многоканальная система: *1* — датчики Холла (12 шт.); *2* — измерительный блок; *3* — ПК с программой анализа и визуализации ВМП

Система имеет в своем составе 14-битный АЦП с частотой выборки 400 кГц, что позволяет с высокой скоростью производить точные измерения параллельно по всем измерительным каналам. Регулируемый коэффициент усиления дает возможность измерять напряженность ВМП электродвигателей различной мощности. Малый размер датчиков магнитного поля позволяет производить диагностику электрических машин малых габаритов.

На рис. 12 представлена схема измерения напряженности ВМП АД.

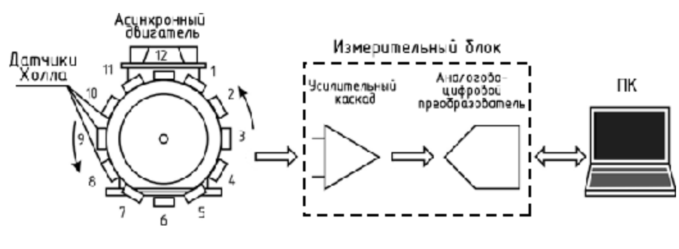


Рис. 12. Схема измерения напряженности ВМП АД

В качестве чувствительного к магнитному полю элемента использовался датчик, основанный на эффекте Холла, обладающий линейной передаточной характеристикой.

Полученные в результате измерения аналоговые сигналы, поступающие с установленных на корпусе электродвигателя 12-ти датчиков, подаются на первый усилительный каскад. Далее сигналы передаются по экранированному кабелю в измерительный блок, где происходят их фильтрация, усиление и оцифровка. Оцифрованный с помощью АЦП сигнал подается на персональный компьютер для дальнейшей обработки и анализа.

Анализ экспериментальных данных. Для исследования динамики развития дефекта несимметрии фаз питающего тока был проведен ряд экспериментальных измерений бездефектного АД, далее искусственно создавался дефект путем введения дополнительного сопротивления в обмотку одной из фаз статора. Полученные данные сравнивались с бездефектным АД, и делались соответствующие выводы. [1]

На рис. 13 изображено полученное в результате измерения временное распределение напряженности ВМП АД по окружности за период, в зависимости от положения датчика при уровне несимметрии 0 %.

Распределение напряженности ВМП по окружности АД имеет равномерный характер, магнитное поле вращается равномерно по окружности статора.

При возникновении и развитии дефекта меняется характер распределения ВМП, как и в случае с конечно-элементной моделью распределения магнитного поля, появляются минимумы в местах расположения дефектной обмотки и максимумы в местах расположения обмоток двух других фаз. Это происходит вследствие перераспределения токов, протекающих в обмотках статора.

Нарушение симметрии магнитного поля, вызванное изменением величины фазных токов, приводит к флуктуациям тангенциальной составляющей электромагнитных сил в воздушном зазоре и, как следствие этого, изменению величины крутящего момента на валу АД.

На рис. 14 представлено распределение напряженности ВМП при несимметрии тока в одной из фаз статора 50 %.

