

Исследование радиальных сил асинхронных электродвигателей при несимметрии тока в фазах

А.В. Лукьянов¹✉, И.С. Куприянов¹, Д.А. Лукьянов²

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

²Технологическая служба Управления Восточно-Сибирской железной дороги, г. Иркутск, Российская Федерация

✉loukian@inbox.ru

Резюме

В статье рассмотрены результаты исследования поведения радиальных сил в воздушном зазоре асинхронного электродвигателя в нормальном режиме работы и при возникновении несимметрии фаз питающего тока и ее дальнейшем развитии вплоть до обрыва фазы. При эксплуатации в условиях производства подводимая к асинхронному электроприводу трехфазная электрическая сеть не всегда бывает симметрична. Причиной этого могут быть как особенности электрической цепи (подключение однофазных потребителей энергии), так и неисправности монтажа или преобразующего оборудования, а часто и все факторы в комплексе. Для того чтобы прогнозировать поведение как самого асинхронного электродвигателя, так и смежных с ним систем, предотвратить аварийный выход асинхронного электродвигателя из строя, необходимо провести полное и достоверное исследование процессов, происходящих в приводе при несимметрии тока в фазах. В работе построена уточненная математическая модель формирования радиальных сил в воздушном зазоре электродвигателя, по которой произведены расчеты и дана оценка изменения амплитуды и распределения радиальных сил при различных уровнях несимметрии питающего тока в фазах статора. По результатам расчетов построены трехмерные графики распределения радиальных сил в воздушном зазоре и определен характер радиальных колебаний. Проведено конечно-элементное моделирование воздействия радиальных сил на статор. По его результатам определены характер и величина деформации статора при действии радиальных сил. Представленные в рамках статьи результаты исследований позволяют судить о колебательных и тепловых процессах, протекающих в машине под действием радиальных сил при наличии несимметрии фаз питающего тока. В лабораторных условиях произведены измерения вибрации и тепловой картины при работе электродвигателя при наличии несимметрии питающего тока в фазах статора, которые подтверждают данные, полученные в результате теоретических исследований.

Ключевые слова

несимметрия тока, асинхронный двигатель, радиальные силы, воздушный зазор электродвигателя, конечно-элементное моделирование, вибрация, обрыв фазы

Для цитирования

Лукьянов А.В. Исследование радиальных сил асинхронных электродвигателей при несимметрии тока в фазах / А.В. Лукьянов, И.С. Куприянов, Д.А. Лукьянов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 4 (76). С. 10–22. DOI 10.26731/1813-9108.2022.4(76).10-22.

Информация о статье

поступила в редакцию: 7.12.2022 г.; поступила после рецензирования: 26.12.2022 г.; принята к публикации: 27.12.2022 г.

Research of radial forces in asynchronous electric motors with nonsymmetrical current phases

A.V. Lukyanov¹✉, I.S. Kupriyanov¹, D.A. Lukyanov²

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

²Technological Service of the Management of the East Siberian Railway, Irkutsk, the Russian Federation

✉loukian@inbox.ru

Abstract

The article considers the results of a study of the behavior of radial forces in an asynchronous electric motor air gap in normal operation mode and in the event of asymmetry of the supply current and its development up to phase failure. When operating under a production conditions, a three-phase electrical network supplied to an asynchronous electric drive may not always be symmetrical. The reason can be both the characteristics of the electrical circuit (connection of single-phase energy consumers) and malfunctions of installation or converting equipment, and often a combination of all factors. In order to predict the behavior of both the asynchronous electric motor itself and dependent and adjacent systems and prevent the asynchronous electric motor failure, it is necessary to conduct a complete and reliable study of the processes occurring in the drive under current asymmetry in phases. A mathematical model of the behavior of radial forces in the air gap of the electric motor was constructed, according to which calculations were made allowing to evaluate the change in the amplitude and distribution of radial forces at various levels of supply current asymmetry in the stator phases. Based on the results of calculations, three-dimensional graphs of the distribution of radial forces in the air gap were constructed, and the nature of their oscilla-

tions was determined. A finite-element simulation of the effect of radial forces on the stator has been carried out. The results determined the nature and magnitude of the stator deformation under the influence of radial forces. The results of the research presented within the framework of the article make it possible to assess the oscillatory and thermal processes occurring in the machine under the radial forces in the presence of asymmetry of the supply current phases. Under laboratory conditions, vibration and thermal picture measurements were made during the operation of the electric motor in the presence of asymmetry of the supply current in the stator phases, which confirm the data obtained from the results of theoretical studies.

Keywords

current unbalance, asynchronous motor, radial forces, electric motor air gap, finite element modeling, oscillations, phase failure

For citation

Lukyanov A.V., Kupriyanov I.S., Lukyanov D.A. Issledovanie radial'nykh sil asinkhronnykh elektrodvigatelei pri nesimmetrii toka v fazakh [Research of radial forces of asynchronous electric motors with nonsymmetrical current phases]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 4 (76), pp. 10–22. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.4(76).10-22.

Article Info

Received: December 7, 2022; Revised: December 26, 2022; Accepted: December 27, 2022.

Введение

В работе проведены экспериментальные исследования тангенциальной и радиальной вибрации, генерируемой тангенциальными и радиальными силами [1–3]. Это повышает актуальность исследований возмущающих сил и вида их пространственно-временных зависимостей.

В отличие от лабораторных условий, в процессе эксплуатации асинхронного электропривода на каждую из его фаз может приходиться несимметричная нагрузка. Причинами возникновения этого являются: подключение мощных однофазных потребителей, дефекты фазорасщепителя в электровозах или монтажа асинхронного электропривода [3]. В итоге возникает неисправность – несимметрия фазного тока, и как ее крайнее проявление – обрыв фазы [2]. В связи с этим повышается актуальность исследования влияния изменения радиальных сил на силовые, динамические и тепловые характеристики асинхронных электродвигателей (АЭД) вспомогательных машин электровозов [4], что и является целью данной работы. В статье представлены результаты конечно-элементного моделирования механических колебаний электродвигателей и получена зависимость изменения уровня вибрации от воздействия радиальных сил при увеличении несимметрии тока в обмотках фаз. При моделировании механических колебаний при работе в несимметричных режимах предполагалось, что конструкция АЭД полностью симметрична (электрические и магнитные параметры обмоток фаз статора полностью идентичны). Приведены также результаты лабораторных измерений радиальных вибраций и тепловизионной регистра-

ции при работе электродвигателя с данным дефектом.

Анализ радиальных электромагнитных сил в воздушном зазоре электродвигателя

Согласно [1] величина и распределение радиальных p_r и тангенциальных p_τ электромагнитных сил в воздушном кольцевом зазоре (рис. 1) определяются следующими выражениями:

$$p_r = \frac{1}{2\mu_0} b^2(\vartheta, t),$$

$$p_\tau = a(\vartheta, t) \cdot b(\vartheta, t)$$

где $a(\vartheta, t)$ – линейная токовая нагрузка ротора или статора; $b(\vartheta, t) = f(\vartheta, t) \cdot \Lambda(\vartheta, t)$ – магнитная индукция в зазоре между ротором и статором в точке в момент времени t с угловой координатой ϑ ; $f(\vartheta, t)$ и $\Lambda(\vartheta, t)$ – мгновенные значения результирующей магнитодвижущей силы (МДС) электрических обмоток статора, стержней ротора и магнитной проводимости зазора [1].

