

Научная статья

УДК 621.313.333.2, 621.396:519.853

EDN ISFBBZ

DOI 10.17150/2713-1734.2024.6(3).339-356

**И.С. Куприянов***Иркутский государственный университет путей сообщения,
г. Иркутск, Российская Федерация***А.В. Лукьянов***Иркутский государственный университет путей сообщения,
г. Иркутск, Российская Федерация*

Математическое моделирование механических колебаний асинхронного двигателя при межвитковом замыкании обмотки статора

Аннотация. В статье рассматривается задача повышения качества диагностики асинхронных электродвигателей (АЭД) при наличии межвиткового замыкания в обмотке статора. В процессе эксплуатации асинхронных электродвигателей обмотки фаз статора нагреваются: кратковременно — во время его пуска, постоянно — в процессе работы двигателя под нагрузкой. Такие перегревы обмоток статора с течением времени и при ухудшении свойств изолирующих покрытий приводят к их частичному разрушению и, в конечном итоге, к межвитковому замыканию проводников. Для улучшения качества эксплуатации АЭД, необходимо иметь достоверную диагностическую информацию о его текущем техническом состоянии, в частности об изменении параметров вибрации и достижении их критических значений. Для этого необходимо проведение исследований влияния электрических и силовых процессов в АЭД на параметры вибрации при межвитковых замыканиях.

Проведены теоретические и экспериментальные исследования, построена математическая модель радиальных сил в воздушном зазоре электродвигателя, при возникновении и развитии межвиткового замыкания в обмотке фазы ротора. С использованием данной математической модели формирования радиальных сил произведены расчеты для электродвигателя модели АИР63В4. Дана оценка изменения амплитуды и гармонического состава радиальных сил при различной степени развития межвиткового замыкания обмотки статора. Выявлены достаточные вибрационные диагностические признаки, в частности, спектральные составляющие радиальной вибрации, характерные для данного дефекта, позволяющие определять наличие данного дефекта и степень его опасности.

Хорошая сходимость теоретических и экспериментальных результатов исследований позволяет определить изменение диагностических признаков во всем возможном диапазоне развития дефекта. Произведено уточнение вибрационных признаков данного типа дефекта, описанных в различных литературных источниках.

Ключевые слова. Асинхронный электродвигатель, механические колебания, вибрация, радиальные силы, межвитковое замыкание, моделирование, дефект.

Информация о статье. Дата поступления: 5 августа 2024 г.; дата принятия к публикации: 1 октября 2024 г.; дата онлайн-размещения: 17 октября 2024 г.

I.S. Kupriyanov*Irkutsk State Transport University,
Irkutsk, Russian Federation***A.V. Lukyanov***Irkutsk State Transport University,
Irkutsk, Russian Federation*

Mathematical Mechanical Vibration Modeling Stator Winding Inter-Turn Short-Circuit of Mechanical Oscillations of Induction Motor

Abstract. The article considers the problem of improving the quality of diagnostics of induction motor (IM) in the presence of a stator winding inter-turn short-circuit. During operation of IM, the stator phase windings heat up: briefly — during its start-up, constantly — during engine operation under load. Such overheating of the stator windings over time and with deterioration of the properties of the insulating coatings lead to their partial destruction and, ultimately, to the inter-turn closure of the conductors. To improve the quality of operation of the IM, it is necessary to have reliable diagnostic information about its current technical condition, in particular about changes in vibration parameters and the achievement of their critical values. To do this, it is necessary to conduct research on the influence of electrical and power processes in the IM on vibration parameters during inter-turn circuits.

Theoretical and experimental studies have been carried out, a mathematical model of radial forces in the rotor phase winding air gap of an electric motor has been constructed, when stator winding inter-turn short-circuit occurs and develops. Using this mathematical model for the formation of radial forces, calculations were performed for the AIR63V4 electric motor. The estimation of changes in the amplitude and harmonic composition of radial forces at different degrees of development of the inter-turn closure of the stator winding is given. Sufficient vibration diagnostic signs have been identified, in particular, the spectral components of radial vibration characteristic of this defect, which make it possible to determine the presence of this defect and the degree of its danger.

The good convergence of theoretical and experimental research results makes it possible to determine the change in diagnostic signs in the entire possible range of defect development. The vibrational signs of this type of defect, described in various literary sources, have been clarified.

Keywords. Induction motor, mechanical oscillations, vibration, radial forces, inter-turn short-circuit, modeling, defect.

Article info. Received 5 August, 2024; Accepted 1 October, 2024; Available online 17 October, 2024.

Введение

Необходимость повышения надежности электромеханических машин, в частности асинхронного электродвигателя (АЭД) имеющего широкое распространение в качестве привода на транспорте и в промышленности может решаться системой предупреждения аварийного выхода из строя и прогнозирования его состояния. Одним из естественных дефектов АЭД является межвитковое замыкание

(МВЗ) обмотки статора. Причинами возникновения данного дефекта служит износ изоляции в следствии ее старения или перегрева изоляции обмоток. В результате образуется короткое замыкание приводящие к изменению сопротивления обмотки статора.

Для решения задачи повышения качества диагностики АЭД при наличии МВЗ в работе рассмотрены: результаты канонично-элементного и математического моделирования процессов, приводящих к изменению частотного состава радиальных сил в воздушном зазоре и экспериментальных исследований механических колебаний при наличии МВЗ.

Порождаемые электромагнитными силами механические колебания есть сумма радиальных p_r и тангенциальных p_t сил, имеющих вращающийся и пульсирующий характер [1]. Поскольку конструктивные особенности конкретной модели АЭД (число пар полюсов, количество пазов статора и ротора, тип укладки обмотки) оказывают влияния на процессы взаимного преобразования электрической и механической энергии, они так же существенно влияют на влияние на характер их механических колебаний(вибрации) [1–3].

Величина основной составляющей магнитной индукции $b_1(\vartheta, t)$, при изменении конструктивных параметров АЭД вычисляется из выражения (1) [1,2]

$$b_1(\vartheta, t) = B_1 \cdot \cos(p\vartheta - \omega_1 t - \varphi_{or}) = 1,35 \frac{w_{Fd} k_{об.см} \mu_0}{p k_{\delta} \delta k_c} k_{ior} I_{дей}, \quad (1)$$

где k_c — коэффициент Картера; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м. — магнитная постоянная; k_{ior} — коэффициент реактивной составляющей; w_{Fd} — число витков дефектной обмотки статора; $\omega_1 = 2\pi f_c$ — круговая частота сети; δ — величина воздушного зазора; p — число пар полюсов АЭД; φ_{or} — угол сдвига фазы; $k_{об.см}$ — обмоточный коэффициент; $I_{дей}$ — амплитуда тока статора АЭД; B_1 — амплитуда постоянной составляющей магнитной индукции; ϑ — угловая координата, отсчитываемая вокруг оси обмотки.

