

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-501751>

Оригинальное исследование



Диагностика межвитковых коротких замыканий в фазных обмотках статора синхронных электродвигателей с постоянными магнитами

М.М. Жилейкин, А.В. Климов, Б.К. Оспанбеков, С.С. Смирнов

Инновационный центр «КАМАЗ», Инновационный центр Сколково, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. В настоящее время в сегменте городских пассажирских перевозок все более широкое применение находят электробусы, что обуславливается отсутствием вредных выбросов и низким уровнем шума. В качестве тягового электродвигателя широко используются синхронные машины с постоянными магнитами (СМПМ). Одним из наиболее перспективных методов контроля технического состояния тяговых электродвигателей является диагностика с помощью средств мониторинга, установленных на борту транспортного средства. К достоинствам таких методов следует отнести возможность проведения регулярных частых проверок состояния (в отличие от гораздо более редкого диагностирования в стационарных пунктах технического обслуживания) и более оперативного реагирования на развитие выявленных неисправностей, что существенно сокращает затраты на техническое обслуживание и ремонт дорогостоящего оборудования. К недостаткам относятся ограничения, связанные с дефицитом компоновочного пространства для размещения диагностического оборудования, и с ограниченными возможностями бортовых компьютерных средств по передаче и хранению диагностической информации и с трудоёмкостью вычислительных процедур встроенных экспертно-диагностических систем. Если говорить о видах эксплуатационных отказов СМПМ, которые встречаются наиболее часто и имеют наиболее тяжёлые с точки зрения затрат на восстановление работоспособности, то это межвитковые замыкания в обмотках статора, повышенный эксцентриситет воздушного зазора между статором и ротором, повреждение подшипников, а также повреждения связанного с электродвигателем механического редуктора.

Цель работы — выявление диагностических признаков межвитковых коротких замыканий в фазных обмотках синхронного электродвигателя с постоянными магнитами, с помощью которых можно на ранней стадии выявлять эти неисправности на борту маршрутных городских транспортных средств.

Методы. Разработана математическая модель синхронного электродвигателя с постоянными магнитами с короткозамкнутыми витками фазной обмотки, позволяющая проводить исследование поведения двигателя при различном числе замкнутых витков.

Результаты и выводы. Впервые сформулированы требования к диагностическим признакам для бортовой системы диагностики городского рейсового электробуса, позволяющим выявлять межвитковые замыкания в фазовых обмотках тяговых электродвигателей на ранних стадиях зарождения неисправности. Получены основные параметры процесса цифровой регистрации фазных токов, позволяющие проводить измерения и передачу сигналов по бортовой информационной сети электробуса. Методами имитационного моделирования установлено, что пиковые значения линейного спектра суммарного вектора тока являются устойчивыми диагностическими признаками, позволяющим выявлять межвитковые замыкания в фазовых обмотках тяговых электродвигателей на ранних стадиях зарождения неисправности.

Заключение. Практическая ценность исследования заключается в возможности использования предложенных методов диагностирования технического состояния узлов тягового электропривода на городском пассажирском электротранспорте.

Ключевые слова: городской электротранспорт; тяговый электродвигатель; бортовая диагностика; фазные токи; спектральный анализ.

Как цитировать:

Жилейкин М.М., Климов А.В., Оспанбеков Б.К., Смирнов С.С. Диагностика межвитковых коротких замыканий в фазных обмотках статора синхронных электродвигателей с постоянными магнитами // Известия МГТУ «МАМИ». 2023. Т. 17, № 4. С. 411–422. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-501751>

Рукопись получена: 21.06.2023

Рукопись одобрена: 30.08.2023

Опубликована онлайн: 15.12.2023

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-501751>

Original study article

Diagnostics of inter-turn short circuits in phase stator windings of permanent magnet synchronous machines

Mikhail M. Zhileikin, Alexander V. Klimov, Baurjan K. Ospanbekov, Stanislav S. Smirnov

KAMAZ Innovation Center, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: Currently, electric buses are becoming more widespread in the segment of urban passenger transportation due to the absence of harmful emissions and low noise levels. Permanent magnet synchronous machines (PMSM) are widely used as a traction motor.

One of the most promising methods of monitoring the technical condition of traction motors is diagnostics using monitoring tools installed on board of a vehicle. The advantages of such methods include the possibility of regular frequent condition checks (as opposed to much rarer diagnostics in stationary maintenance points) and a more rapid response to the development of identified malfunctions, which significantly reduces the cost of maintenance and repair of expensive equipment. The disadvantages include limitations associated with a shortage of layout space for the placement of diagnostic equipment, with the limited capabilities of on-board computer facilities for the transmission and storage of diagnostic information and with the complexity of computational procedures of built-in expert diagnostic systems.

Concerning the types of operational failures of PMSMs, which are the most common and the most severe in terms of the cost of restoring operability, these are inter-turn short circuits in the stator windings, increased eccentricity of the air gap between the stator and the rotor, bearing damage, as well as damage of the mechanical gearbox coupled with the electric motor.

AIM: Identification the diagnostic signs of inter-turn short circuits in the phase windings of a permanent magnet synchronous machine, helping to detect these malfunctions on board of route urban vehicles at an early stage.

METHODS: A mathematical model of a permanent magnet synchronous machine with short-circuited turns of the phase winding, which makes it possible to study the behavior of the motor with a various number of short-circuited turns, has been developed.

RESULTS: For the first time, the requirements for diagnostic features for the on-board diagnostic system of an urban electric bus, making it possible to detect inter-turn short circuits in the phase windings of traction electric motors at the early stages of the origin of a malfunction, are formulated.

The main parameters of the process of digital registration of phase currents have been obtained, helping to do measurements and to transmit signals through the onboard information network of the electric bus.

Using simulation modeling methods, it was found that the peak values of the linear spectrum of the total current vector are stable diagnostic signs that make it possible to detect inter-turn short circuits in the phase windings of traction motors at the early stages of the origin of the malfunction.

CONCLUSION: The practical value of the study lies in the opportunity of using the proposed methods for diagnosing the technical condition of traction electric drive units in urban passenger electric transport.

Keywords: urban electric transport; traction electric motor; on-board diagnostic; phase currents; spectral analysis.

To cite this article:

Zhileikin MM, Klimov AV, Ospanbekov BK, Smirnov SS. Diagnostics of inter-turn short circuits in phase stator windings of permanent magnet synchronous machines. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2023;17(4):411–422. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-501751>

Received: 21.06.2023

Accepted: 30.08.2023

Published online: 15.12.2023

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в сегменте городских пассажирских перевозок все более широкое применение находят электробусы, что обуславливается отсутствием вредных выбросов и низким уровнем шума [1, 2]. В качестве тягового электродвигателя широко используются синхронные машины с постоянными магнитами (СМПМ).