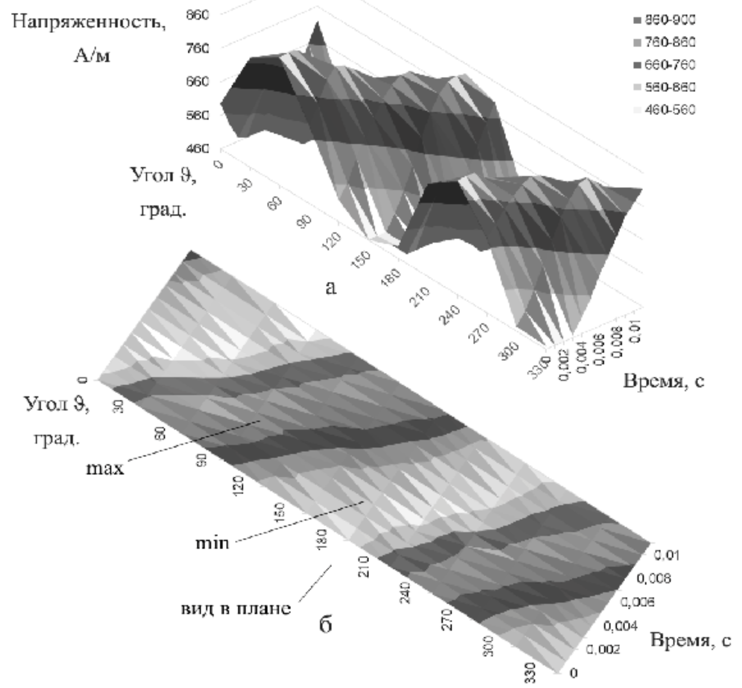


Рис. 13. Распределение ВМП АД при несимметрии 0 %

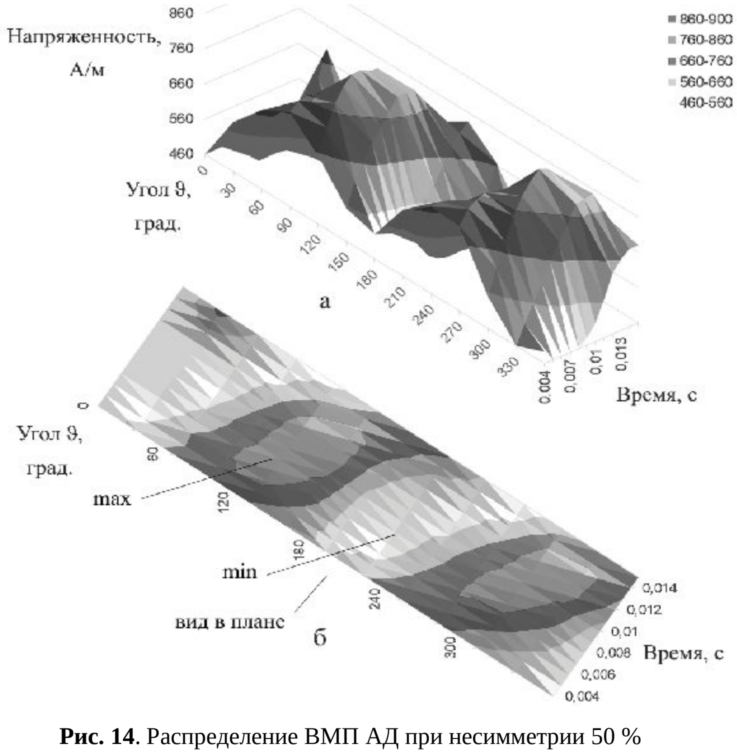


Рис. 14. Распределение ВМП АД при несимметрии 50 %

На основе полученных экспериментальных данных можно сделать вывод о корректности конечно-элементной модели и достоверности рассчитанных теоретических значений с данными, полученными при экспериментальных исследованиях.

Выводы

В результате проведенных исследований была установлена зависимость между величиной вращающего момента и распределением тангенциальных сил в конкретный момент времени. Установлено, что с увеличением уровня несимметрии искажается форма магнитного поля за счет возникновения и увеличения токов обратной последовательности, приводящих к возникновению тормозящего момента. Построена конечно-элементная модель, позволяющая изучить процессы и оценить состояние АД при возникновении и развитии дефекта несимметрия тока.

Произведены экспериментальные измерения напряженности ВМП для случаев с нормальным режимом работы и несимметрией 50 %. В ходе исследований получено пространственное распределение магнитного поля по окружности АД, позволяющее оценить уровень развития дефекта. Полученные в ходе эксперимента данные совпадают с теоретическими выкладками, рассчитанными при численном и конечно-элементном моделировании.

Литература

1. Бельский И.О., Лукьянов А.В. Исследование параметров внешнего магнитного поля асинхронных электродвигателей при несимметрии фаз питающего тока // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 2 (50). С. 186–191.

2. 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.

3. Benbouzid M. Bibliography on induction motors faults detection and diagnosis // IEEE Trans. EnergyConvers. 1999.Vol. 14, № 4. P. 1065–1074.

4. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / под ред. В.В.Клюева. 3-е изд., испр. и доп. М.: Машиностроение, 2005.636 с.

5. Nandi S., Toliyat A., Li X.Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors – A Review // EEE transactions on energy conversion. 2005. Vol. 20, № 4. P. 32-37.

6. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.:Энергия, 1978.832 с.

7. Xin G. Simulation of Vibrations in Electrical Machines for Hybrid-electric Vehicles. Master’s Thesis. 2014. Chalmers University of Technology. Göteborg, 2014.

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. Кетков Ю.Л. Кетков А.Ю., Шульц М.М.MATLAB 7 — программирование, численные методы. СПб.*:* БХВ-Петербург, 2005. 752 *с.*

11. Liang B., Payne B., Ball A., Iwnicki S. Simulation and fault detection of three-phase induction motors. Mathematics and Computers in Simulation. 2002. № 61. P. 1–15.

12. Martinez J., Belahcen A., Arkkio A. A 2D FEM model for transient and fault analysis of Induction machines. Przeglad Elektrotechniczny. 2012. Vol. 88 (7B). P. 157–160.

13. Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболевская Е.А. Асинхронные двигатели серии 4А:справочник. М.: Энергоатомиздат, 1982. 504 с.

14. Kelvin C. Maliti Modelling and analysis of magnetic noise in squirrel-cage induction motors: Doctoral Dissertation / Royal Institute of Technology. Stockholm, 2000.