На частотный состав вибрации влияет и равномерность приложения нагрузки на вал, порождая различные гармонические составляющие даже при технически в исправном АЭД. И в свою очередь характер влияния нагрузки на валу на магнитную индукцию, меняется из-за нарушений в конструкционных особенностях машины в результате образования различных дефектов и неисправностей. При этом величина и частотный состав тока в обмотках АЭД вследствие изменений активных и индуктивных, собственных и взаимных сопротивлений обмоток статора и ротора подвергается максимальным искажениям [3; 4]. Это связано с нарушением токовой симметрии из-за снижения сопротивления в дефектной обмотке и возникновения дополнительного контура, рис. 1 [4].

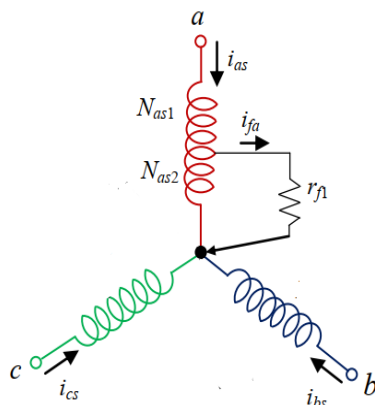


Рис. 1. Схема обмоток АЭД с замыканием витков в одной из обмоток

Оценку степени развития дефекта будем производить, используя безразмерную величину отношения действительного сопротивления к паспортному ζ , вычисляемую из выражения (2)

$$\zeta = \frac{R_{ном} - R_{дейст}}{R_{ном}}, \quad (2)$$

где $R_{ном}$ — паспортное сопротивление обмотки статора; $R_{дейст}$ — действительное сопротивление обмотки статора.

Для оценки изменения тока в фазах и магнитной индукции при возникновении МВЗ было проведен конечно элементный (КЭ) анализ на примере АЭД АИР63В4 [5], характеристики приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики АЭД АИР63В4

Характеристика	Значение
Мощность, кВт	0,37
Номинальная частота вращения, об/мин	1500
Число пар полюсов	2
Номинальный ток, А	1,37
$\cos \varphi$	0,7
Момент инерции, кг·м ²	0,0014
Скольжение, %	8,7
Число стержней ротора	18
Число пазов статора	24
Сопротивление обмотки статора, Ом	21,5

Конечно-элементное моделирование

КЭ анализ выполнен в плоскопараллельной постановке задачи, т.е. не рассматривая распространение магнитного поля вдоль продольной оси ротора [6]. При этом шаг КЭ сетки зада-

вался в радиальном направлении. Временной интервал расчета составлял 0–1,2 с при шаге 0,1 мс. Размер шага и сетки расчета выбирался из компромисса [7] между точностью и быстродействием расчета. Например, для воздушного зазора величиной 0,25 мм шаг сетки составил 0,2 мм. Для статора, за исключением пазовой области (областей расположения фазных обмоток), шаг сетки составил — 10 мм.

Рассмотрим спектральный состав тока дефектной обмотки статора при различной степени развития ζ дефекта и постоянной нагрузке на валу, рис 2, 3.

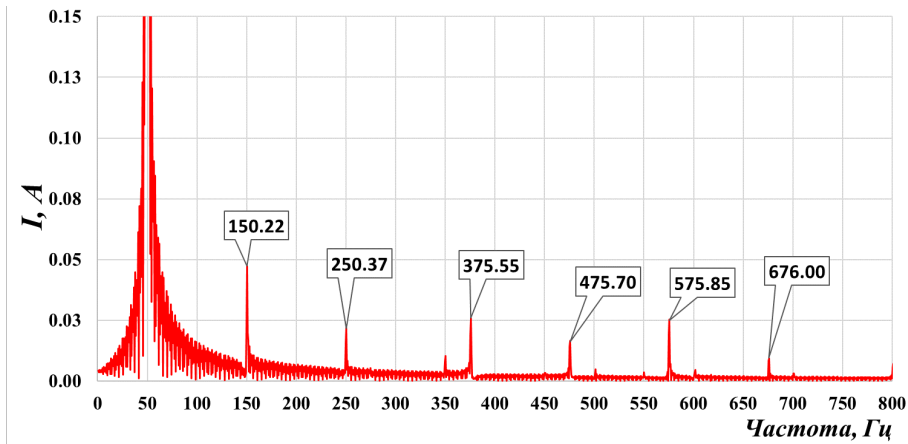


Рис. 2. Спектральный состав тока дефектной обмотки статора при $\zeta = 0,013$ (замкнуто 7 витков) и относительном скольжении 0,0548

На рис.2 можно наблюдать следующие основные спектральные составляющие: f_c (50 Гц), $3f_c$ (150,22 Гц); $5f_c$ (250,37 Гц). Незначительные пики на частотах: $7f_c$ (350 Гц); $9f_c$ (450 Гц); $10f_c$ (500 Гц); $11f_c$ (550 Гц), $12f_c$ (200 Гц); $14f_c$ (700 Гц) не дают существенного вклада в спектральный состав тока.

На рис. 3 можно наблюдать следующие основные спектральные составляющие: f_c (50 Гц), $3f_c$ (150,40 Гц); $5f_c$ (250,64 Гц). Незначительные пики на гармониках 7–14 частот сети : $7f_c$ (350 Гц); $9f_c$ (450 Гц); $10f_c$ (500 Гц); $11f_c$ (550 Гц), $12f_c$ (200 Гц); $14f_c$ (700 Гц) не дают существенного вклада в спектральный состав тока.

Таким образом, при возникновении дефекта МВЗ обмотки статора признаками дефекта являются рост нечетных гармоник 3,5,7,9 частоты сети $f_c = 50$ Гц, причем наибольший рост с увеличением степени развития дефекта наблюдается на частотах $3f_c = 150$ Гц, $5f_c = 250$ Гц. На частотах $7f_c = 350$ Гц, $9f_c = 450$ Гц спектральные составляющие незначительны.