Одним из наиболее перспективных методов контроля технического состояния тяговых электродвигателей является диагностика с помощью средств мониторинга, установленных на борту транспортного средства. К достоинствам таких методов следует отнести возможность проведения регулярных частых проверок состояния (в отличие от гораздо более редкого диагностирования в стационарных пунктах технического обслуживания) и более оперативного реагирования на развитие выявленных неисправностей, что существенно сокращает затраты на техническое обслуживание и ремонт дорогостоящего оборудования. К недостаткам относятся ограничения, связанные с дефицитом компоновочного пространства для размещения диагностического оборудования, и с ограниченными возможностями бортовых компьютерных средств по передаче и хранению диагностической информации и с трудоёмкостью вычислительных процедур встроенных экспертно-диагностических систем.

Если говорить о видах эксплуатационных отказов СМПМ, которые встречаются наиболее часто и имеют наиболее тяжёлые с точки зрения затрат на восстановление работоспособности, то это межвитковые замыкания в обмотках статора, повышенный эксцентриситет воздушного зазора между статором и ротором, повреждение подшипников, а также повреждения связанного с электродвигателем механического редуктора.

Цель работы — выявление диагностических признаков межвитковых коротких замыканий в фазных обмотках синхронного электродвигателя с постоянными магнитами, с помощью которых можно на ранней стадии выявлять эти неисправности на борту маршрутных городских транспортных средств.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ С КОРТОКЗАМКНУТЫМИ ВИТКАМИ ФАЗНОЙ ОБМОТКИ

Рассмотрим электрическую машину, изображённую на рис. 1.

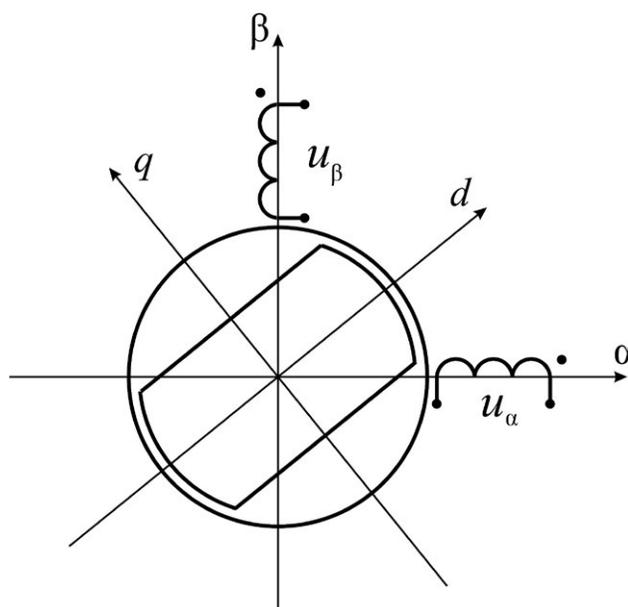


Рис. 1. Двухфазная обобщённая электрическая машины.
Fig. 1. A two-phase electric machine.

В проекциях на оси α, β неподвижной системы координат (НСК) напряжения $u_{s\alpha}, u_{s\beta}$ на обмотках статора:

$$u_{s\alpha} = i_{s\alpha} R_{s\alpha} + \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt}, \quad u_{s\beta} = i_{s\beta} R_{s\beta} + \frac{d\psi_{s\beta}}{dt}, \quad (1)$$

где $R_{s\alpha}, R_{s\beta}$ — активные сопротивления фазных обмоток.

Для неявнополюсной синхронной машины с постоянными магнитами можно записать в проекциях на оси α, β НСК [4]

$$\begin{aligned} \psi_{s\alpha} &= i_{s\alpha} L_{s\alpha} + \psi_{nm} \cos \theta, \\ \psi_{s\beta} &= i_{s\beta} L_{s\beta} + \psi_{nm} \sin \theta, \end{aligned} \quad (2)$$

где ψ_{nm} — составляющая потокосцепления статора с постоянным магнитом ротора.

Продифференцируем (1) по времени

$$\begin{aligned} \psi_{s\alpha} &= i_{s\alpha} \frac{dL_{s\alpha}}{dt} + L_{s\alpha} \frac{di_{s\alpha}}{dt} - \psi_{nm} \sin \theta, \\ \frac{dL_{s\alpha}}{dt} &= -i_{s\beta} \omega_r p \frac{dL_{s\beta}}{d\theta}; \\ \psi_{s\beta} &= i_{s\beta} \frac{dL_{s\beta}}{dt} + L_{s\beta} \frac{di_{s\beta}}{dt} + \psi_{nm} \cos \theta, \\ \frac{dL_{s\beta}}{dt} &= -i_{s\alpha} \omega_r p \frac{dL_{s\alpha}}{d\theta}, \end{aligned} \quad (3)$$

где ω_r — угловая скорость вращения ротора; p — число пар полюсов электродвигателя.

Тогда, выражая в (1) и (3) в явном виде производные

$$\frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} \text{ и } \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} \text{ и, приравнявая правые части, получим}$$

окончательно:

$$L_{s\alpha} \frac{di_{s\alpha}}{dt} = u_{s\alpha} - i_{s\alpha} R_{s\alpha} - i_{s\beta} \omega_r p \frac{dL_{s\beta}}{d\theta} + \psi_{nm} \sin \theta,$$

$$L_{s\beta} \frac{di_{s\beta}}{dt} = u_{s\beta} - i_{s\beta} R_{s\beta} - i_{s\alpha} \omega_r p \frac{dL_{s\alpha}}{d\theta} - \psi_{nm} \cos \theta. \quad (4)$$

В случае, если на одной из фазных обмоток происходит короткое замыкание n витков, то электромагнитные параметры обмотки меняются следующим образом. Для определённости примем, что это происходит на обмотке фазы A , фазы B и C не меняются.

Активное сопротивление R_{A0} оставшихся незакороченными витков фазы A равно:

$$R_{A0} = R_S - R_{SZ}, \quad R_{SZ} = R_S \frac{n}{w_k - n},$$

где R_S — начальное активное сопротивление фазной обмотки; R_{SZ} — активное сопротивление закороченных витков фазной обмотки; w_k — число витков исправной фазной обмотки.

Индуктивность L_{SZ} закороченных витков фазной обмотки можно оценить по формуле:

$$L_{SZ} = \frac{n^2 \mu_0 s}{l_z}; \quad l_z = \frac{ln}{w_k - n},$$

где $\mu_0 = 1,256 \times 10^{-6}$ Гн/м — магнитная постоянная; s — площадь сечения сердечника фазной обмотки; l — длина катушки.