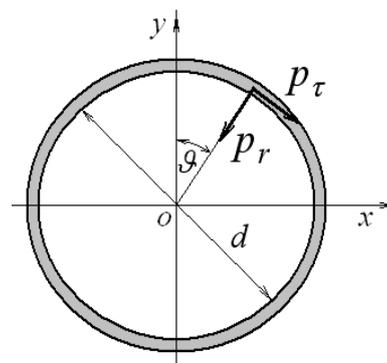


Рис. 1. Силы в кольцевом зазоре между ротором и статором

Fig. 1. Forces in the annular gap between the rotor and the stator

$$\begin{aligned}
 a(\vartheta, t) &= A_1 \cos(p\vartheta - \omega_1 t - \varphi_{a_1}) + \\
 &+ A_2 \cos(p\vartheta - \omega_1 t - \varphi_{a_2}), \\
 b(\vartheta, t) &= B_1 \cos(p\vartheta - \omega_1 t - \varphi_{b_1}) + \\
 &+ B_2 \cos(p\vartheta - \omega_1 t - \varphi_{b_2}),
 \end{aligned}$$

где A_1, A_2, B_1, B_2 – линейная токовая нагрузка статора и индукция результирующего магнитного поля в воздушном зазоре электродвигателя прямого и обратного следования фаз; $\varphi_{b_1}, \varphi_{b_2}$ – фазы индукции магнитного поля в воздушном зазоре прямого и обратного следования фаз; p – число пар полюсов статора прямой и обратной последовательности [1].

Распределенные радиальные силы в воздушном зазоре электродвигателя определяются выражением:

$$\begin{aligned}
 p_r = \frac{a_0}{2} \cdot & \left[(B_1^2 + B_2^2) + B_1^2 \cos^2(p\vartheta - \omega_1 t - \varphi_{b_1}) + \right. \\
 & \left. + B_2^2 \cos^2(p\vartheta - \omega_1 t - \varphi_{b_2}) \right] + \\
 & + a_0 \left[B_1 B_2 \cos(2p\vartheta - \omega_1 t - \varphi_{b_1}) + \right. \\
 & \left. + B_1 B_2 \cos(2p\vartheta + \omega_1 t + \varphi_{b_2}) \right],
 \end{aligned} \quad (1)$$

где $a = 1 / (2\mu_0) = 4 \cdot 10^5$ м/Гн.

Результирующие значения радиальных сил определяются как сумма их переменной и постоянной составляющих. Переменная составляющая меняет значение в пределах каждого полюса машины и представляет собой бегущую вокруг статора силовую волну. Постоянная составляющая в выражении (1) представляет собой систему распределенных сил, которые создают напряжения сжатия, изменяющие величину воздушного зазора машины [2, 4, 5].

Проинтегрировав радиальные силы по

координате ϑ на интервале $\vartheta \in [0; 2\pi]$ с учетом выражения (1), получим результирующую постоянную радиальных сил, действующих по всей длине окружности воздушного зазора:

$$P_r = R_{rot} l_{rot} \int_0^{2\pi} p_r d\vartheta,$$

где R_{rot} – радиус ротора, м; l_{rot} – длина активной части сердечника ротора, м.

Как видно результирующие выражения для расчета значения и распределения радиальных сил содержат как постоянную составляющую, так и изменяющуюся с периодом $2\omega_1 t$ (с удвоенной круговой частотой сети).

График на рис. 2 показывает результат расчета радиальных сил по уравнению (2) и их зависимость от величины несимметрии тока в фазах I_2/I_1 (где I_1 и I_2 – составляющие тока прямой и обратной последовательности) [6]:

$$\begin{aligned}
 P_{r\Sigma(0;2\pi)} = \int_0^{2\pi} p_r d\vartheta = & a_0 \pi (B_1^2 + B_2^2) + \\
 & + 2a_0 B_1 B_2 \pi \cos(2\omega_1 t + \varphi_{b_1} - \varphi_{b_2})
 \end{aligned} \quad (2)$$

Анализ возникающих при несимметрии фазного тока деформаций поля радиальных сил и возмущений переменных составляющих

Для определения характера влияния распределенных в воздушном зазоре радиальных сил необходимо провести анализ данных, полученных из выражения (1) [7–9].

На рис. 3 и 4 представлены графики распределения радиальных сил p_r в воздушном зазоре асинхронного привода при изменении значений угловой координаты $\vartheta \in [0; 2\pi]$ в интерва-

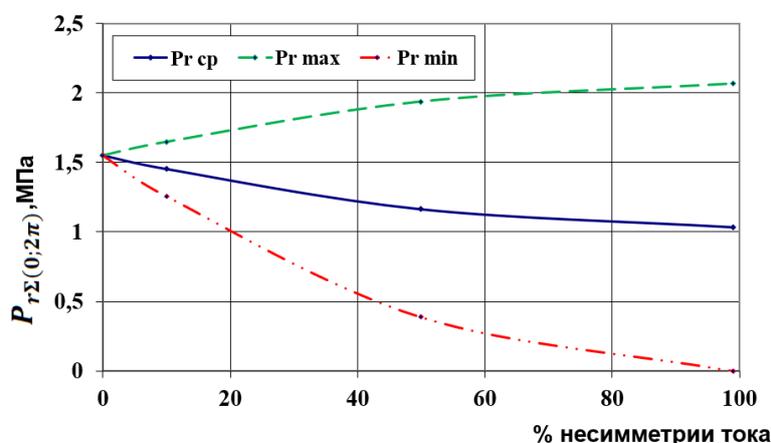


Рис. 2. Изменение радиальных сил в воздушном зазоре при увеличении несимметрии фазного тока
Fig. 2. Change of radial forces in the air gap with increasing phase current asymmetry

лах времени $t = T = 1/2\omega_1$. Данные интервалы были выбраны по причине соответствия периоду изменения сил на межполюсном расстоянии [1, 3, 4, 6]. На рис. 3 представлены графики при нормальном режиме работы привода, т.е. когда токи в фазах статора полностью симметричны (несимметрия 0%), на рис. 4 приведены графики при 100 %-ной предельной несимметрии (обрыв одной фазы обмотки статора).

На приведенных графиках (рис. 3) можно наблюдать, что при нормальном режиме работы электродвигателя (т.е. при симметричной

токовой нагрузке) наблюдаются колебания величины радиальных сил p_r с ярко выраженными локальными максимумами и минимумами.

Количество этих максимумов и минимумов совпадает с числом полюсов [4, 5, 7] и они имеют незначительные отклонения по углу ϑ во времени. Максимальные значения радиальных сил наблюдаются при значениях угловых координат $\vartheta = 70^\circ, 160^\circ, 250^\circ, 340^\circ$, что соответствует расположению полюсов), минимальные значения расположены около углов $\vartheta = 25^\circ, 115^\circ, 205^\circ, 295^\circ$ (т.е. между полюсами электродвигателя).