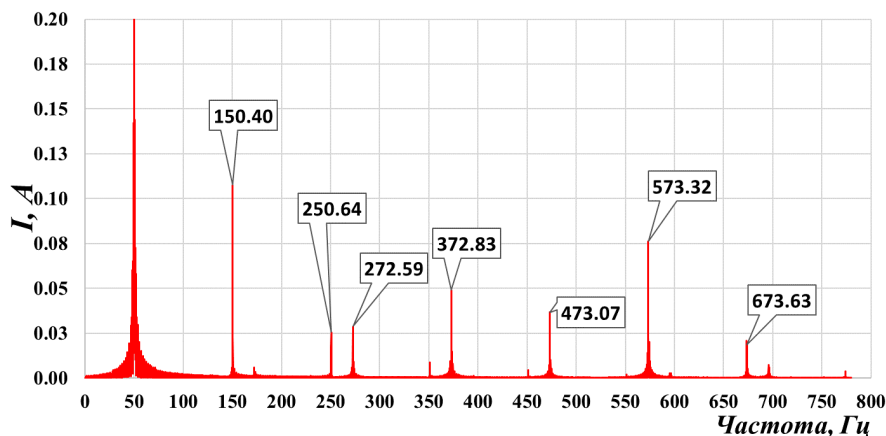


Рис. 3. Спектральный состав тока дефектной обмотки статора при $\varsigma = 0,1$ (замкнуто 57 витков) и относительном скольжении 0,062

На частотах свыше 300 Гц в обмотках фаз и в короткозамкнутом контуре (КЗК) наблюдаются увеличение гармоник тока на частотах:

– при замыкании 7 витков обмотки фазы А: 375,5 Гц; 475,5 Гц; 575,5 Гц; 675,5 Гц;

– при замыкании 57 витков обмотки фазы А: 273,2 Гц; 373,5 Гц; 473,0 Гц; 573,3 Гц; 673,5 Гц, являющихся гармоникой пазовой частоты ротора (3) модулируемых гармониками частоты сети f_c [8]:

$$f_x = f_{\text{паз.рот}} \pm n \cdot f_c; n = 1, 3, 5, 7, 9, 11, \quad (3)$$

где $f_{\text{паз.рот}} = f_1 \cdot Z_2$ — пазовая частота ротора; где Z_2 — количество пазов ротора.

Вследствие возникновения МВЗ, происходит увеличение тока в дефектной обмотке [9; 10]. В дополнении к этому индуцирующий собственное магнитное поле контур, образованный МВЗ, вносит дополнительные искажения [8,10]. Это приводит к изменению частотного состава тока в обмотках статора, ротора и магнитного поля (рис. 4).

Изменение магнитной индукции АЭД в целом при изменении тока в области расположения дефекта [10], приводит к ускорениям и замедлениям ротора при прохождении им дефектной области обмотки. Подобный частотный состав тока при МВЗ наблюдался в [4; 6; 11].

Частотный состав магнитной индукции на поверхности статора (рис. 4) показывает, что даже при небольшом количестве замкнутых витков (1 % витков обмотки) явные признаки дефекта проявляются на частотах $3f_c$, $5f_c$ а также на гармониках пазовой частоты $f_{\text{паз.рот}} + f_c$ и $f_{\text{паз.рот}} + 3f_c$.

$$f_{\text{паз.рот}} + f_c \text{ и } f_{\text{паз.рот}} + 3f_c. \quad (4)$$

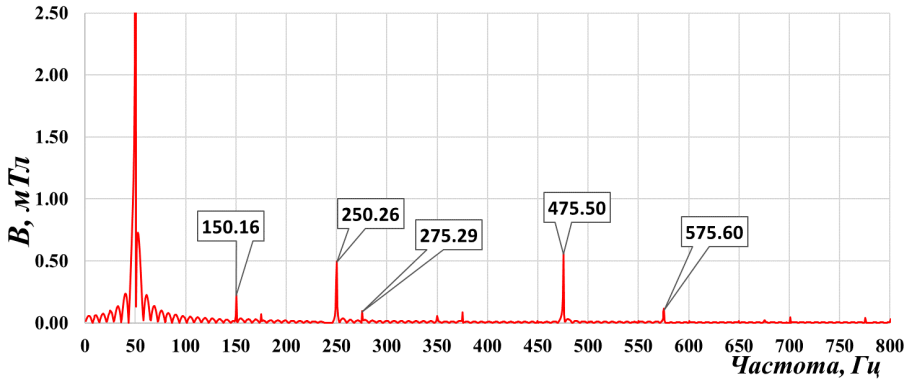


Рис. 4. Спектр сигнала магнитной индукции в произвольной точке на поверхности АЭД полученные по результатам КЭ моделирования при $\zeta = 1.3$ (замкнуто 7 витков) и относительном среднем скольжении 0,0548

Математическое моделирование

Для построения аналитической модели, описывающей изменения в магнитной системе АЭД при возникновении и развитии МВЗ обмотки АЭД, используем систему уравнений (4) [8-10] описывающую как изменения потокоцепления фаз АЭД во времени, для АЭД в установившемся режиме работы

$$\left\{ \begin{array}{l} U_A = R_A i_A + \frac{d\psi_A}{dt} \\ U_B = R_B i_B + \frac{d\psi_B}{dt} \\ U_C = R_C i_C + \frac{d\psi_C}{dt} \\ U_R = R_R i_R + \frac{d\psi_R}{dt} \\ U_{KZ} = R_{KZ} i_{KZ} + \frac{d\psi_{KZ}}{dt} \end{array} \right. , \quad (5)$$

где $R_A, R_B, R_C, R_R, R_{KZ}$ — активные сопротивления фаз А, В, С, ротора и КЗК; $i_A, i_B, i_C, i_R, i_{KZ}$ — токи в фазах А, В, С, ротора и КЗК; $\psi_A, \psi_B, \psi_C, \psi_R, \psi_{KZ}$ — потокоцепления фаз А, В, С, ротора и КЗК.

При МВЗ магнитная индукция в АЭД, помимо основной составляющей амплитуды (1), имеет ряд следующих переменных составляющих [1]: поля бездефектных обмоток статора $b_v(\vartheta, t)$, ротора $b_\lambda(\vartheta, t)$ поля фазы дефектной обмотки $b_{vD}(\vartheta, t)$ и поле КЗК $b_{vKZ}(\vartheta, t)$, которые можно вычислить из выражений (6-9):

$$b_v(\vartheta, t) = 1,35 \frac{w_1 k_{об.см} \mu_0}{v k_H \delta k_c} I_{cm} \cdot \cos(v \cdot \vartheta - \omega_1 t - \varphi_1), \quad (6)$$

$$b_\lambda(\vartheta, t) = 1,35 \frac{w_{rot} k_{об.ром} \mu_0}{v k_H \delta k_c} I'_{cm} \cdot \cos(\lambda \cdot \vartheta - \omega_2 t - \varphi_2), \quad (7)$$

$$b_{vD}(\vartheta, t) = 1,35 \frac{(w_1 - w_{kz}) k_{об.см} \mu_0}{v k_H \delta k_c} I_{cm} \cdot \cos(v \cdot \vartheta - \omega_1 t - \varphi_1), \quad (8)$$

$$b_{vKZ}(\vartheta, t) = 1,35 \frac{w_{KZ} k_{об.см} \mu_0}{v_{KZ} k_H \delta k_c} I_{cm} \cdot \cos(v \cdot \vartheta - \frac{Z_2 \omega_0}{p} t - \varphi_{kz}), \quad (9)$$

где v, λ, v_{KZ} — порядок гармоник переменных составляющих статора, ротора и КЗК; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_{KZ}$ — угол сдвига фазы между током статора, ротора, КЗК и напряжением сети; $\omega_2 = 2\pi f_s$ — круговая частота тока ротора.