Индуктивность рассеивания L_{0Z} повреждённой обмотки оценим по формуле:

$$L_{0Z} = \frac{(w_k - n)^2 \mu_0 s}{(l - l_z)}.$$

Индуктивность рассеивания L_0 исправной обмотки равна:

$$L_0 = \frac{w_k^2 \mu_0 s}{l}.$$

Собственные индуктивности фазных обмоток рассчитываются так [5]:

$$\begin{aligned} L_{AA} &= L_{0Z} + L_1 - L_2 \cos(2p\theta), \\ L_{BB} &= L_{0Z} + L_1 - L_2 \cos 2\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right), \\ L_{CC} &= L_{0Z} + L_1 - L_2 \cos 2\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right). \end{aligned} \quad (5)$$

Индуктивности взаимной индукции

$$L_{AB} = L_{BA} = -\frac{1}{2} L_1 - L_2 \cos 2\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right),$$

$$L_{AC} = L_{CA} = -\frac{1}{2} L_1 - L_2 \cos 2\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right),$$

$$L_{BC} = L_{CB} = -\frac{1}{2} L_1 - L_2 \cos(2p\theta). \quad (6)$$

В формулах (5) и (6) [5]:

$$L_1 = \left(\frac{w_{гп}}{2}\right)^2 \pi \mu_0 r l_p \lambda_0, \quad L_2 = -\frac{1}{2} \left(\frac{w_{гп}}{2}\right)^2 \pi \mu_0 r l_p \lambda_1,$$

где $w_{гп}$ — эквивалентное число витков фазной обмотки; r — величина воздушного зазора; l_p — длина ротора; λ_0, λ_1 — коэффициенты ряда Фурье разложения коэффициента удельной магнитной проводимости [5]:

$$\lambda_0 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\gamma_m}{\delta_{\max}} + \frac{\pi - \gamma_m}{\delta_{\min}} \right),$$

$$\lambda_1 = \frac{2}{\pi} \sin \gamma_m \left(\frac{1}{\delta_{\max}} - \frac{1}{\delta_{\min}} \right), \quad \delta_{\min} = l_6 K_C,$$

где γ_m — угол открытия постоянных магнитов (рис. 2); $\delta_{\max}, \delta_{\min}$ — максимальный и минимальный эквивалентные воздушные зазоры (рис. 3); l_6 — длина воздушного зазора; K_C — коэффициент Картера [5].

$$K_C = \frac{t_z}{t_s}, \quad t_s = \frac{\pi D}{2p},$$

где t_z — ширина магнита; t_s — полюсное деление; D — диаметр статора;

$$\delta_{\max} = \delta_{\min} + \frac{\mu_0 w_6 l_m}{P_m + P_{ст.м} + P_6}, \quad w_6 = \frac{\gamma_m}{p} r,$$

где w_6 — ширина угла раскрытия магнитов; l_m — длина магнита; P_m — магнитная проницаемость постоянных магнитов; $P_{ст.м}$ — магнитная проницаемость стальных мостов (рис. 4); P_6 — общая магнитная проводимость барьеров [5].

$$P_m = \mu_m \mu_0 \frac{w_m l_p}{l_m},$$

где μ_m — относительная магнитная проницаемость магнита; w_m — ширина магнита.

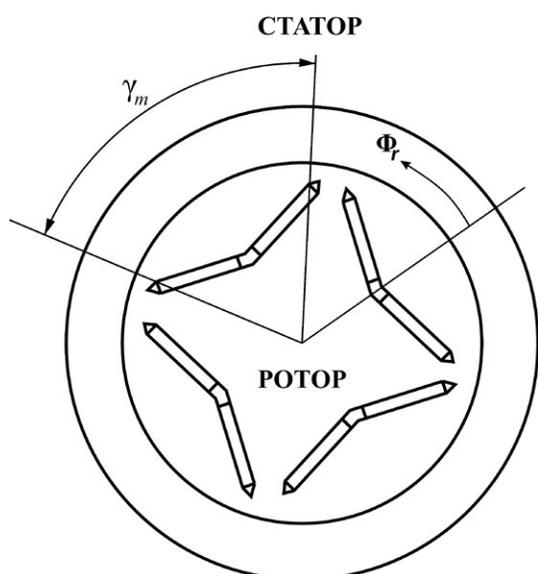


Рис. 2. Расположение постоянных магнитов.
Fig. 2. Location of permanent magnets.

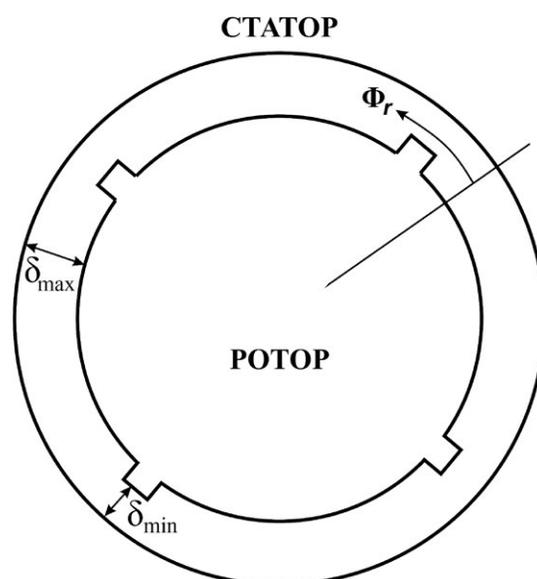


Рис. 3. Воздушные зазоры между статором и ротором.
Fig. 3. Air gaps between a stator and a rotor.