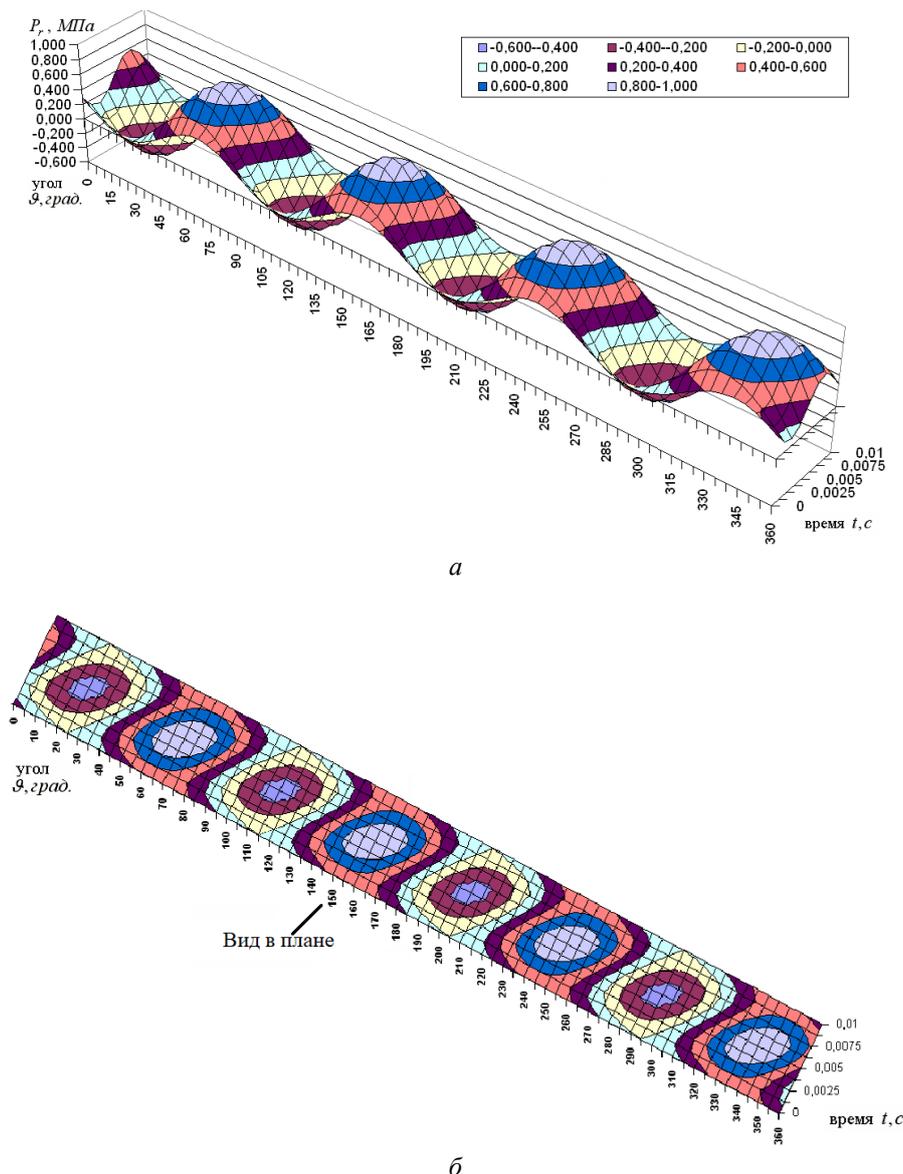


Рис. 3. Зависимость амплитуды P_r от угла ϑ и времени при отсутствии несимметрии (0%):
 а – трехмерный график; б – вид сверху (0%)

Fig. 3. Amplitude from angle and time in the absence of asymmetry (0%):
 а – three-dimensional graphic; б – top view

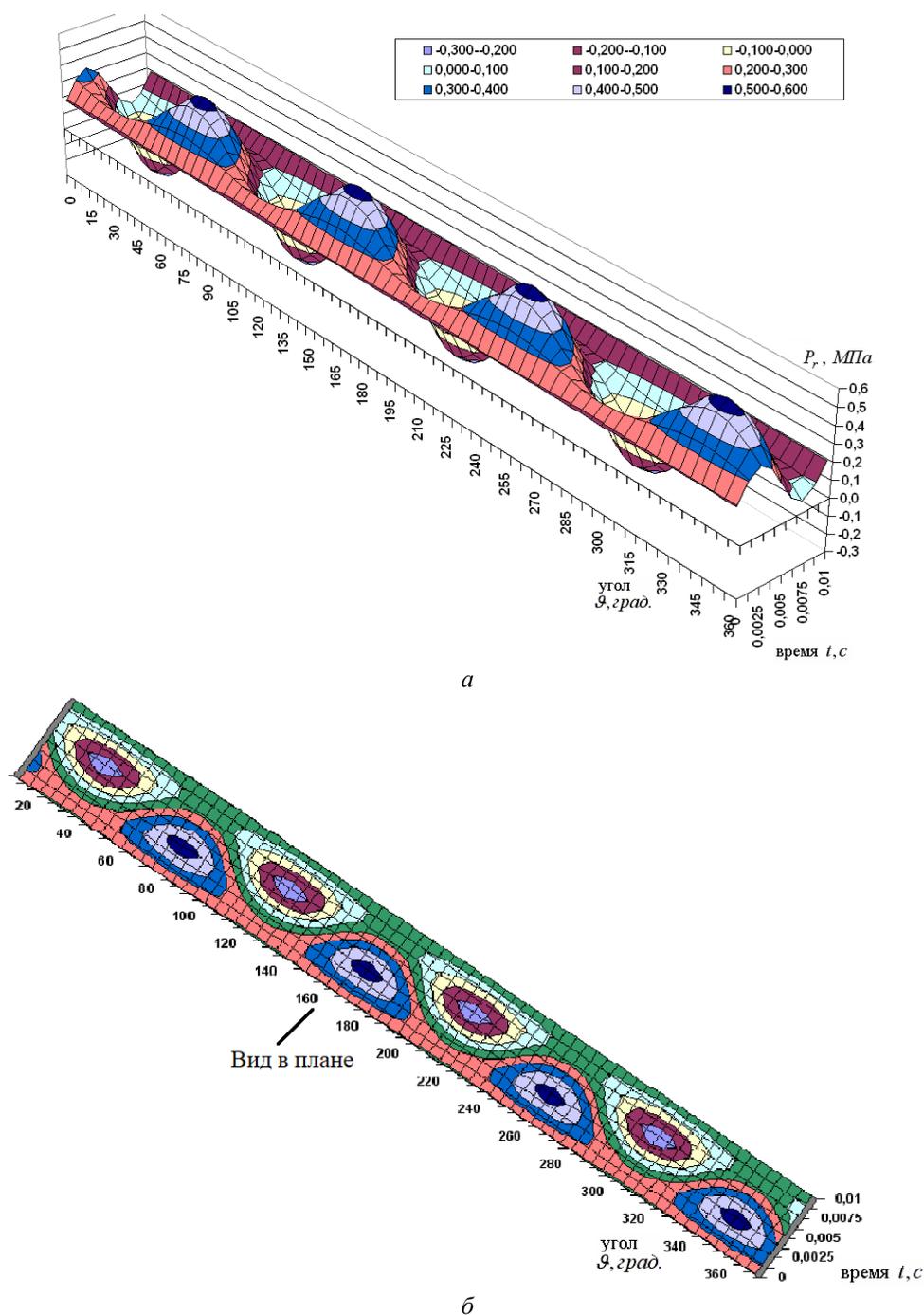


Рис. 4. Изменение амплитуды P_r от угла ϑ и времени при несимметрии 100 %:

a – трехмерный график; b – вид в плане

Fig. 4. Amplitude of the angle and time with a degree of asymmetry of 100 %:

a – three-dimensional graphic; b – top view

Также на рис. 3 можно наблюдать противофазные флуктуации, которые проявляются за период T и принимают максимальные и минимальные значения с амплитудами равными $\Delta p_{\max} = \Delta p_{\min} \approx 0,5$ МПа. Зоны, в которых наблюдаются практически постоянные значения

радиальных сил, расположенные между максимумами и минимумами.

Наибольшая разница в значениях радиальной силы p_r за рассматриваемый период T можно наблюдать в начале и конце периода (при $t = 0$ и $0,01$ с) $\Delta p_r \approx 0,5$ МПа по отношению к середине

периода ($t = T/2 = 0,005$ с) – $\Delta p_r \approx 1,5$ МПа.

Относительно угловой координаты ϑ флуктуация максимумов и минимумов ϑ за рассматриваемый период T составляет $\pm 7^\circ$.