Порядок гармоник для ротора и фаз статора, не имеющих КЗК определяется из следующих выражений [1]:

$$v = (mq' + 1)p, \quad (10)$$

$$\lambda = \frac{Z_2}{p} q'' + p, \quad (11)$$

где $q' = q''$ — номера рассматриваемых гармоник, $q' = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

В дефектной фазе происходит образование второго слоя обмотки, состоящей из дефектной фазы с числом витков $(w_1 - w_{KZ})$ и КЗК с числом витков $w_{KZ} = 0,5$. Тогда согласно [1] при числе полюсов $2p > 2$ возникают гармоники порядка $v = 1$, которые создают дополнительную магнитную индукцию $b'_{vD}(\vartheta, t)$ и $b'_{KZ}(\vartheta, t)$. Их величины определяются выражениями (12), (13)

$$b'_{vD}(\vartheta, t) = B_1 \cdot B_{KZ} \cdot \cos(v \cdot \vartheta - (Z_2 \omega_0 \pm (p + q'') \omega_0) t - \varphi_{kz}), \quad (12)$$

где $B_1 = 1,35 \frac{w_1 k_{об.см} \mu_0}{p k_H \delta k_c} k_{ior}$; $B_{KZ} = 1,35 \frac{w_{KZ} k_{об.см} \mu_0}{v_{KZ} k_H \delta k_c}$ — постоянная составляющая магнитной индукции короткозамкнутого контура дефектной обмотки,

$$b'_{KZ}(\vartheta, t) = B_{KZ} \cdot \cos((p' \pm 1) \cdot \vartheta - (\omega_0 \cdot \frac{q''}{p} (1 - s)) t \pm \varphi_{kz}), \quad (13)$$

где $p' = p \pm 1$. Эти составляющие порождают гармоники радиальных силовых волн около пазовой частоты статора.

Определить результирующую магнитную индукцию в заданной угловой координате ϑ , согласно [1] можно по выражению (14)

$$b_{umoz}(\vartheta, t) = b_1(\vartheta, t) + \sum_{\nu} b_{\nu}(\vartheta, t) + \sum_{\lambda} b_{\lambda}(t) + \sum_p b'_1(\vartheta, t) + \\ + \sum_p b'_{\nu D}(\vartheta, t) + \sum_{\nu} b_{\nu D}(\vartheta, t) + \sum_{\nu} b_{KZ}(\vartheta, t) + \sum_{\nu} b'_{KZ}(\vartheta, t) \quad (14)$$

Асимметрия токов фаз при МВЗ создает еще одну переменную силовую волну, определяемую из выражения (15) [12]

$$p_{Nr\Sigma(0;2\pi)} = \int_0^{2\pi} p_r d\vartheta = \frac{1}{2\mu_0} \pi (B_1^2 + B_2^2) + \\ + \frac{2}{2\mu_0} B_1 B_2 \pi \cos(2\omega_1 t + \phi_{b_1} - \phi_{b_2}), \quad (15)$$

где B_2 — постоянная составляющая индукции магнитного поля обратного следования фаз, ϕ_{b_1} , ϕ_{b_2} — фазы магнитной индукции для прямого и обратного следования фаз. [1–3].

Результирующее значение радиальной силы в заданной угловой координате ϑ , определяется по выражению (16)

$$P_{r\Sigma} = \frac{1}{2\mu_0} \sum b_{umoz}(\vartheta, t) + p_{Nr\Sigma(0;2\pi)}. \quad (16)$$

Проведем, анализ полученных в среде MATLAB результатов моделирования, действующих в воздушном зазоре радиальных сил АЭД АИР63В4.

Согласно [3; 13–15], признаки дефектов будут проявляться на частотах до 800 Гц, поэтому ограничим:

- частоту дискретизации величиной 2,5 кГц;
- числа q' , q'' диапазоном от 0 до 9;

Так как скольжение постоянно, не учитывается конструкция пазов статора и ротора, то ограничим число уравнений переменных составляющих теми в которых присутствует магнитная индукция B_1 . Шаг по частоте при спектральном анализе сигнала продолжительностью $T = 5,12$ сек составит $\Delta f = 1/T = 0,195$ Гц, т.е. минимальная погрешность по частоте составит $f \pm 0,1$ Гц.

Из спектрального состава радиальной силы, при развитии МВЗ рис. 5–6 видно, что при появлении и развитии МВЗ наблюдается рост гармоник оборотной частоты f_0 : 24,7 Гц (f_0); 74 Гц ($3f_0$); 123,7 Гц ($5f_0$); 172,7 Гц ($7f_0$); 222 Гц ($9f_0$); 518,1 Гц; 542,1 Гц; 567,4 Гц; 592,1 Гц; 642,8 Гц и 742,7 Гц. Амплитуды перечисленных выше гармоник увеличиваются при развитии дефекта и ограничены лишь общим ростом амплитуды тока в обмотках АЭД. Рост гармоник частоты сети $2f_c = 100$ Гц. и $3f_c = 150$ Гц с развитием дефекта отсутствует.

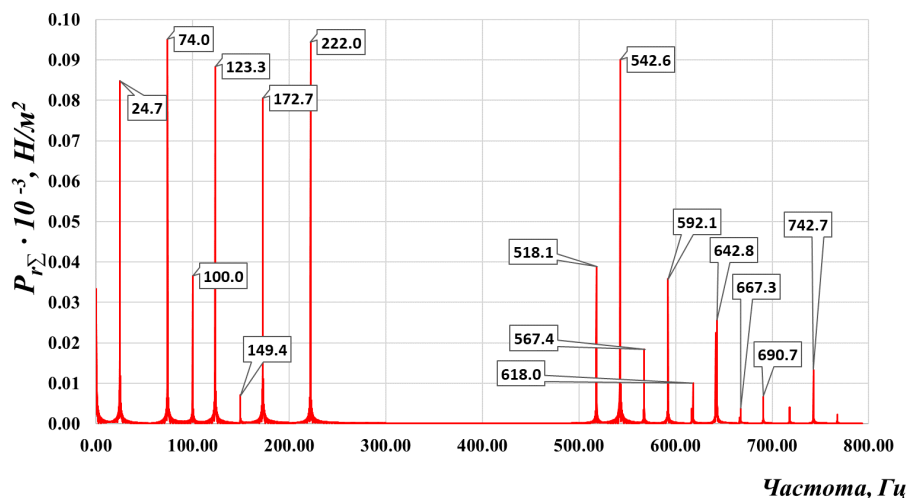


Рис. 5. Амплитудный спектр сигнала радиальной силы при оборотной частоте $f_0 = 24,67$ Гц (относительное скольжение 0,013) при $\zeta = 1.35$ (7 витков)