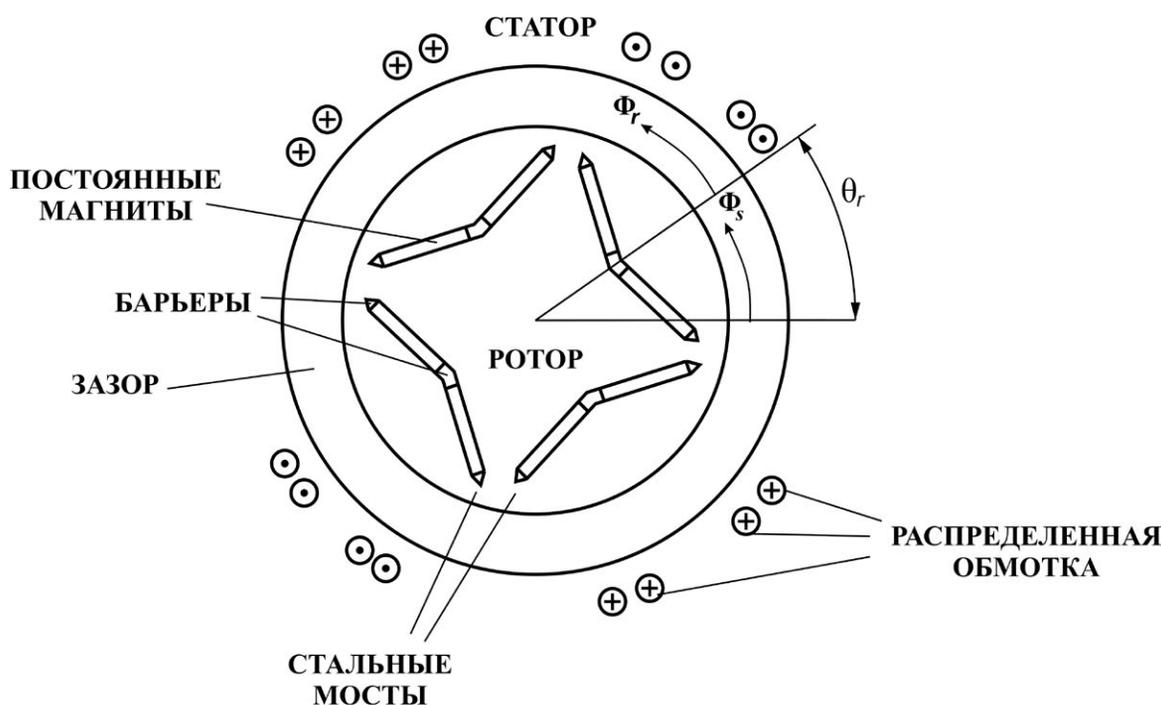


Рис. 4. Схема синхронного двигателя.
Fig. 4. A scheme of a synchronous machine.

$$P_6 = \sum P_{6i}, P_{6i} = \frac{\mu_0 w_{6i} l_p}{l_{6i}},$$

где w_{6i}, l_{6i} — ширина и длина i -го барьера.

$$P_{ст.м} = \frac{\mu_0 w_{ст.м} l_p}{l_{ст.м}},$$

где $w_{ст.м}, l_{ст.м}$ — ширина и длина стального моста.

$$w_{гр} = \frac{4q}{\pi} w_k K_{y1} K_{p1}, K_{y1} = \sin \frac{\alpha_y}{2}, K_{p1} = \frac{\sin \frac{\pi}{2m}}{q \sin \frac{\pi}{2qm}},$$

где w_k — число витков фазной обмотки; q — число катушек фазы, соединённых последовательно; K_{y1} — коэффициент укорочения шага обмотки, характеризующий влияние шага катушки $\alpha_y = p\gamma_m$ на значение

магнитодвижущей силы; K_{p1} — коэффициент распределения первой гармонической составляющей магнитодвижущей силы; m — число фаз.

Полная матрица индуктивностей по осям ABC

$$\mathbf{L}_{ABC} = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} \end{bmatrix}.$$

Проекции индуктивностей L_{dq} на оси подвижной системы координат (ПСК) dq (рис. 1) [5]

$$\mathbf{L}_{dq} = \begin{bmatrix} L_d & L_q & 0 \end{bmatrix}^T = \mathbf{K}_S \mathbf{L}_{ABC} \mathbf{K}_S^{-1},$$

где \mathbf{K}_S — матрица перехода из НСК $\alpha\beta$ в ПСК dq ; \mathbf{K}_S^{-1} — матрица, обратная к \mathbf{K}_S .

$$\mathbf{K}_S = \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta & -\sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}.$$

Проекция матрицы \mathbf{R}_{ABC} активных сопротивлений фазных обмоток по осям ABC

$$\mathbf{R}_{ABC} = \begin{bmatrix} R_A \\ R_B \\ R_C \end{bmatrix}$$

на оси ПСК dq : $\mathbf{R}_{dq} = \mathbf{K}_S \mathbf{R}_{ABC}$.

Проекция тех же параметров на оси НСК $\alpha\beta$ [4]:

- матрица индуктивностей $\mathbf{L}_{\alpha\beta} = \mathbf{T}_\theta \mathbf{L}_{dq}$;
- матрица активных сопротивлений $\mathbf{R}_{\alpha\beta} = \mathbf{T}_\theta \mathbf{R}_{dq}$;

$$\mathbf{T}_\theta = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}.$$

При замыкании n витков фазной обмотки образуется трансформатор, где закороченные витки выступают в качестве вторичной обмотки. Ток i_v , протекающий в закороченных витках, можно определить формулой:

$$i_v = \frac{w_k}{n} i_\Phi,$$

где i_Φ — фазный ток.

Магнитный поток $\psi_v = L_v i_v$, который создается закороченными витками обмотки, направлен против основного магнитного потока двигателя. Тогда уравнения (1)–(4) для синхронного электродвигателя с постоянными

магнитами, у которого происходит короткое замыкание витков фазных обмоток, можно записать с учётом того, что ранее было принято, что повреждена обмотка A , т.е.

$$\begin{aligned} \left(L_{s\alpha}^* + L_{sz} \frac{w_k}{n} \right) \frac{di_{s\alpha}}{dt} = \\ = u_{s\alpha} - i_{s\alpha} R_{s\alpha}^* + i_{s\beta} \omega_r p \left(\frac{dL_{s\beta}^*}{d\theta} + \frac{dL_{sz}}{d\theta} \frac{w_k}{n} \right) + \psi_{\text{пм}} \sin \theta, \end{aligned}$$

$$L_{s\beta}^* \frac{di_{s\beta}}{dt} = u_{s\beta} - i_{s\beta} R_{s\beta}^* + i_{s\alpha} \omega_r p \frac{dL_{s\alpha}^*}{d\theta} - \psi_{\text{пм}} \cos \theta,$$

где $R_{s\alpha}^*$, $R_{s\beta}^*$ — проекции вектора активных сопротивлений фазных обмоток на оси НСК $\alpha\beta$ с учётом изменения сопротивления фазной обмотки A ; $L_{s\alpha}^*$, $L_{s\beta}^*$ — проекции вектора индуктивностей фазных обмоток на оси НСК $\alpha\beta$ с учётом изменения сопротивления фазной обмотки A .

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДАМИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ПРИ КОРТОМ ЗАМЫКАНИИ ВИТКОВ ОДНОЙ ИЗ ФАЗНЫХ ОБМОТОК

Для исследования работы синхронного электродвигателя с постоянными магнитами при коротком замыкании витков одной из фазных обмоток проведём моделирование разгона с постоянной нагрузкой на валу. В качестве метода управления двигателем будем использовать векторный метод на основе широтно-импульсной модуляции (ШИМ) центрального заполнения [6]. Характеристики электродвигателя приведены в таблице 1.

Зависимости угловой скорости вращения ротора в процессе разгона при различном количестве короткозамкнутых витков в фазной обмотке представлены на рис. 5. На рис. 6 показаны крутящие электромагнитные моменты исследуемого тягового электродвигателя.