Статическая деформация статора электродвигателя по направлению ротора (т.е. притяжение) за период T происходит на постоянную величину, относительно которой за период $T = 1/\omega_1$ происходят колебания деформации максимальных и минимальных значений радиальных сил.

При наличии несимметрии тока (рис. 4) происходят амплитудные и фазовые изменения в распределении радиальных сил. Изменения амплитуды модуляции радиальных сил за период колебаний при увеличении уровня несимметрии до 100 % (обрыв фазы) составляет $\Delta p_r \approx 0,7$ МПа, уменьшаясь от середины к началу или концу периода, что меньше чем при симметричном режиме (см. рис. 3), более чем в 2 раза. Значения максимумов и минимумов при этом не равны и составляют примерно 0,4 МПа для $\Delta p_{r\max}$ и примерно 0,5 МПа для $\Delta p_{r\min}$. Угловые координаты ϑ , максимумов $\Delta p_{r\max}$ и минимумов $\Delta p_{r\min}$ за период T не изменяются и равны значениям углов ϑ , приведенных ранее.

С увеличением уровня несимметрии чередование максимумов и минимумов радиальных сил p_r смещается от середины периода T ($t = 0,005$ с) на величину $T/4$ (см. рис. 4), (рис. 5).

На рис. 6 и 7 представлены распределения радиальных сил в разные моменты периода колебаний: при несимметрии фаз 0 % и 100 % соответственно. Из круговых диаграмм видно уменьшение колебаний радиальной силы в зонах полюсов машины при обрыве фазы. На ротор действует только постоянная составляющая p_r , что может при наличии нагрузки или при старте привести к «опрокидыванию» (остановке, невозможности запуска) двигателя.

Спектральный анализ колебаний радиальных сил

Анализ неравномерно распределенных в воздушном зазоре машины периодических силовых возмущений в границах одного межполюсного деления допустимо проводить рассматривая их мгновенные значения (со смещением на угол, равный половине межполюсного расстояния – $\pi/4$) или их интегральные значения на тех же интервалах (см. рис. 5).

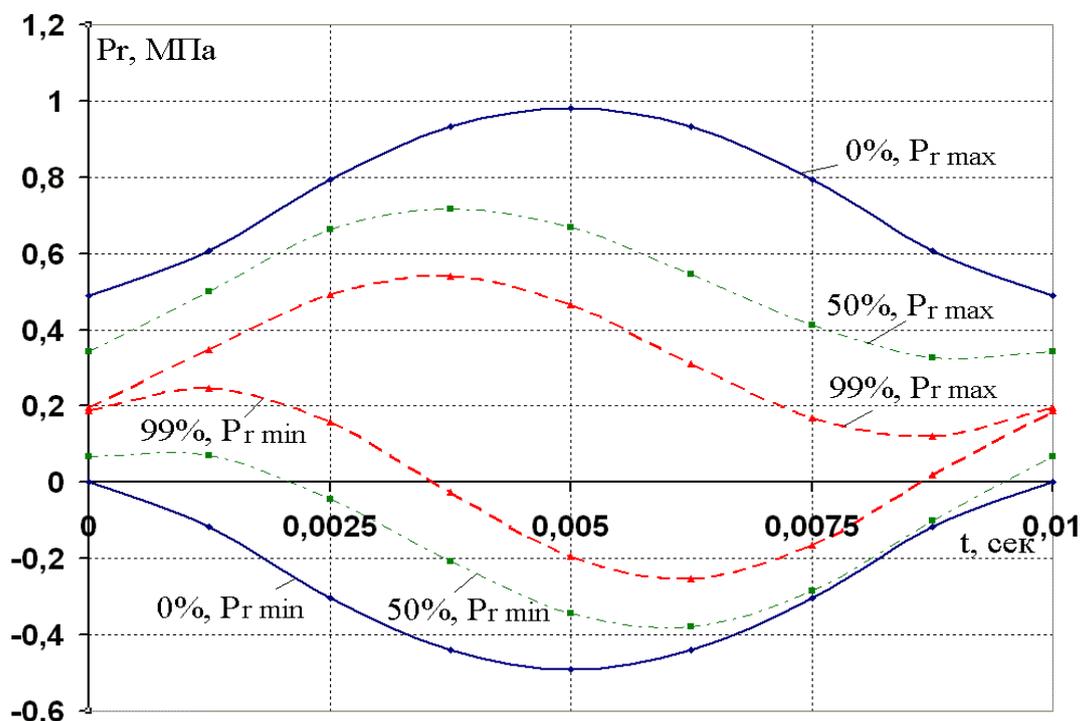


Рис. 5. Амплитудная характеристика радиальных сил за период T при уровне несимметрии тока в фазах 0, 50, 100 %

Fig. 5. Amplitude characteristic of radial forces for the period T at the level of current asymmetry in phases 0, 50 and 100 %

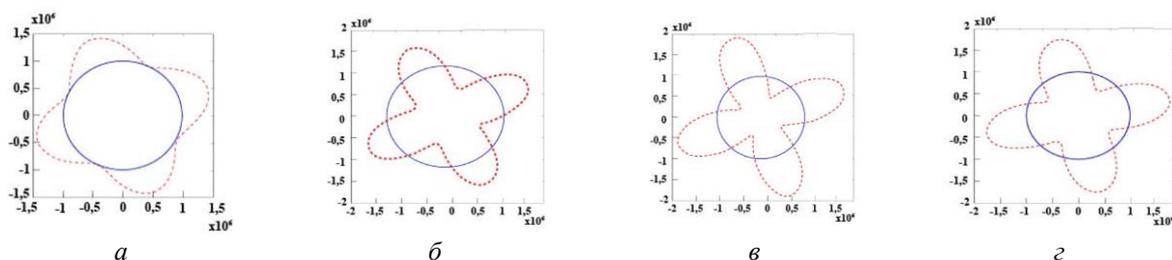


Рис. 6. Круговые диаграммы распределения радиальных сил p_r в воздушном зазоре при отсутствии несимметрии тока в фазах:

a – соответственно в начале и в конце периода – $t = T = 0$ с, $t = T = 0,01$ с;

$б$ – $t = T/4 = 0,0025$ с; $в$ – $t = T/2 = 0,005$ с; $г$ – $t = 3T/4 = 0,0075$ с

Fig. 6. Circular diagrams of the distribution of radial forces p_r in the air gap in the absence of current asymmetry in the phases:

a – respectively at the beginning and at the end of the period – $t = T = 0$, $t = T = 0,01$ s;

b – $t = T/4 = 0,0025$ s; c – $t = T/2 = 0,005$ s; d – $t = 3T/4 = 0,0075$ s

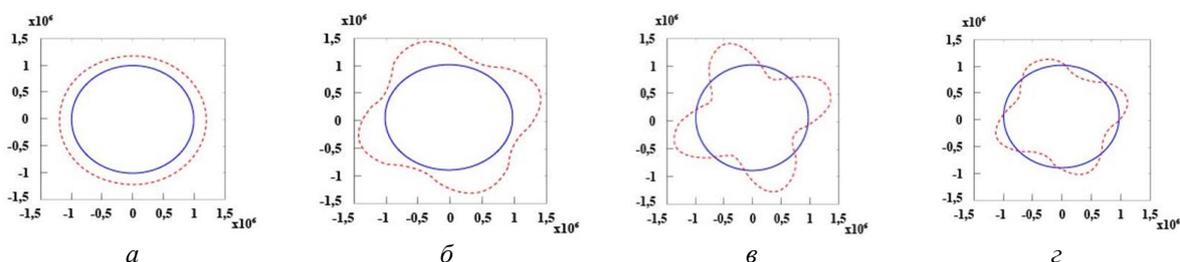


Рис. 7. Круговые диаграммы распределения радиальных сил p_r в воздушном зазоре при несимметрии тока в фазах 100 %:

a – соответственно в начале и в конце периода – $t = T = 0$ с, $t = T = 0,01$ с;

$б$ – $t = T/4 = 0,0025$ с; $в$ – $t = T/2 = 0,005$ с; $г$ – $t = 3T/4 = 0,0075$ с

Fig. 7. Circular diagrams of the distribution of radial forces p_r in the air gap with a current asymmetry in the phases of 100 %:

a – respectively at the beginning and at the end of the period – $t = T = 0$, $t = T = 0,01$ s;

b – $t = T/4 = 0,0025$ s; c – $t = T/2 = 0,005$ s; d – $t = 3T/4 = 0,0075$ s

Для определения с большей точностью (достоверностью) степени влияния колебаний радиальных сил P_r на возникновение силовых волн необходимо произвести анализ их интегрального усредненного значения за период T [1, 4, 6] и действующих на угле, соответствующем межполюсному делению ($\vartheta = 90^\circ$).