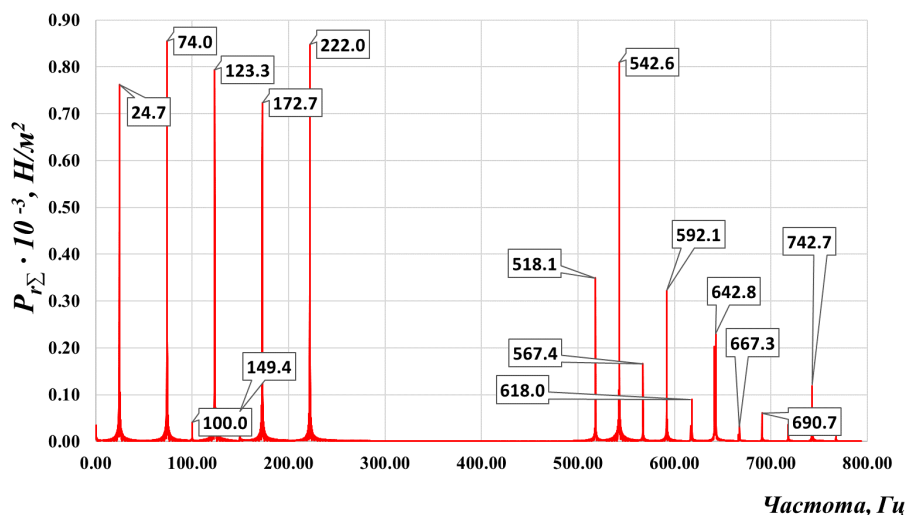


Рис. 6. Амплитудный спектр сигнала радиальной силы при оборотной частоте $f_0 = 24,67$ (относительное скольжение 0,013) при $\zeta = 10$ (57 витков)

Результаты математического моделирования АЭД позволяют сделать выводы что основными признаками наличия МВЗ являются:

– гармоники частоты сети: $2f_c = 100$ Гц (электромагнитная частота);) 3-я гармоника частоты сети $3f_c = 150$ Гц;

– гармоники оборотной частоты 24,7 Гц (f_0); 74, Гц ($3f_0$); 123,3 Гц ($5f_0$); 172,4 Гц ($7f_0$); 222 Гц ($9f_0$); $n \cdot f_0$, где $n = 1, 3, 5, \dots, 9$;

– гармоники пазовой частоты $f_{\text{паз.смаг}} = Z_1 \cdot f_0$ с модуляциями гармониками оборотной частоты $f_{\text{паз.смаг}} \pm n' \cdot f_0$, $n' = 1, 2, \dots, 7$: 518,08 Гц; 542,7 Гц; 567,4 Гц; 618,03 Гц; 642,8 Гц; 667,3 Гц; 690,7 Гц; 742,7 Гц.

Гармоники пазовой частоты являются в соответствии с ее формулой старшими гармониками оборотной частоты.

Спектральный состав радиальной силы (рис. 5, 6) иллюстрирует, что основные спектральные пики на частотах выше 500 Гц (10 гармоники частоты сети) связаны с пазовой частотой статора $f_{\text{паз.смаг}}$ и ее модуляциями оборотной частотой. Ниже уровня 500 Гц основной вклад вносят нечетные гармоники оборотной частоты. Гармоники частоты сети $2f_c$ и $3f_c$ проявляются из-за образования не симметрии фазных токов [12], но их вклад по мере развития дефекта уменьшается.

Экспериментальные исследования

Исследования проведены на двигателе АИР63В4 [5] в котором МВЗ было создано путем соединения (пайкой) 2, 3, 4, 5, 6, 7 и 8 проводников в пазу статора из имеющихся 137 витков в пазу статора (рис. 7). Производился контроль сопротивления обмотки, максимальная степень развития дефекта составила $\zeta = 0,07$ (8 замкнутых витков).

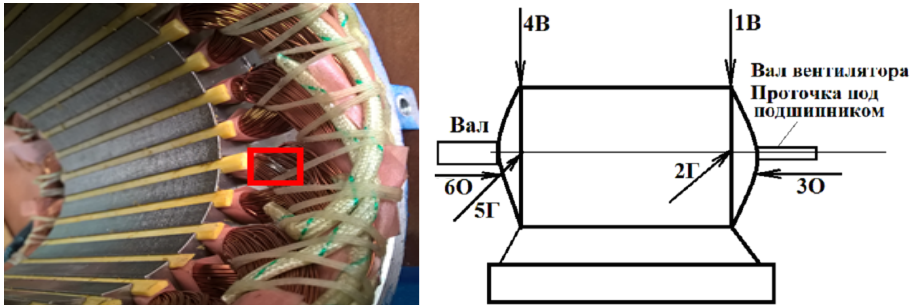


Рис. 7. Искусственно созданный дефект и схема расположения точек при измерении вибрации АД

Измерение вибрации проводилось виброколлектором СК-1100, согласно схеме, приведенной на рис. 8, в двух режимах работы двигателя:

- режим холостого хода, 1495 об/мин ($f_0 \approx 24,92$ Гц);
- под нагрузкой, создаваемой тормозным устройством, частота вращения ротора опускалось до 1479 об/мин ($f_0 \approx 24,67$ Гц).

Результаты измерений СКЗ в контрольных точках представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений вибрации
на опорах электродвигателя АИР63В4

Точки	Холостой ход		Работа под нагрузкой	
	СКЗ скор, мм/с	СКЗ ускор, м/с ²	СКЗ скор, мм/с	СКЗ ускор, м/с ²
1в	1,13	1,83	1,41	1,65
2г	0,86	2,22	0,78	1,92
3о	0,62	2,5	0,99	2,56
4в	1,03	1,98	1,14	1,43
5г	0,88	1,95	1,3	1,75
6о	0,65	2,18	1,2	2,44

Спектральный состав сигналов виброскорости в точке 1в
представлен на рис. 8 и 9.

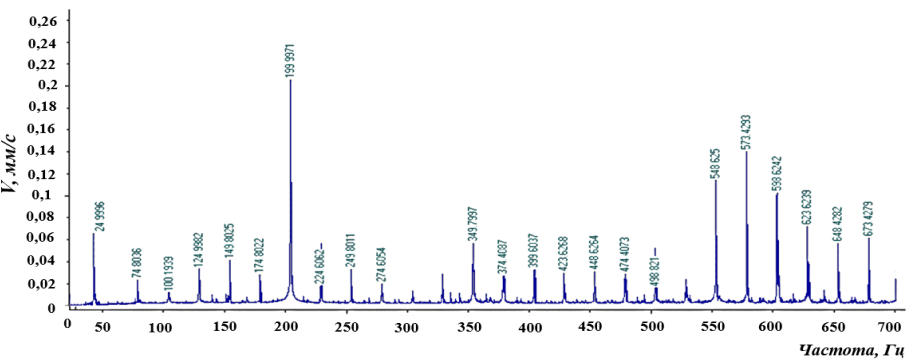


Рис. 8. Амплитудный спектр сигнала виброскорости,
дефект межвитковое замыкание обмотки статора,
работа без нагрузки (точка 1В)