Анализ графиков на рис. 5 и 6 позволяет сделать вывод о том, что с появлением и ростом числа короткозамкнутых витков в одной из фазных обмоток мощность электродвигателя падает и при прочих равных условиях он уже не способен под нагрузкой развивать номинальные обороты. При этом наблюдается монотонное падение мощности с ростом закороченных витков.

Таблица 1. Технические характеристики синхронного ТЭД**Table 1.** Technical specification of a synchronous traction electric motor

№	Наименование характеристики	Значение
1	Максимальный длительный крутящий момент, Нм	290
2	Номинальная частота вращения ротора, об/мин	10500
3	Напряжение питания, В	640
4	Коэффициент полезного действия, %	97
5	Несущая частота ШИМ, Гц	10 000
6	Сопротивление фазной обмотки, Ом	0,01476
7	Число витков на фазу	40
8	Площадь сечения сердечника фазной обмотки, м ²	0,05515
9	Длина катушки, м	0,1
10	Индуктивность фазной катушки, Гн	0.0011
11	Число пар полюсов	5
12	Число катушек фазы, соединённых последовательно	2
13	Диаметр статора, м	0,305
14	Длина ротора, м	0,1
15	Угол открытия постоянных магнитов, угл. градусы	36
16	Длина магнита по направлению магнитной индукции, м	0,0022
17	Ширина магнита, м	0,0024
18	Полюсное деление	0,096
19	Ширина барьера магнитов, м	0,0035
20	Длина барьера магнитов, м	0,035
21	Длина стального моста, м	0,002
22	Ширина стального моста, м	0,002

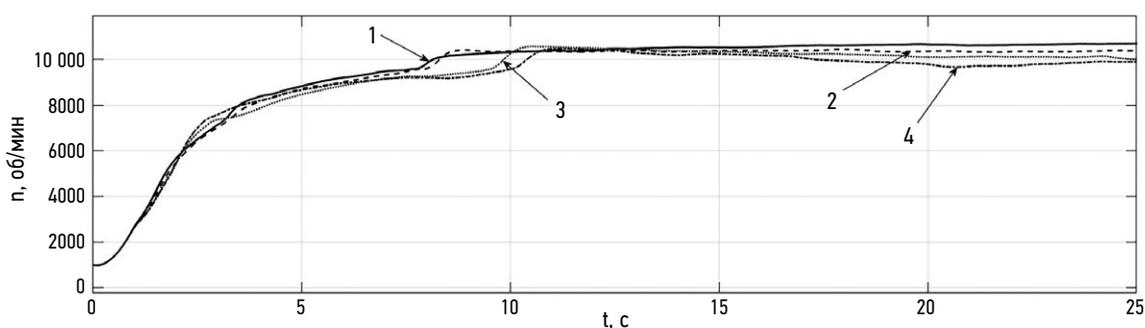


Рис. 5. Зависимости угловой скорости вращения ротора в процессе разгона при различном количестве короткозамкнутых витков в фазной обмотке: 1 — исправный электродвигатель; 2 — один виток замкнут; 3 — два витка замкнуты; 4 — три витка замкнуты.

Fig. 5. Dependence of rotor rotation speed when accelerating at various number of short-circuit turns in a phase winding: 1 — a fault-free electric motor; 2 — one short-circuit turn; 3 — two short-circuit turns; 4 — three short-circuit turns.

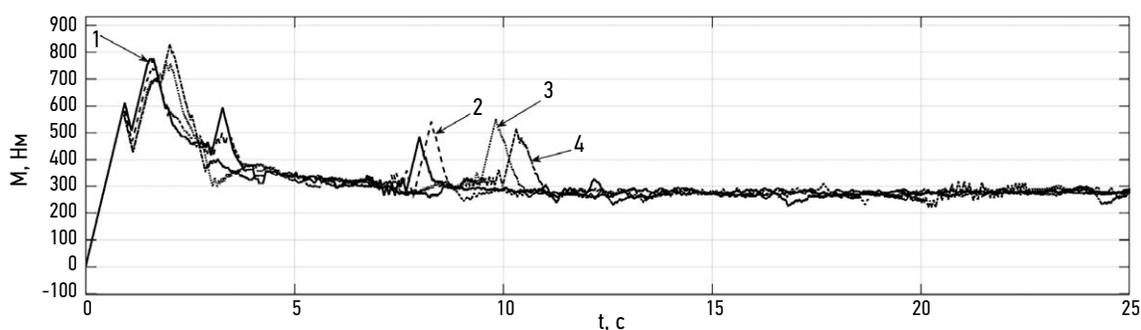


Рис. 6. Крутящие электромагнитные моменты исследуемого тягового электродвигателя: 1 — исправный электродвигатель; 2 — один виток замкнут; 3 — два витка замкнуты; 4 — три витка замкнуты.

Fig. 6. Traction electromagnetic torques of the studied traction electric motor: 1 — a fault-free electric motor; 2 — one short-circuit turn; 3 — two short-circuit turns; 4 — three short-circuit turns.

ВЫЯВЛЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ МЕЖВИТКОВЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В ФАЗНЫХ ОБМОТКАХ СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Следующим шагом исследования является поиск диагностического признака, позволяющего на ранних стадиях выявлять исследуемую неисправность. Такой признак должен удовлетворять следующим требованиям:

1. Значение диагностического признака должно быть однозначно связано с мерой повреждения фазной обмотки и иметь ярко выраженный монотонный характер изменения при повышении степени повреждения.
2. Диагностический признак должен поддаваться физическим измерениям или оценке на основе физически измеряемых сигналов.
3. Объём выборки и частота дискретизации сигнала при измерении диагностического признака не должны превышать возможности бортовой сети транспортного средства при передаче сигнала.
4. При измерении сигнала не должно быть предъявлено специальных требований к условиям движения транспортного средства, которые могут препятствовать выполнению его основных функций или могут привести к угрозе безопасности движения.

В последнее время в мире получили широкое развитие методы диагностики состояния электрических машин, основанные на выполнении мониторинга потребляемого тока с последующим выполнением специального спектрального анализа полученного сигнала [7–13].

Определим основные параметры процесса цифровой регистрации фазных токов. Максимальная частота вращения ротора рассматриваемого электродвигателя составляет 10500 об/мин (таблица 2), что примерно соответствует 175 Гц. Соответствующие характеристические

частоты, на которых могут начать проявляться межвитковые замыкания, с учётом кратности, могут достигать 1000 Гц. Следовательно, частота дискретизации исследуемых фазных токов, согласно теореме Котельникова, должна составлять не менее 2000 Гц. Предварительно, реализации фазных токов необходимо подвергнуть фильтрации с помощью аналоговых фильтров низких частот (нами были использованы фильтры Баттерворта) с частотой среза 2000 Гц.