Для этого выражение (1) необходимо проинтегрировать по углу ϑ [8]:

$$\int_{\vartheta_0}^{\vartheta_1} P_r(\vartheta) d\vartheta = \frac{a_0}{2} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0) \cdot (B_1^2 + B_2^2) +$$

$$+ \frac{a_0 B_1 B_2}{p} \sin p(\vartheta_1 - \vartheta_0) \cdot \cos[\varphi_{b_1} + \varphi_{b_2} - p(\vartheta_1 + \vartheta_0)] +$$

$$+ \frac{a_0 B_1^2}{2p} \sin p(\vartheta_1 - \vartheta_0) \cdot \cos[2\omega_1 t + 2\varphi_{b_1} - p(\vartheta_1 + \vartheta_0)] +$$

$$+ \frac{a_0 B_2^2}{2p} \sin p(\vartheta_1 - \vartheta_0) \cdot \cos[2\omega_1 t - 2\varphi_{b_2} + p(\vartheta_1 + \vartheta_0)] +$$

$$+ a_0 B_1 B_2 \cdot \cos(2\omega_1 t + \varphi_{b_1} - \varphi_{b_2}) \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0).$$

Проинтегрированная в интервале $\vartheta = 0 - \pi/2$ радиальная сила P_r позволяет перейти от системы распределенных сил, действующих по всей окружности воздушного зазора, к вращающимся эквивалентным сосредоточенным силам $P_{r\Sigma\min}$ и $P_{r\Sigma\max}$ с шагом $T/2$ относительно магнитного поля статора (рис. 8) [1, 4, 5, 9, 10].

На рис. 8 кроме интегральных сил $P_{r\Sigma\max}$ и $P_{r\Sigma\min}$ представлена их результирующая $P_{r\Sigma}$ при дефекте «обрыв фазы» (несимметрия 100 %). Эта результирующая $P_{r\Sigma}$ создает колебания радиальных сил P_r по всей длине окружности воздушного зазора, деформирующих ярмо статора. Определить ее значения можно по выражению:

$$P_{r\Sigma} = \int_0^{\pi/4} p_r(\vartheta) d\vartheta + \int_0^{\pi/2} p_r(\vartheta) d\vartheta = P_{r\Sigma\max} + P_{r\Sigma\min} \cdot$$

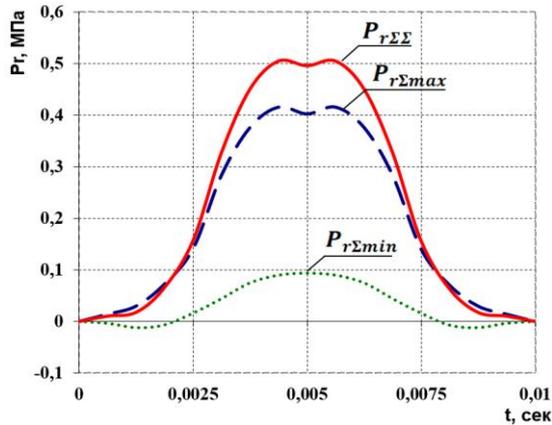


Рис. 8. График изменения интегральных сил $P_{r\Sigma\min}$, $P_{r\Sigma\max}$ и результирующей $P_{r\Sigma\Sigma}$ при обрыве фазы
Fig. 8. Graph of changes in the integral forces $P_{r\Sigma\min}$, $P_{r\Sigma\max}$ and the resulting $P_{r\Sigma\Sigma}$ under phase breakage

Рассмотрим спектральный состав периодической функции $P_{r\Sigma\Sigma}$ (рис. 9). Вокруг частоты электромагнитного поля 100 Гц и ее гармоник 200 и 300 Гц наблюдаются модуляционные (боковые) гармоники с частотным интервалом $\pm n \cdot f_s$, $n = 1, 2$, где f_s – частота вращения магнитного поля статора (25 Гц), которая при отсутствии нагрузки совпадает с оборотной частотой вращения ротора $f_1 = f_s (1 - s)$ [1, 2, 11, 12].

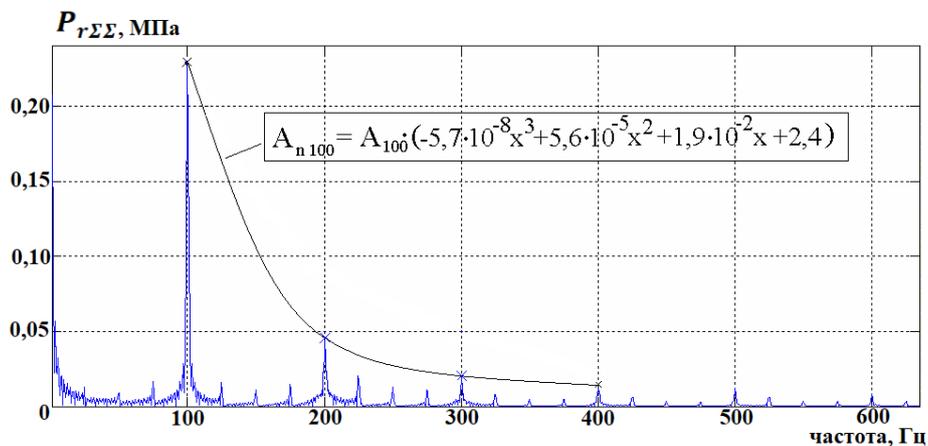


Рис.9. Спектр аналитической модели $P_{r\Sigma\Sigma}$ периодических радиальных сил
Fig.9. Spectrum of the analytical model of radial forces

Численные значения радиальных сил электродвигателя АИР90Л4УЗ при обрыве фазы
 Numerical values of radial forces of the AIR90L4UZ electric motor at phase break

| Форма колебаний r Form of oscillations r | Диапазон угла ϑ_0 , град в соответствии с формой r Angle range ϑ_0 , degrees, according to the shape r | $P_{r\Sigma\max}$, [кН/м ²] | $P_{r\Sigma\min}$, [кН/м ²] | $P_{r\Sigma\text{ср}}$, [кН/м ²] |
|---|---|---|---|--|
| 0 | 0 – 360 | 2,07 | 0,002 | 1,04 |
| 4 | 0 – 45 | 0,40 | 0,092 | 0,25 |
| 8 | 0 – 22,5 | 0,1 | 0,031 | 0,06 |
| 12 | 0 – 15 | 0,06 | 0,011 | 0,04 |

На спектре присутствуют характерные для данного дефекта пики на гармонических частотах 100, 200, 300 и 400 Гц с амплитудами $P_r = 0,23$ (100 %); 0,043 (18,7 %); 0,017 (7,4 %); 0,008(3,2 %) МПа соответственно. Соотношение гармоник n -ых гармонических пиков относительно пика на 100 Гц можно представить уравнением:

$$A_{n100} = A_{100} \cdot \left(\begin{array}{l} -5,7 \cdot 10^{-8} \cdot x^3 + 5,6 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 + \\ + 1,9 \cdot 10^{-2} \cdot x + 2,4 \end{array} \right),$$

где A_{n100} – амплитуда n -ой гармоники колебаний радиальной силы ($n = 2, 3, 4$); A_{100} – амплитуда 1-ой гармоники на частоте 100 Гц; x – частота, Гц.