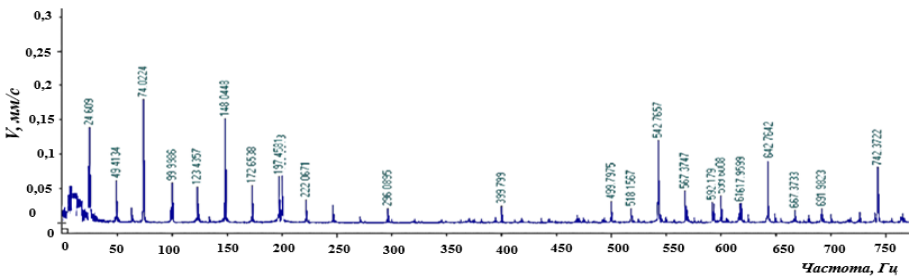


Рис. 9. Амплитудный спектр сигнала виброскорости,
дефект межвитковое замыкание обмотки статора, работа
под нагрузкой, скольжение $s \approx 0,013(0,325 \text{ Гц})$ (точка 1В)

Анализ частотных пиков спектрального состава сигнала вибрации АЭД при МВЗ для работы под нагрузкой и без нагрузки показал, что все пики принадлежат к одной из следующих четырех групп. [14–17].

Первая группа пиков: гармоники обратной частоты $k \cdot f_0$, $k = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 12$:

– без нагрузки: 24,996 (f_0); 74,8 ($3 \cdot f_0$) Гц; 124,99 ($5 \cdot f_0$) Гц; 149,805 ($6 \cdot f_0$) Гц; 174,8 ($7 \cdot f_0$) Гц; 224,6 ($9 \cdot f_0$) Гц; 249,8 ($10 \cdot f_0$) Гц; 274,0 ($11 \cdot f_0$) Гц;

– с нагрузкой: 24,6 Гц; 49,4 ($2 \cdot f_0$) Гц; 74,02 ($3 \cdot f_0$) Гц; 98,6 ($4 \cdot f_0$) Гц; 123,4 ($5 \cdot f_0$) Гц; 148,04 ($6 \cdot f_0$) Гц; 172,65 ($7 \cdot f_0$) Гц; 197,45 ($8 \cdot f_0$) Гц; 222,06 ($9 \cdot f_0$) Гц; 296,08 ($12 \cdot f_0$) Гц.

Вторая группа пиков: гармоники частоты сети или электромагнитной частотой $2f_c = 100$ Гц. При работе АЭД как без нагрузки так и под нагрузкой, включает пики на следующих частотах: 100 ($2f_c$) Гц, 200 ($2 \cdot 2f_c$) Гц, 400 ($4 \cdot 2f_c$) Гц, 500 ($5 \cdot 2f_c$) Гц, в горизонтальном и вертикальном направлениях [11];

Третья группа пиков: гармоника пазовой $f_{\text{наз.смам}}$ с модуляциями электромагнитной частотой $2f_c = 100$ Гц, $f_{\text{наз.смам}} + 2f_c$:

– без нагрузки: 598,62 ($f_{\text{наз.смам}}$) Гц; 698,62 ($f_{\text{наз.смам}} + 2f_c$) Гц;

– с нагрузкой: 592,1 ($f_{\text{наз.смам}}$) Гц; 691,98 ($f_{\text{наз.смам}} + 2f_c$) Гц.

Четвертая группа пиков: гармоника пазовой частоты статора $f_{\text{наз.смам}}$ с модуляцией гармониками электромагнитной частотой сети $2f_c = 100$ Гц, ($f_{\text{наз.смам}} + n2f_c$), где $n = 0, 1, 2, 3$ с дополнительной их модуляцией гармониками обратной частоты $\pm kf_0$ где $k = 1, 2, 3$:

– без нагрузки: 548,625 ($f_{\text{наз.смам}} - 2 \cdot f_0$) Гц; 648,4282 ($f_{\text{наз.смам}} - 2 \cdot f_0$) Гц;

– с нагрузкой: 518,15 ($f_{\text{наз.смам}} - 3f_0$) Гц; 542,76 ($f_{\text{наз.смам}} - 2f_0$) Гц; 567,37 ($f_{\text{наз.смам}} - f_0$) Гц; 593,4 ($f_{\text{наз.смам}} + 2f_c - 3f_0$) Гц; 616,9 ($f_{\text{наз.смам}} - f_0$) Гц; 618 ($f_{\text{наз.смам}} + 2f_c - f_0$) Гц; 642,76 ($f_{\text{наз.смам}} + 2f_c - 2f_0$) Гц; 667,37 ($f_{\text{наз.смам}} + 2f_c - f_0$) Гц; 742,37 ($f_{\text{наз.смам}} + 4f_c - 2f_0$) Гц.

При дальнейшем рассмотрении частотного состава вибрации следует помнить, что рассматриваемый при моделировании и экспериментальных исследованиях АЭД модели АИР62В4 имеет 24 (Z_1) паза у статора и 18 (Z_2) пазов (стержней) ротора. Тогда в режиме холостого хода (частота вращения вала $f_1 \approx f_0 \approx 25$ Гц) $f_{\text{наз.смам}} = 600$ Гц, $f_{\text{наз.смам}} = 450$ Гц, при работе под нагрузкой ($s \approx 0,4$ Гц) $f_0 = 24,65$ Гц, $f_{\text{наз.смам}} = 591,6$ Гц, $f_{\text{наз.смам}} = 443,52$ Гц.

Погрешность моделируемого сигнала радиальной силы в течение времени $T = 5,12$ сек с шагом по частоте $\Delta f = 1/T$ будет при $\Delta f = 0,1953$ Гц и составит $f_{0,1}$ Гц [13].

С учетом погрешности определим диапазон значений пазовых частот в спектрах, представленных на рис. 5–7:

– без нагрузки в диапазоне $f_{\text{наз.смам}} = 24 \cdot 25 \frac{+0,1}{-0,1} = 597,6 \div 602,4$ Гц, т.е. $f_{\text{наз.смам}} = 598,6$ Гц для статора и $f_{\text{наз.ром}} = 18 \cdot 25 \frac{+0,1}{-0,1} = 448,2 \div 451,8$ Гц т.е. $f_{\text{наз.смам}} = 450$ Гц для ротора;

– под нагрузкой будет лежать в диапазоне $f_{\text{наз.смам}} = 24 \cdot 24,65 \frac{+0,1}{-0,1} = 589,42 \div 594,22$ Гц, т.е. $f_{\text{наз.смам}} = 592,1$ Гц и $f_{\text{наз.ром}} = 18 \cdot 24,65 \frac{+0,1}{-0,1} = 442,1 \div 445,7$ Гц, $f_{\text{наз.смам}} = 443,86$ Гц [12, 13].