Длина реализации была выбрана равной 0,5 с, чтобы не возникло перегрузки бортовой сети транспортного средства. При этом, поскольку на городском маршрутном электробусе довольно сложно обеспечить строгое постоянство частоты вращения ротора, был выбран режим увеличения оборотов с 1000 об/мин до 1300 об/мин при полном нажатии педали акселератора (режим трогания с места — рис. 7). Такой режим движения встречается часто и не требует каких-либо специальных процедур управления электробусом, а, следовательно, может быть реализован при измерениях. Кроме того, моделирование показало, что процесс легко воспроизводится независимо от числа замкнутых витков фазной обмотки тягового электродвигателя.

Далее проводилось вычисление линейного спектра суммарного вектора тока для реализации длиной 0,5 секунды с использованием сглаживающего окна Ханна при 75% перекрытии. На рис. 8–11 представлены линейные спектры суммарного вектора тока для случая, когда двигатель исправен ($n = 0$), и для случаев закорачивания одного, двух и трех витков фазной обмотки.

Анализ спектров суммарного вектора фазных токов (рис. 8–11) показывает, что требованию о том, что значение диагностического признака должно быть однозначно связано с мерой повреждения фазной обмотки и иметь ярко выраженный монотонный характер изменения при повышении степени повреждения, соответствуют пиковые значения спектров на частотах 240; 415 и 495 Гц. В таблице 2 приведены эти пиковые значения для различного числа замкнутых витков фазной обмотки.

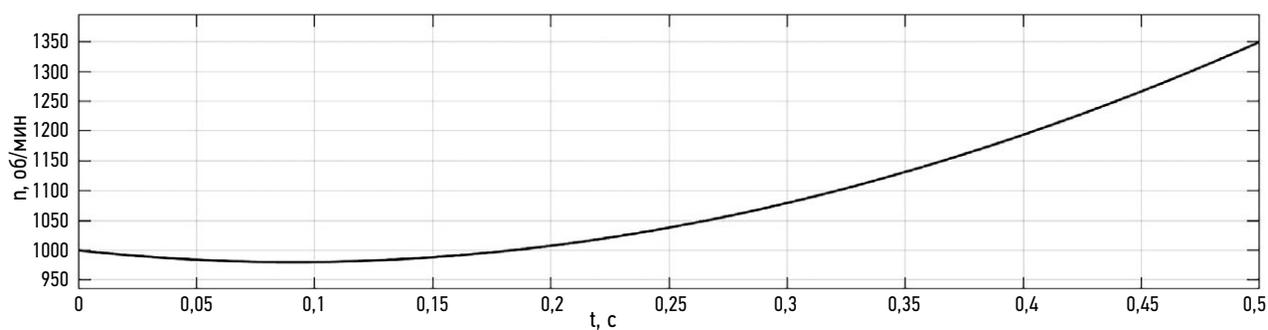


Рис. 7. Процесс увеличения частоты вращения ротора электродвигателя при регистрации фазных токов.

Fig. 7. Process of increase of rotation speed of the rotor of the electric motor at phase currents registration.

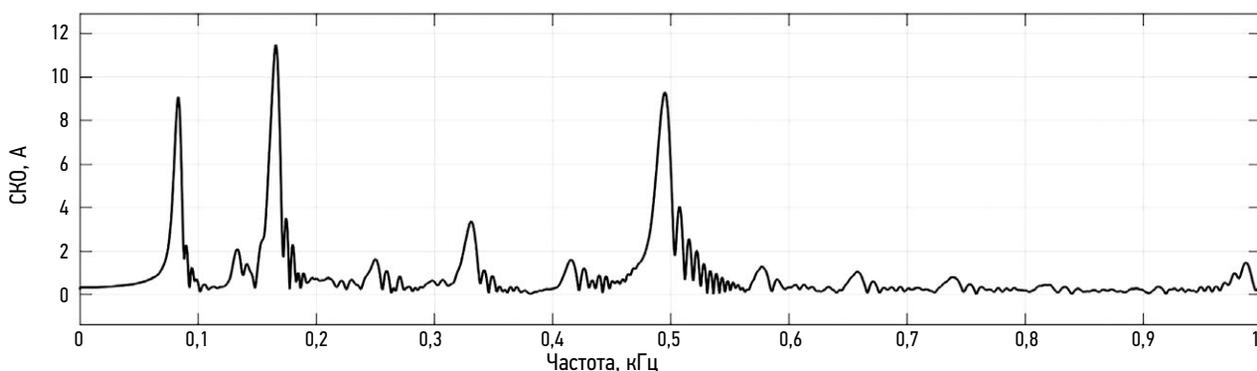


Рис. 8. Линейный спектр вектора суммарного тока исправного электродвигателя ($n = 0$).

Fig. 8. Linear spectrum of a total current vector of the non-fault electric motor ($n = 0$).

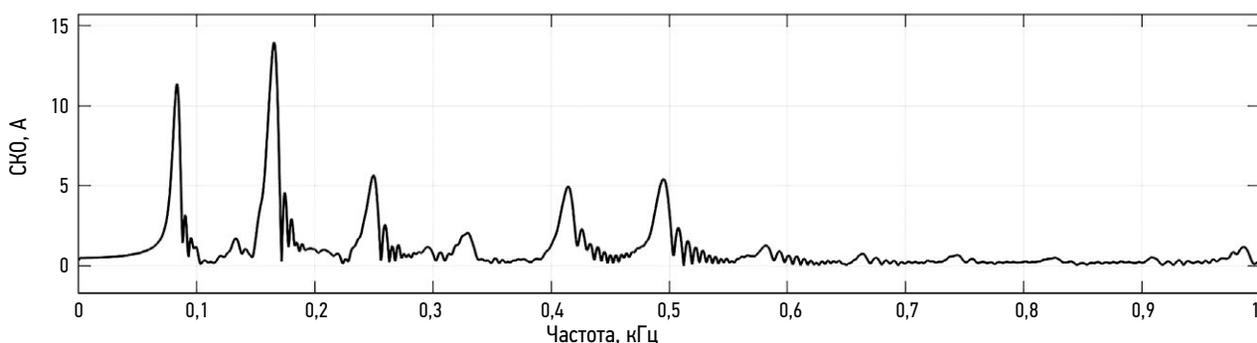


Рис. 9. Линейный спектр вектора суммарного тока электродвигателя с закороченным одним витком фазной обмотки ($n = 1$).

Fig. 9. Linear spectrum of a total current vector of the electric motor with one short-circuit turn of a phase winding ($n = 1$).