Для электродвигателя АИР90Л4УЗ с числом пар полюсов $p = 2$ формами радиальных колебаний $r = 2pi$ при $i = 0, 1, 2, 3$ [1, 2, 5, 13] будут 0, 4, 8, 12.

Форме $r = 0$ соответствуют колебания радиальных сил одновременно по всему кольцевому зазору между ротором и статором. В табл. приведены максимальные $P_{r\Sigma\max}$, минимальные $P_{r\Sigma\min}$ и средние $P_{r\Sigma\text{ср}}$ значения интегральных радиальных сил для четырех низших форм колебаний в случае максимальной несимметрии тока (100 %).

Экспериментальное исследование вибрации электродвигателя

Проведены экспериментальные исследования пространственной вибрации АЭД АИР90L4УЗ с использованием шестиканальной виброаппаратуры СТД-2160, работающей в режиме записи вибросигналов датчиков вибрации (рис. 10) [2, 14].

Периодические электромагнитные радиальные силы, действующие в зазоре между статором и ротором [5, 10], регистрировались пьезоакселерометрами, установленными на подшипниковых щитах электродвигателя в вертикальном и горизонтальном направлениях [1, 3,

15]. Дополнительно регистрировались также осевые и окружные колебания. Максимальные вибрации при 100 % несимметрии (обрыв фазы) зарегистрированы в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Радиальные силы превышают тангенциальные силы и вызывают деформации статора по нескольким низшим формам. Ввиду того, что радиальные деформации стабильны по углу ϑ , статор будет максимально деформироваться и совершать преимущественно колебания низкой формы $r = 4$.

На рис. 11 приведен спектр вибрации электродвигателя в вертикальном направлении.

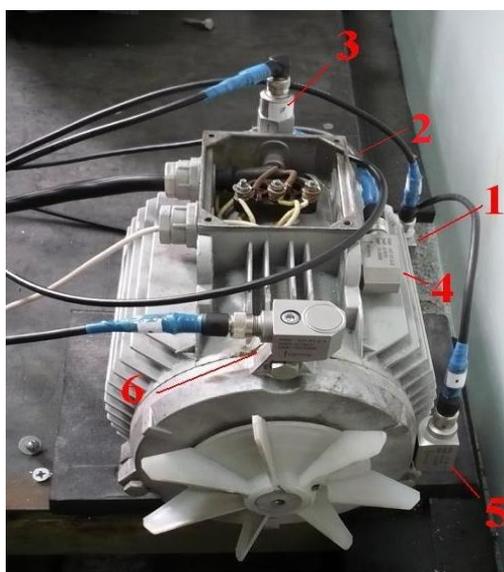


Рис. 10. Экспериментальные исследования пространственной вибрации асинхронного электродвигателя АИР90L4УЗ:

1, 5 – датчики горизонтальной вибрации; 2 – осевой датчик (не виден);

3, 6 – датчики вертикальной вибрации; 4 – датчик тангенциальной вибрации

Fig. 10. Experimental studies of spatial vibration of asynchronous electric motor AIR90L4UZ:

1, 5 – horizontal vibration sensors; 2 – axial vibration sensor (not visible);

3, 6 – vertical vibration sensors; 4 – tangential vibration sensor

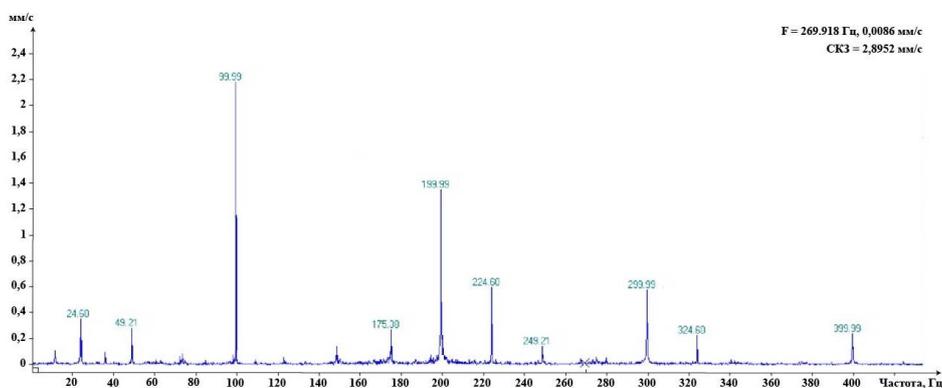


Рис. 11. Спектр колебаний электродвигателя в вертикальном направлении под действием радиальных сил

Fig. 11. The spectrum of oscillations of the electric motor in the vertical direction under the influence of radial

На спектре видны спектральные составляющие механических колебаний на оборотной частоте f_1 (24,6 Гц) и его второй гармоники: $2f_1$ (49,2 Гц), а также на электрических частотах $2kf_c \pm nf_1$, $k = 1, 2, 3, 4$, $n = 1, 2$, модулированных оборотной частотой и ее 2-ой гармоникой, где f_c – частота сети (100; 175,4; 200; 224,6; 249,2; 300; 324; 400 Гц).

Численное моделирование деформации статора при несимметрии тока в фазах

Численное моделирование максимальных радиальных деформаций корпуса статора в незакрепленном состоянии с использованием метода конечных элементов [16–18] при полученных ранее значениях радиальных сил (несимметрия 100 %) $P_{r\Sigma\max}$ и $P_{r\Sigma\min}$ (см. табл.) проведено при приложении сил по схеме (рис. 12). Результаты моделирования деформации статора приведены для форм радиальных колебаний: $r = 4, 8, 12$, что соответствует частотам $f = 100$ Гц (рис. 13); $f = 200$ Гц (рис. 14); $f = 300$ Гц (рис. 15) [1, 2, 4].

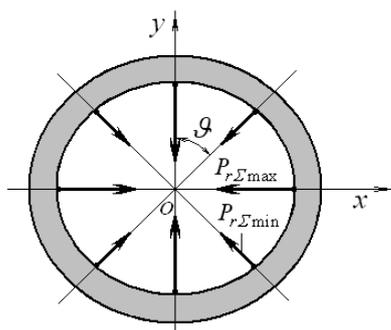


Рис. 12. Схема действия радиальных сил $P_{r\Sigma\max}$ и $P_{r\Sigma\min}$, приложенных к внутренней поверхности статора ($r = 4$)

Fig. 12. Scheme of action of radial forces $P_{r\Sigma\max}$ and $P_{r\Sigma\min}$ applied to the inner surface of the stator ($r = 4$)

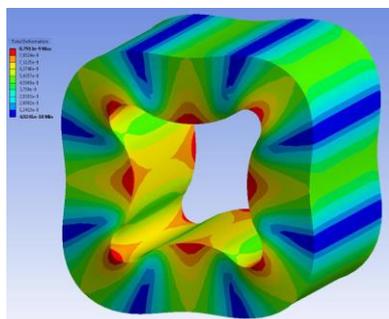


Рис. 13. Деформация статора радиальными силами ($r = 4$)

Fig. 13. Deformation of the stator by radial forces ($r = 4$)

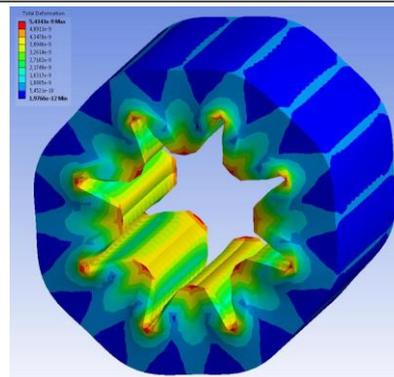


Рис. 14. Деформация статора радиальными силами ($r = 8$)

Fig. 14. Deformation of the stator by radial forces ($r = 8$)

Деформация статора при действии радиальных сил будет суммой статической деформации сжатия от постоянной составляющей радиальных сил и периодической деформации от действия переменной составляющей радиальных сил каждой формы [2]. Максимальная деформация статора (рис. 13) будет при радиальных колебаниях по форме $r = 4$ (частота 100 Гц).