15. Khezzar A., Kaikaa M.Y., Boucherma M., Razik H. On the use of slot harmonics as a potential indicator of rotor bar breakage in the induction machine // IEEE Trans. Ind. Electron. 2009.Vol. 56, № 11. P. 4592–4605.

16. УльяновС. А. Электромагнитные переходные процессывэлектрических системах. М., «Энергия», 1970. – 520 с.

17. Петухов В.С., Соколов В.А. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока // Новости электротехники. 2005. № 1 (31). С. 50–52.

18. Лукьянов А.В. Классификатор вибродиагностических признаков дефектов роторных машин. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 1999. 228 с.

19. Русов В.А. Спектральная вибродиагностика:метод. пособие. Пермь, 1996.

20. Брынский, Е. А. Электромагнитные поля в электрических машинах / Е. А. Брынский, Я. Б. Данилевич, В. И. Яковлев. Л.:Энергия, 1979. 176 с.

21. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: / И. П. Копылов. М. : Высш. шк., 2001. 327 с.

References

1. Bel’skij I.O., Luk’yanov A.V.Research parameters of external magnetic field of asynchronous electric motors with unbalanced supply current //Moderntechnologies. System analysis. Modeling. 2016. № 2 (50). P. 186-191.

2. 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.

3. Benbouzid M. Bibliography on induction motors faults detection and diagnosis // IEEE Trans. Energy Convers. 1999. Vol. 14, № 4. P. 1065-1074.

4.Nondestructive testing and diagnostics: Handbook/ pod red. V.V. Klyueva. 3-e izd., ispr. i dop. M.: Mashinostroenie, 2005. 636p.

5. Nandi S., Toliyat A., Li X. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors - A Review // EEE transactions on energy conversion. 2005. Vol. 20, № 4. P. 32-37.

6. Vol’dek A.I. Electric machines. L.: EHnergiya, 1978. 832p.

7. Xin G. Simulation of Vibrations in Electrical Machines for Hybrid-electric Vehicles. Master’s Thesis. 2014. Chalmers University of Technology. Göteborg, 2014.

8. Shubov I.G. Noise and vibration of electrical machines. L.: Ehnergoatomizdat. Leningr. otd-nie, 1986. 208 p.

9. Luk’yanov A.V., Romanovskij A.I., Luk’yanov D.A.Dynamics of an asynchronous drive with asymmetry of current in phases //Moderntechnologies. System analysis. Modeling. 2010. № 3 (27). P. 96-102.

10. Ketkov Yu.L., Ketkov A.Yu., Shul’c M.M. MATLAB 7 - programmirovanie, chislennye metody. SPb.: BHV-Peterburg, 2005. 752 p.

11. Liang B., Payne B., Ball A., Iwnicki S. Simulation and fault detection of three-phase induction motors. Mathematics and Computers in Simulation. 2002. № 61. P. 1-15.

12. Martinez J., Belahcen A., Arkkio A.A. 2D FEM model for transient and fault analysis of Induction machines. Przeglad Elektrotechniczny. 2012. Vol. 88 (7B). P. 157-160.

13. Kravchik A.Eh., Shlaf M.M., Afonin V.I., Sobolevskaya E.A.Asynchronous motors of a series 4A: spravochnik. M.: Ehnergoatomizdat, 1982. 504 p.

14. Kelvin S. Maliti Modelling and analysis of magnetic noise in squirrel-cage induction motors: Doctoral Dissertation / Royal Institute of Technology. Stockholm, 2000.

15. Khezzar A., Kaikaa M.Y., Boucherma M., Razik H. On the use of slot harmonics as a potential indicator of rotor bar breakage in the induction machine // IEEE Trans. Ind. Electron. 2009. Vol. 56, № 11. P. 4592-4605.

16. Ul’yanov S.A. Electromagnetic transient processes in electrical systems. A textbook. M., «EHnergiya», 1970. 520p.

17. Petuhov V.S, Sokolov V.A.Diagnosis of the condition of electric motors. Method of spectral analysis of consumed current //The News of Electrical Engineering. 2005. № 1 (31). P. 50-52.

18. Luk’yanov A.V.Classifier of vibrodiagnostics sings of defects in rotor machines. Irkutsk: Izd-vo IrGTU, 1999. 228 p.

19. Rusov V.A.Spectral vibrodiagnostics: metodo allowance. Perm’, 1996.

20. Brynskij, E. A. EHlektromagnitnye polya v ehlektricheskih mashinah / E. A. Brynskij, YA. B. Danilevich, V. I. YAkovlev // L.:EHnergiya, 1979. 176 s.

21. Kopylov I.P. Matematicheskoe modelirovanie ehlektricheskih mashin: / I. P. Kopylov. – M. : Vyssh. shk., 2001. 327 s.