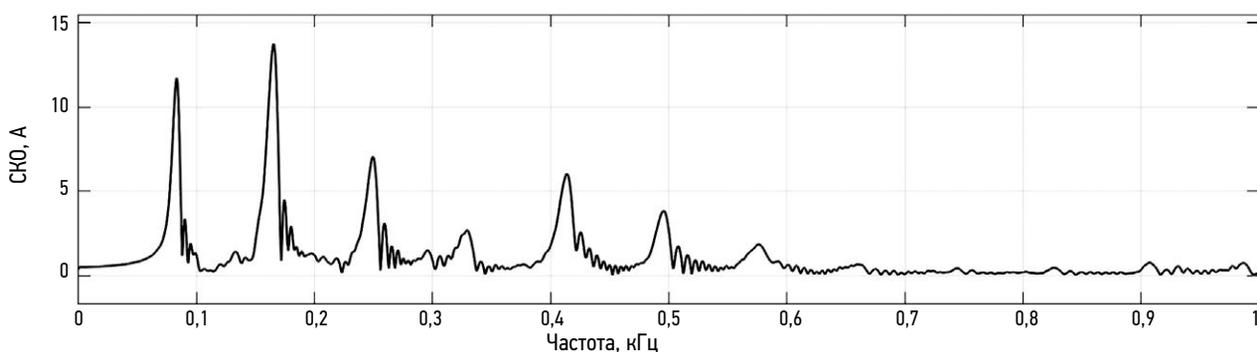


Рис. 10. Линейный спектр вектора суммарного тока электродвигателя с закороченными двумя витками фазной обмотки ($n = 2$).

Fig. 10. Linear spectrum of a total current vector of the electric motor with two short-circuit turns of a phase winding ($n = 2$).

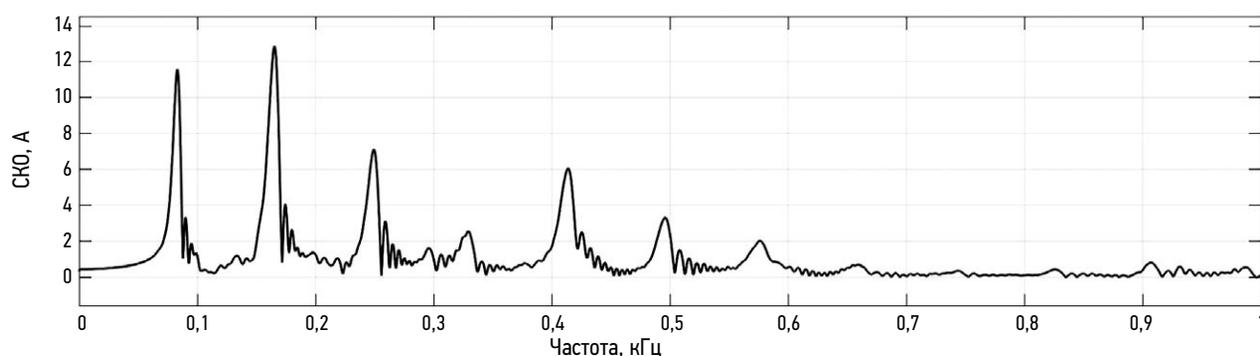


Рис. 11. Линейный спектр вектора суммарного тока электродвигателя с закороченными тремя витками фазной обмотки ($n = 3$).
Fig. 11. Linear spectrum of a total current vector of the electric motor with three short-circuit turns of a phase winding ($n = 3$).

Таблица 2. Пиковые значения спектров (Ампер) суммарного вектора фазных токов для различного числа закороченных витков фазной обмотки электродвигателя

Table 2. Peak spectrum values (in A) of a total phase current vector for various number of short-circuit turns of a phase winding of the electric motor

Число закороченных витков фазной обмотки	Частота, Гц		
	240	415	495
	Среднеквадратическое отклонение, Ампер		
$n = 0$	1,69	1,59	9,20
$n = 1$	5,70	4,90	5,43
$n = 2$	7,10	6,00	3,79
$n = 3$	7,15	6,10	0,50

ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель синхронного электродвигателя с постоянными магнитами с короткозамкнутыми витками фазной обмотки, позволяющая проводить исследование поведения двигателя при различном числе замкнутых витков.
2. Впервые сформулированы требования к диагностическим признакам для бортовой системы диагностики городского рейсового электробуса, позволяющим выявлять межвитковые замыкания в фазовых обмотках тяговых электродвигателей на ранних стадиях зарождения неисправности.
3. Получены основные параметры процесса цифровой регистрации фазных токов, позволяющие проводить измерения и передачу сигналов по бортовой информационной сети электробуса.
4. Методами имитационного моделирования установлено, что пиковые значения линейного спектра суммарного вектора тока являются устойчивыми диагностическими признаками, позволяющим выявлять межвитковые замыкания в фазовых обмотках тяговых электродвигателей на ранних стадиях зарождения неисправности.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. М.М. Жилейкин — разработка алгоритма диагностирования; А.В. Климов — обоснование диагностических признаков; Б.К. Оспанбеков — анализ результатов моделирования; С.С. Смирнов — разработка программной реализации и проведение моделирования.

Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. M.M. Zhileykin — development of a diagnostic algorithm; A.V. Klimov — justification of diagnostic signs; B.K. Ospanbekov — analysis of simulation

results; S.S. Smirnov — development of software implementation and modeling.

All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be

published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонян А.В., Жилейкин М.М., Климов А.В. Обоснование принципов стабилизации движения сочлененного электробуса с задней толкающей секцией // Труды НАМИ. 2022. № 2 (289). С. 89–98. doi: 10.51187/0135-3152-2022-2-89-98
2. Афанасьев Н.А., Юсипов М.А. Система технического обслуживания и ремонта оборудования энергохозяйств промышленных предприятий. (система ТОР ЭО). М.: Энергоатомиздат, 1989.
3. Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. М.: МЭИ, 2015.
4. Абакумов А.М., Тулупов П.В., Чабанов Ю.А. Электрический привод. Часть 2. Электроприводы переменного тока: учеб. пособ. Самара: СамГТУ, 2014.
5. Нго Ф.Л. Расчет индуктивностей синхронного двигателя с инкорпорированными постоянными магнитами // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 2. С. 133–146. doi: 10.21122/1029-7448-2017-60-2-133-146
6. Калачев Ю.Н. SimInTech: моделирование в электроприводе. М.: ДМК Пресс, 2019.
7. Thorsen V., Dalva M. Condition Monitoring Methods, Failure Identification and Analysis for High Voltage Motors in Petrochemical Industry // Proc 8a 1EE Int Conf, EMD'97, University of Cambridge. 1997. Vol. 444, P. 109–113. doi: 10.1049/CP:19971048