Деформация статора при действии радиальных сил по форме $r = 8$ (200 Гц) будет незначительной по амплитуде (рис. 14), но более высокочастотной, при этом виброускорение (а значит и динамическая составляющая колебаний) увеличится в 4 раза.

При радиальных колебаниях по форме $r = 12$ (300 Гц) периодические радиальные деформации статора почти не будут передаваться на внешнюю поверхность (рис. 15), но вызовут внутренние межвитковые радиальные колебания обмотки статора, что увеличит вероятность короткого замыкания обмоток.

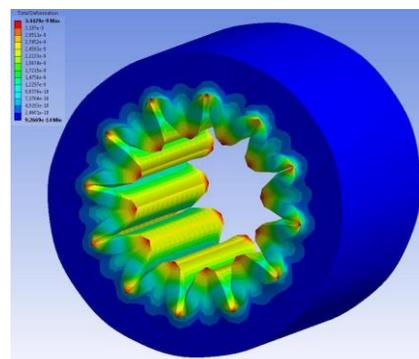


Рис. 15. Результирующая деформация статора от действия радиальных сил ($r = 12$)

Fig. 15. The resulting deformation of the stator from the action of radial forces ($r = 12$)

Суммируя выводы по численному моделированию радиальных колебаний, можно заключить, что колебания более высоких форм $r = 8, 12, \dots$ являются проявлениями нелинейных силовых взаимодействий в ярме статора с убывающими амплитудами.

Тепловизионные исследования асинхронного электродвигателя при несимметрии тока

Температура статорной обмотки по внешнему корпусу АЭД хотя и распределена равномерно (рис. 16), но за три минуты работы (обмотка видна в отверстиях в корпусе в контактной коробке) увеличилась с 41° до 86° и приближается к критической (рис. 17).

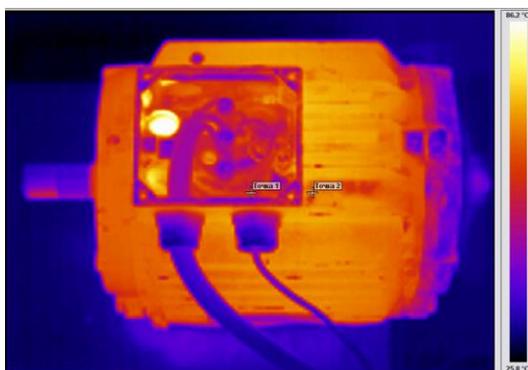


Рис. 16. Температура корпуса и статора (видна в отверстии корпуса) электродвигателя при несимметрии 100 %

Fig. 16. The temperature of the housing and stator (visible in the housing opening) of the electric motor with an asymmetry of 100 %

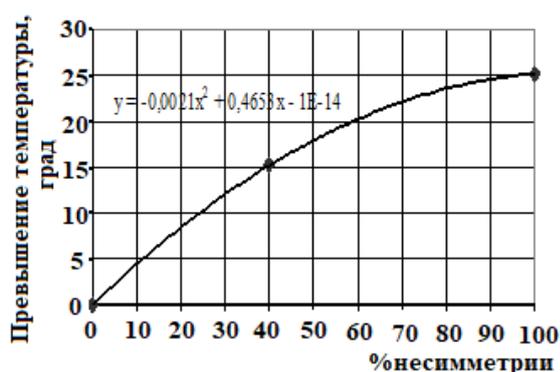


Рис. 17. График превышения температуры статорной обмотки при несимметрии 100 % по сравнению с работой в симметричном режиме (по данным эксперимента)

Fig. 17. Graph of exceeding the temperature of the stator winding with an asymmetry of 100% compared to operation in symmetrical mode (according to experimental data)

Таким образом, несимметрия тока приводит к потерям в АЭД не только путем увеличения вибрации, но и за счет избыточного увеличения температуры обмотки и рассеяния тепла при конвекционном теплообмене с окружающей средой [19, 20]. При этом возрастает вероятность короткого межвиткового замыкания обмотки при нарушении изоляции.

Заключение

Результаты исследований, представленные в настоящей работе, позволяют сделать следующие выводы. Получены более точные уравнения постоянных и переменных компонентов радиальных сил электромагнитной природы, которые дают более высокие значения радиальных сил в АЭД при несимметрии тока в фазах. При воздействии радиальных сил на статор и вращающийся ротор возникает вибрация в широком диапазоне частот с модуляцией гармоник электромагнитных колебаний 100, 200, 300, 400 Гц боковыми гармониками оборотной частоты. Последние вибропризнаки особенно характерны при значительной несимметрии фазного тока, близкой к 100 %, что создает дополнительные динамические нагрузки, отрицательно влияющие на ресурс подшипников.

Получены трехмерные графики радиальных сил, иллюстрирующие их амплитудно-фазовое распределение при возрастающей несимметрии тока в фазах. Теоретические и экспериментальные исследования вибрации при увеличении несимметрии тока в фазах показали весь спектральный состав возникающих радиальных колебаний, являющийся достаточным диагностическим признаком степени развития данного дефекта.

Проведено численное конечно-элементное моделирование колебаний ярма статора при различных формах радиальных колебаний. Выявлено, что колебания низшей формы (100 Гц) характеризуются высокими амплитудами, а колебания по более высоким формам (200, 300, 400 Гц) хотя и незначительны по амплитуде, но создают более высокие виброускорения, генерирующие более высокие динамические нагрузки при межвитковых колебаниях обмоток статора. Тепловизионные исследования при обрыве фазы показали быстрое нарастание температуры обмотки статора с возрастающей вероятностью оплавления изоляции обмоток статора и короткого замыкания обмоток.