Следовательно, фактические пазовые частоты $f_{\text{наз.смам}} = 592,09$ Гц и $f_{\text{наз.смам}} = 598,6$ Гц, при работе АЭД без нагрузки и под нагрузкой лежат в диапазонах допуска.

С учетом данных [2; 15–17] и результатов исследований вибрации дефект МВЗ имеет следующие дополнительные подтвержденные признаки:

1. Ряд гармоник пазовой частоты ротора $f_{\text{наз.ром}} = Z_2 \cdot f_0$ ($Z_2 = 18$) с их модуляцией основной электромагнитной частотой $2f_c = 100$ Гц или оборотной частотой f_0 , с учетом точности $f_{-0,1}^{+0,1}$ Гц, присутствуют на графике пиков на частотах 542,76; 642,76 Гц, при работе под нагрузкой.

2. Наличие одновременно как гармоник основной электромагнитной силы с частотой $2f_c$ и гармоник оборотной частоты f_0 , со значительным превосходством последних по амплитуде.

3. Наибольшая величина характерных частот вибрации (СКЗ виброскорости) на частотах модуляции пазовой частоты статора $f_{\text{наз.смам}} = Z_1 \cdot f_0$, гармониками основной электромагнитной частоты $2f_c$ и гармониками оборотной частоты f_0 , регистрируются независимо от конкретного места замыкания витков.

4. Регистрация гармоник электромагнитной частоты $2f_c$, а именно 100 Гц, 200 Гц, 400 Гц, 500 Гц, уже на ранних стадиях развития МВЗ вызвано несимметрией фазных токов из-за уменьшения сопротивления в дефектной обмотке. [12; 14–16].

5. Ряд гармоник частоты сети: f_c (50 Гц), $3f_c$ (150 Гц), $5f_c$ (250 Гц):
– при моделировании на частотах f_c и $3f_c$ имеют крайне низкую амплитуду, для $5f_c$ не обнаружены;

– при экспериментальных исследованиях проявляются пики на частотах $3f_c$ (150 Гц) и $5f_c$ (250 Гц) без нагрузки и f_c (50 Гц) и $3f_c$ (150 Гц) с нагрузкой, при этом пики значительно меньше 2,6 и 10 гармоник оборотной частоты для f_c , $3f_c$ и $5f_c$ соответственно.

Заключение

В результате анализа данных о поведении радиальных сил в воздушном зазоре АЭД полученных при математическом модели-

ровании и экспериментальных исследованиях можно сделать следующие выводы.

1. Математическое моделирование показало, что признаками МВЗ являются пики в спектральном составе на следующих частотах: 24,7 Гц ($3f_0$); 74 Гц ($3f_0$); 100 Гц ($f_{эм}$); 123,3 Гц ($5f_0$); 172,7 Гц ($7f_0$); 222 Гц ($9f_0$); 518 Гц ($f_{наз.стат} - 3f_0$); 542,8 Гц ($f_{наз.стат} - 2f_0$); 592,1 Гц ($f_{наз.стат}$); 642,8 Гц ($f_{наз.стат} + 2f_C - 2f_0$).

2. По результатам проведенного эксперимента, можно сделать вывод, что основными определяющими признаками МВЗ будут являются частоты (без нагрузки/с нагрузкой): $f_{наз.стат} - 2f_0$ — 548,62/542,76 Гц; $f_{наз.стат} - f_0$ — 573,42/567,37 Гц; $f_{наз.стат}$ — 598,62/592,15; $f_{наз.стат} + f_0$ — 623,63/616,9 Гц; $f_{наз.стат} + 2f_C - 2f_0$ — 648,42/642,76; $f_{наз.стат} + 4f_C - 2f_0$ — 742,37 и наличие пазовой частоты ротора $f_{наз.стат} = 448,6$ Гц без нагрузки. Дополнительным признаком является наличие 1,3,9 гармоник оборотной частоты f_0 , также возможно наличие остальных гармоник вплоть до 12, что может быть связано со способом приложения нагрузки.

Присутствие 1-ой гармоники пазовой частоты ротора ($f_{наз.рот} = Z_2 \cdot f_0$), согласно [15–17], при учете погрешности наблюдалось только при работе АЭД без нагрузки во время экспериментальных исследований. На частотах 542,65; 642,75; 742,7 Гц и 542,76; 642,76; 742,36 полученные в на модели и по результатам эксперимента, соответственно, с учетом погрешности можно отнести как к модуляции пазовой частоты статора $f_{наз.стат}$ гармониками оборотной частоты и основной электромагнитной частоты $2f_C$, так и к модуляции пазовой частоты ротора $f_{наз.рот}$ гармониками основной электромагнитной частоты $2f_C$.

3. Присутствующие отклонение по частоте в спектральном составе между моделью и экспериментальными данными, которое может составлять до $\pm 0,2$ Гц, как и разницу и амплитуда с отсутствием на модели пазовой частоты ротора $f_{наз.рот}$ можно объяснить следующим:

- упрощением модели;
- особенностями виброколлектора, которые могут давать дополнительную погрешность при разложении в ряд Фурье экспериментальных данных;
- округление при вычислении, даст систематическую погрешность $\Delta \approx \pm 0,05$ Гц, при полученном шаге по частоте, для данных модели и эксперимента, 0,2 Гц точность преобразования Фурье составит не более $f \pm 0,1$ Гц. Итоговая же погрешность составит не более $\Delta_{\Sigma} \approx 0,3$ Гц.

В результате проведенных математических, численных и экспериментальных исследований получены данные, уточняющие характерные признаки вибрации при МВЗ. В средней полосе частот спектров (от 400 Гц до 800 Гц определена связь между нали-

чением, степенью развития дефекта и изменением в частотном составе радиальной силы и вибрации АЭД. Это позволит не только с более высокой точностью отличать МВЗ от других электрических дефектов, но и определять степень развития и опасности дефекта. Выявленный набор признаков проявляет себя как под нагрузкой, так и в режиме холостого хода, что повысит качество проведения диагностики для двигателей, работающих с примеренными нагрузками.