8. A. H. Bonnett and G. C. Soukup, "Rotor failures in squirrel cage induction motors," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-22, no. 6, 1986, pp. 1165–1173.
9. Kliman G.B., Stein J. Induction Motor Fault Detection Via Passive Current Monitoring // Current Practices and Trends in Mechanical Failure Prevention Proceedings of the 44th Meeting of the Mechanical Failures Prevention Group Virginia Beach, Virginia April 3-5, 1990. Illinois: Vibration Institute, 1990. P. 13–17.
10. Thomson W.T., Chalmers S.J., Rankin D. On-line Current Monitoring and Fault Diagnosis in High Voltage Induction Motors — Case Histories and Cost Savings in Offshore Installations // Offshore Europe '87, Conf Proc SPE September 1987, Aberdeen. SPE of AIME, 1987. P. SPE16577/1–SPE16577/10.
11. Schoen R.R., Habetler T.G., Kamran F., et al. Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring // IEEE Transactions on Industry Applications. 1995. Vol. 31, N 6. P. 1274–1279. doi: 10.1109/28.475697
12. Thomson W.T., Fenger M. Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults // IEEE Industry Application Magazine. 2001. Vol. 7, N 4. P. 26–34. doi: 10.1109/2943.930988
13. Thomson W.T. A Review of On-Line Condition Monitoring Techniques for Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors — Past Present and Future // IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, Gijon, Spain, Sept. 1999. Gijon: IEEE, 1999. P. 3–18.

REFERENCES

1. Antonyan AV, Zhileikin MM, Klimov AV. Justification of the principles of motion stabilization of an articulated electric bus with a rear pushing section. *Trudy NAMI*. 2022;2(289):89–98. (In Russ). doi: 10.51187/0135-3152-2022-2-89-98
2. Afanasyev NA, Yusipov MA. *System of maintenance and repair of energy equipment of industrial enterprises. (TOR EO system)*. Moscow: Energoatomizdat; 1989. (In Russ).
3. Anuchin AS. *Electric drive control systems: a textbook for universities*. Moscow: MEI; 2015. (In Russ).
4. Abakumov AM, Tulupov PV, Chabanov YuA. *Electric drive. Part 2. AC electric drives: textbook. Allowance*. Samara: SamGTU; 2014. (In Russ).
5. Ngo FL. Calculation of inductances of a synchronous motor with incorporated permanent magnets. *Energetika. Izv. vyssh. ucheb. zavedeniy i energ. obedineniy SNG*. 2017;60(2):133–146. (In Russ). doi: 10.21122/1029-7448-2017-60-2-133-146
6. Kalachev YuN. *SimInTech: simulation in electric drives*. Moscow: DMK Press; 2019. (In Russ).
7. Thorsen V, Dalva M. Condition Monitoring Methods, Failure Identification and Analysis for High Voltage Motors in Petrochemical

- Industry. In: *Proc 8a 1EE Int Conf, EMD'97, University of Cambridge*. 1997;444:109–113. doi: 10.1049/CP:19971048
8. A. H. Bonnett and G. C. Soukup, "Rotor failures in squirrel cage induction motors," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-22, no. 6, 1986, pp. 1165–1173.
9. Kliman GB, Stein J. Induction Motor Fault Detection Via Passive Current Monitoring. In: *Current Practices and Trends in Mechanical Failure Prevention Proceedings of the 44th Meeting of the Mechanical Failures Prevention Group Virginia Beach, Virginia April 3–5, 1990*. Illinois: Vibration Institute; 1990:13–17.
10. Thomson WT, Chalmers SJ, Rankin D. On-line Current Monitoring and Fault Diagnosis in High Voltage Induction Motors — Case Histories and Cost Savings in Offshore Installations. In: *Offshore Europe '87, Conf Proc SPE September 1987, Aberdeen*. Aberdeen: SPE of AIME; 1987:SPE16577/1–SPE16577/10.
11. Schoen RR, Habetler TG, Kamran F, et al. Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1995;31(6):1274–1279. doi: 10.1109/28.475697

12. Thomson WT, Fenger M. Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults. *IEEE Industry Application Magazine*. 2001;7(4):26–34. doi: 10.1109/2943.930988
13. Thomson WT. A Review of On-Line Condition Monitoring Techniques for Three-Phase Squirrel-Cage

Induction Motors — Past Present and Future. In: *IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, Gijon, Spain, Sept. 1999*. Gijon: IEEE; 1999:3–18.

ОБ АВТОРАХ

*** Жилейкин Михаил Михайлович,**

д-р техн. наук,
руководитель группы инженерных расчётов;
адрес: Российская Федерация, 121205, Москва,
Инновационный центр Сколково, Большой бул., д. 62;
ORCID: 0000-0002-8851-959X;
eLibrary SPIN: 6561-3300;
e-mail: ZhileykinMM@kamaz.ru

Климов Александр Владимирович,

канд. техн. наук,
руководитель службы электрифицированных автомобилей;
ORCID: 0000-0002-5351-3622;
eLibrary SPIN: 7637-3104;
e-mail: Aleksandr.Klimov@kamaz.ru

Оспанбеков Бауржан Кенесович,

канд. техн. наук,
заместитель руководителя службы электрифицированных автомобилей;
ORCID: 0000-0003-2756-7907;
eLibrary SPIN: 4857-4073;
e-mail: OspanbekovBK@kamaz.ru

Смирнов Станислав Сергеевич,

инженер-программист 1 категории службы
электрифицированных автомобилей;
ORCID: 0009-0000-9500-0190;
eLibrary SPIN: 5329-9930;
e-mail: Smirnov.SS@kamaz.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

AUTHORS' INFO

*** Mikhail M. Zhileikin,**

Dr. Sci. (Tech.),
Head of the Engineering Analysis Group;
address: 62 Bolshoy boulevard, Skolkovo Innovation Center,
121205 Moscow, Russian Federation;
ORCID: 0000-0002-8851-959X;
eLibrary SPIN: 6561-3300;
e-mail: ZhileykinMM@kamaz.ru

Alexandr V. Klimov,

Cand. Sci. (Tech.),
Head of Electrified Vehicles Service;
ORCID: 0000-0002-5351-3622;
eLibrary SPIN: 7637-3104;
e-mail: Aleksandr.Klimov@kamaz.ru

Baurjan K. Ospanbekov,

Cand. Sci. (Tech.),
Deputy Head of the Electrified Vehicles Service;
ORCID: 0000-0003-2756-7907;
eLibrary SPIN: 4857-4073;
e-mail: OspanbekovBK@kamaz.ru

Stanislav S. Smirnov,

1st Grade Software Engineer of the Electrified Vehicles Service;
ORCID: 0009-0000-9500-0190;
eLibrary SPIN: 5329-9930;
e-mail: Smirnov.SS@kamaz.ru