Список литературы

1. Шубов И.Г. Шум и вибрация электрических машин. Л. : Энергоатомиздат, 1986. 208 с.
2. Бельский И.О., Лукьянов А.В. Математическое, численное и натурное моделирование параметров магнитного поля при несимметрии тока в фазах асинхронных электродвигателей // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 2 (38). С. 44–55.
3. Nandi S., Toliyat A., Li X. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors – A Review // IEEE transactions on energy conversion. 2005. Vol. 20, № 4. Pp. 32–37.
4. 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.
5. Kelvin C. Maliti Modelling and analysis of magnetic noise in squirrel-cage induction motors: Doctoral Dissertation // Royal Institute of Technology. Stockholm, 2000. 209 p.
6. Бельский И.О., Куприянов И.С., Лукьянов А.В. Исследование угловой скорости и магнитного поля при дефектах асинхронных электродвигателей // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 4 (40). С. 62–69.
7. Вольдек А.И. Электрические машины. Л. : Энергия, 1978. 832 с.
8. Асинхронные двигатели серии 4А / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин и др. М. : Энергоатомиздат, 1982. 504 с.
9. Кетков Ю.Л. Кетков А.Ю., Шульц М.М. MATLAB 7 – программирование, численные методы. СПб. : БХВ-Петербург, 2005. 752 с.
10. On the use of slot harmonics as a potential indicator of rotor bar breakage in the induction machine / A. Khezzer, M.Y. Kaikaa, M. Boucherma et al. // IEEE Trans. Ind. Electron. 2009. Vol. 56, № 11. P. 4592–4605.
11. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы электрических системах. М. : Энергия, 1970. 520 с.
12. Петухов В.С., Соколов В.А. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока // Новости электротехники. 2005. № 1 (31). С. 50–52.
13. Benbouzid M. Bibliography on induction motors faults detection and diagnosis // IEEE Trans. EnergyConvers. 1999. Vol. 14, № 4. Pp. 1065–1074.
14. Русов В.А. Спектральная вибродиагностика. Пермь : Вибро-Центр, 1996. 176 с.
15. Сафарбаков А.М., Лукьянов А.В., Пахомов С.В. Основы технической диагностики деталей и оборудования. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2007. 128 с.
16. Simulation and fault detection of three-phase induction motors / B. Liang, B. Payne, A. Ball et al // Mathematics and Computers in Simulation. 2002. № 61. Pp. 1–15.
17. Xin G. Simulation of Vibrations in Electrical Machines for Hybrid-electric Vehicles : master's Thesis. Göteborg : Chalmers University of Technology, 2014. 68 p.
18. Martinez J., Belahcen A., Arkkio A. A 2D FEM model for transient and fault analysis of Induction machines. Przegląd Elektrotechniczny. 2012. Vol. 88 (7B). Pp. 157–160.
19. Неразрушающий контроль и диагностика / под ред. В.В.Клюева. М. : Машиностроение, 2005. 656 с.
20. Гирник А.С., Рапопорт О.Л. Математическое моделирование работы трёхфазных вспомогательных электрических машин на электровозе 2ЭС5К в условиях асимметричного питания // Изв. Томск. политехн. ун-та. 2009. Т. 314. № 4. С. 69–73.

References

1. Shubov I.G. Shum i vibratsiya elektricheskikh mashin [Noise and vibration of electrical machines]. Leningrad: Energoatomizdat Publ., 1986. 208 p.
2. Bel'skii I.O., Luk'yanov A.V. Matematicheskoe, chislennoe i naturnoe modelirovanie parametrov magnitnogo polya pri nesimmetrii toka v fazakh asinkhronnykh elektrodvigatelei [Mathematical, numerical and full-scale modeling of magnetic field parameters in the asynchronous electric motors with nonsymmetrical current phases]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2018, no. 2 (38), pp. 44–55.
3. Nandi S., Toliyat A., Li X. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors – A Review. *IEEE transactions on energy conversion*. 2005, vol. 20, no. 4, pp. 32–37.
4. Luk'yanov A.V., Muhachev Yu.S., Bel'skii I.O. Issledovanie kompleksa parametrov vibratsii i vneshnego magnitnogo polya v zadachakh diagnostiki asinkhronnykh elektrodvigatelei [Researching the complex of vibration parameters and external magnetic field in the problems of diagnostics of asynchronous electric motors]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2014, no 2 (22), pp. 61–69.
5. Kelvin C. Maliti Modelling and analysis of magnetic noise in squirrel-cage induction motors: Doctoral Dissertation. Royal Institute of Technology. Stockholm, 2000. 209 p.
6. Bel'skii I.O., Kupriyanov I.S., Luk'yanov A.V. Issledovanie uglovoi skorosti i magnitnogo polya pri defektakh asinkhronnykh elektrodvigatelei [Researching the complex of vibration parameters and external magnetic field in the problems of diagnostics of asynchronous electric motors]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2018, no. 4 (40), pp. 62–69.
7. Vol'dek A.I. Elektricheskie mashiny [Electric machines]. Leningrad: Energiya Publ., 1978. 832p.
8. Kravchik A.E., Shlaf M.M., Afoin V.I., Sobolevskaya Ye.A. Asinkhronnye dvigateli serii 4A [Asynchronous motors of the 4A series]. Moscow: Energoizdat Publ., 1982. 504 p.
9. Ketkov Yu.L., Ketkov A.Yu., Shul'ts M.M. MATLAB 7 – programmirovaniye, chislennyye metody [MATLAB 7 – programming, numerical methods]. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg Publ., 2005. 752 p.
10. Khezzer 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, no. 11, pp. 4592–4605.

11. Ul'yanov S.A. Elektromagnitnye perekhodnye protsessy elektricheskikh sistemakh [Electromagnetic transient processes in electrical systems]. Moscow: Energiya Publ., 1970. 520 p.
12. Petuhov V.S., Sokolov V.A. Diagnostika sostoyaniya elektrodvigatelei. Metod spektral'nogo analiza potrebyaemogo toka [Diagnosis of the condition of electric motors. Method of spectral analysis of consumed current]. *Novosti elektrotehniki* [The News of Electrical Engineering], 2005, no. 1 (31), pp. 50–52.
13. Benbouzid M. Bibliography on induction motors faults detection and diagnosis. *IEEE Trans. EnergyConvers.* 1999, vol. 14, no. 4, pp. 1065–1074.
14. Rusov V.A. Spektral'naya vibrodiagnostika [Spectral vibrodiagnostics]. Perm': Vibro-Tsentr Publ., 1996. 176 p.
15. Safarbakov A.M., Luk'yanov A.V., Pakhomov S.V. Osnovy tekhnicheskoi diagnostiki detalei i oborudovaniya [Fundamentals of technical diagnostics of parts and equipment]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2007. 128 p.
16. Liang B., Payne B., Ball A. et al. Simulation and fault detection of three-phase induction motors. *Mathematics and Computers in Simulation.* 2002, no. 61, pp. 1–15.
17. Xin G. Simulation of Vibrations in Electrical Machines for Hybrid-electric Vehicles : master's Thesis. Göteborg : Chalmers University of Technology, 2014. 68 p.
18. Martinez J., Belahcen A., Arkkio A. A 2D FEM model for transient and fault analysis of Induction machines. *Przegląd Elektrotechniczny.* 2012, vol. 88 (7B), pp. 157–160.
19. Nerazrushayushchii kontrol' i diagnostika [Non-destructive testing and diagnostics]. Edited by V.V. Klyuev. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 2005. 656 p.
20. Girmik A.S., Rapoport O.L. Matematicheskoe modelirovanie raboty trekhfaznykh vspomogatel'nykh elektricheskikh mashin na elektrovoze 2ES5K v usloviyakh asimmetrichnogo pitaniya [Mathematical modeling of the operation of three-phase auxiliary electrical machines on an electric locomotive 2ES5K under conditions of asymmetric power]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletins of the Tomsk Polytechnic University], 2009, vol. 314, no. 4, pp. 69–73.

Информация об авторах

Лукьянов Анатолий Валерианович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: loukian@inbox.ru.

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

Лукьянов Дмитрий Анатольевич, кандидат технических наук, ведущий технолог Технологической службы Управления Восточно-Сибирской железной дороги, Иркутск; e-mail: loukian@live.ru.

Information about the authors

Anatolii V. Luk'yanov, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Physics, Mechanics and Instrumentation, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: loukian@inbox.ru.

Ivan S. Kupriyanov, Assistant Professor of the Department of Physics, Mechanics and Instrumentation, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: xpress14@mail.ru.

Dmitrii A. Luk'yanov, Ph.D. in Engineering Science, Leading Technologist of the Technological Service of the Management of the East Siberian Railway, Irkutsk; e-mail: loukian@live.ru.