Список использованной литературы

1. Шубов И.Г. Шум и вибрация электрических машин / И.Г. Шубов. — Ленинград : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. — 208 с.
2. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы электрических системах / С.А. Ульянов. — Москва : Энергия, 1970. — 520 с.
3. Бурцев А.Г. Спектральный анализ тока статора трехфазного асинхронного двигателя при аварийных режимах работы / А.Г. Бурцев, Т.В. Дягилева, А.Г. Пан. — EDN UGRUMJ // Инженерный вестник Дона. — 2015. — № 2-1 (35). — С. 29.
4. Benbouzid M. A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection / M. Benbouzid // IEEE Transaction on Industrial Electronics. — 2000. — Vol. 47, no. 5. — P. 984–993.
5. Асинхронные двигатели серии 4А : справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. — Москва : Энергоиздат, 1982. — 503 с.
6. Xin Ge. Simulation of Vibrations in Electrical Machines for Hybrid-electric Vehicles : master's thesis. / Xin Ge. — Göteborg, 2014. — 68 p.
7. Oviedo S. Motor current signature analysis and negative sequence current based stator winding short fault detection in an induction motor / S. Oviedo, J. Quiroga, C. Borrás // Dyna. — 2011. — Vol. 78, no. 170. — P. 214–220.
8. Петухов В.С. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока / В.С. Петухов, В.А. Соколов // Новости электротехники. — 2005. — № 1 (31). — С. 50–52.
9. On the use of slot harmonics as a potential indicator of rotor bar breakage in the induction machine / A. Khezzar, M.Y. Kaikaa, M. Boucherma, H. Razik // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — 2009. — Vol. 56, no. 11. — P. 4592–4605.
10. Benbouzid M. Bibliography on induction motors faults detection and diagnosis / M. Benbouzid // IEEE Transactions on Energy Conversion. — 1999. — Vol. 14, no. 4. — P. 1065–1074.
11. Singh G. Induction motor inter turn fault detection using infrared thermographic analysis / G. Singh, T.C.A. Kumar, V.N.A. Naikan // Infrared Physics & Technology. — 2016. — Vol. 77, no. 7. — P. 277–282.
12. Belsky I.O. Auxiliary asynchronous electric locomotives machines magnetic field parameters modeling in current asymmetry in phases / I.O. Belsky, A.V. Lukyanov // Proceedings of the 6th international symposium on innovation and sustainability of modern railway. — 2018. — P. 183–188.
13. Неразрушающий контроль : справочник : В 8 т. / под ред. В.В.Клюева. — 2-е изд., испр. — Москва : Машиностроение. 2006. — Т. 7, кн. 2: Вибродиагностика. — 829 с.
14. Соколов Д.В. Определение дефектов электромагнитной системы электрических машин по спектральным характеристикам виброакустических сигналов / Д.В. Соколов // ПромСервис. — URL: <http://www.promservis.ru/pap009.html>.
15. Русов В.А. Спектральная вибродиагностика / В.А. Русов. — Пермь : Вибро-Центр, 1996. — 176 p.

16. Русов В.А. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам / В.А. Русов. — Пермь : Вибро-Центр, 2012. — 198 с.

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

References

1. Shubov I.G. *Noise and Vibration of Electrical Machines*. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1986. 208 p.

2. Ulyanov S.A. *Electromagnetic Transients in Electrical Systems*. Moscow, Energiya Publ., 1970. 520 p.

3. Burtsev A.G., Dyagileva T.V., Pan A.G. Spectral Analysis of the Stator Current Three-Phase Induction Motor in Emergency Mode. *Inzhenernyj vestnik Dona = Engineering journal of Don*, 2015, no. 2-1, pp. 29. (In Russian). EDN: UGRUMJ.

4. Benbouzid M. A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 2000, vol. 47, no. 5, pp. 984–993.

5. Kravchik A.E., Shlaf M.M., Afonin V.I., Sobolevskaya E.A. *Asynchronous Motors Series 4A*. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 503 p.

6. Xin Ge. *Simulation of Vibrations in Electrical Machines for Hybrid-electric Vehicles. Master's Thesis*. Göteborg, 2014. 68 p.

7. Oviedo S., Quiroga J., Borrás C. Motor Current Signature Analysis and Negative Sequence Current Based Stator Winding Short Fault Detection in an Induction Motor. *Dyna*, 2011, vol. 78, no. 170, pp. 214–220.

8. Petukhov V.S., Sokolov V.A. Diagnostics of the Condition of Electric Motors. Method of Spectral Analysis of Current Consumption. *Novosti elektrotehniki = News of Electrical Engineering*, 2005, no. 1, pp. 50–52. (In Russian).

9. Khezzar A., Kaikaa M.Y., Boucherra M., Razik H. On the Use of Slot Harmonics as a Potential Indicator of Rotor Bar Breakage in the Induction Machine. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, vol. 56, no. 11, pp. 4592–4605.

10. Benbouzid M. Bibliography on Induction Motors Faults Detection and Diagnosis. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1999, vol. 14, no. 4, pp. 1065–1074.

11. Singh G., Kumar T.C.A., Naikan V.N.A. Induction Motor Inter Turn Fault Detection Using Infrared Thermographic analysis. *Infrared Physics & Technology*, 2016, vol. 77, no. 7, pp. 277–282.

12. Belsky I.O., Lukyanov A.V. Auxiliary Asynchronous Electric Locomotives Machines Magnetic Field Parameters Modeling in Current Asymmetry in Phases. *Proceedings of the 6th International Symposium on Innovation and Sustainability of Modern Railway*. 2018, pp. 183–188.

13. Klyuev V.V. (ed.). *Unbrakable Control*. 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006. Vol. 7, bk. 2. 829 p.

14. Sokolov D.V. Determination of Defects in the Electromagnetic System of Electrical Machines Based on the Spectral Characteristics of Vibroacoustic Signals. *PromServis*. Available at: <http://www.promservis.ru/pap009.html>. (In Russian).

15. Rusov V.A. *Spectral Vibration Diagnostics*. Perm, Vibro-Tsentr Publ., 1996. 176 p.

16. Rusov V.A. *Diagnosis of Defects in Rotating Equipment Using Vibration Signals*. Perm, Vibro-Tsentr Publ., 2012. 198 p.

17. Lukyanov A.V. *Classifier of Vibration Diagnostic Signs of Rotary Machine Defects*. Irkutsk State Technical University Publ., 1999. 228 p.

Информация об авторах

Куприянов Иван Сергеевич — старший преподаватель, кафедра физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Российская Федерация, e-mail: xpress14@mail.ru.

Лукьянов Анатолий Валерианович — доктор технических наук, профессор, кафедра физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Российская Федерация, e-mail: loukian@inbox.ru.

Information about the Authors

Ivan S. Kupriyanov — Senior Lecturer, Department of Physics, Mechanics and Instrumentation, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: xpress14@mail.ru.

Anatoly V. Lukyanov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Physics, Mechanics and Appliances, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: loukan@inbox.ru.

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the Authors

The authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Для цитирования

Куприянов И.С. Математическое моделирование механических колебаний асинхронного двигателя при межвитковом замыкании обмотки статора / И.С. Куприянов, А.В. Лукьянов. — DOI 10.17150/2713-1734.2024.6(3).339-356. — EDN ISFBBZ // *System Analysis & Mathematical Modeling*. — 2024. — Т. 6, № 3. — С. 339–356.

For Citation

Kupriyanov I.S., Lukyanov A.V. Mathematical Mechanical Vibration Modeling Stator Winding Inter-Turn Short-Circuit of Mechanical Oscillations of Induction Motor. *System Analysis & Mathematical Modeling*, 2024, vol. 6, no. 3, pp. 339–356. (In Russian). EDN: ISFBBZ. DOI: 10.17150/2713-1734.2024.6(3).339-356.