

Повышение надежности вспомогательных машин электровозов на основе использования данных вибродиагностики

А.В. Лукьянов✉, Е.В. Каимов

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

✉loukian@inbox.ru

Резюме

Статья посвящена актуальному исследованию массива вибрационных параметров вспомогательных машин грузовых электровозов ВЛ-85, полученных при проведении входного вибрационного контроля многоканальной аппаратурой виброизмерительных блоков, разработанной в Иркутском государственном университете путей сообщения. Измерения проводились в ремонтном локомотивном депо «Нижнеудинское» перед входом электровозов на текущий и средний ремонт. Проведена статистическая обработка массива данных более 1 300 виброизмерений мотор-вентиляторов электровозов ВЛ-85. Установлено, что уровень вибрации большинства мотор-вентиляторов существенно превышает предельно допустимый по существующему ГОСТ ИСО–10816-3-2002. Проведено разбиение массива на зоны надежности по виброскорости. Доказано, что плотность распределения вероятности среднеквадратических значений виброскорости и виброускорения подчиняется логнормальному закону. Вычислены параметры этого закона (математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение). Данные анализа показали, что более 50 % мотор-вентиляторов нуждаются в ремонте по существующим нормативам допустимой вибрации. Предложен алгоритм поэтапного уменьшения вибрации и повышения межремонтного пробега мотор-вентиляторов путем временного снижения нормативных требований на допустимую вибрацию, обеспечения равномерной загрузки ремонтного производства и неукоснительного выполнения требования государственного стандарта по допустимому среднеквадратическому значению виброскорости на выходе из ремонта. Повышения качества ремонта можно добиться при более полном использовании возможностей входного и выходного вибрационного контроля подшипников, балансировки ротора, контроля обмоток электродвигателя мотор-вентилятора и его внешнего магнитного поля. Проведено численное моделирование предложенного алгоритма снижения вибрации массива обслуживаемых мотор-вентиляторов при их ремонте за счет повышения его качества с учетом неравномерной скорости износа (повышения вибрации) при эксплуатации мотор-вентиляторов, которая была принята подчиняющейся нормальному закону распределения вероятности. Определено, что степень загрузки ремонтных служб будет переменной, но в допустимых границах. Установлено также, что через три года ремонта по принятому алгоритму математическое ожидание виброскорости уменьшится до нормативного уровня (2,5 мм/с). Количество мотор-вентиляторов с превышением предельно допустимого уровня (4,5 мм/с) будет находиться в пределах 40–45 ед., что обеспечит равномерную загрузку ремонтного производства. Таким образом, результаты численного моделирования предложенного алгоритма снижения вибрации и повышения межремонтного пробега мотор-вентиляторов подтвердили его осуществимость и эффективность.

Ключевые слова

вспомогательные машины электровозов, мотор-вентиляторы, входной и выходной виброконтроль при ремонте, среднеквадратическое значение виброскорости, вибродиагностика, снижение вибрации оборудования электровозов

Для цитирования

Лукьянов А.В. Повышение надежности вспомогательных машин электровозов на основе использования данных вибродиагностики / А.В. Лукьянов, Е.В. Каимов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 2(78).С. 115–126. DOI 10.26731/1813-9108.2023.2(78).115-126.

Информация о статье

поступила в редакцию: 09.06.2023 г.; поступила после рецензирования: 19.06.2023 г.; принята к публикации: 20.06.2023 г.

Improving the reliability of auxiliary machines of electric locomotives based on the use of vibration diagnostics data

A.V. Luk'yanov✉, E.V. Kaimov

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉loukian@inbox.ru

Abstract

The article is devoted to the actual study of the array of vibration parameters of auxiliary machines of freight electric locomotives VL-85, obtained during the input vibration control by multi-channel equipment of vibration measuring units developed at the Irkutsk State Transport University. The measurements were carried out at the repair locomotive depot «Nizhneudinskoe» before the entrance of electric locomotives for current and medium repairs. Statistical processing of the data array of more than 1 300

vibration measurements of motor fans of electric locomotives VL-85 was carried out. It is established that the vibration level of most motor fans significantly exceeds the maximum permissible according to the existing State Standard ISO–10816-3-2002. The array is divided into zones of reliability by vibration velocity. It is proved that the probability distribution density of the root-mean-square values of vibration velocity and vibration acceleration obeys the lognormal law. The parameters of this law (mathematical expectation, standard deviation) are calculated. The analysis data showed that more than 50% of motor fans need repair according to the existing standards of permissible vibration. An algorithm is proposed for step-by-step reduction of vibration and increase in the inter-repair mileage of motor fans by temporarily reducing the regulatory requirements for permissible vibration, ensuring uniform loading of repair production and, at the same time, strict compliance with the requirements of the state standard for the permissible root-mean-square value of vibration velocity at the repair exit. Improving the quality of repairs is possible with a more complete use of the possibilities of input and output vibration control of bearings, balancing of the rotor, control of the windings of the fan electric motor and its external magnetic field. Numerical simulation of the proposed algorithm for reducing the vibration of the array of serviced motor fans during their repair by improving its quality was carried out, taking into account the uneven rate of wear (vibration increase) during operation of motor fans, which was adopted as obeying the normal law of probability distribution. It is determined that the degree of repair services loading will be uneven, but within acceptable limits. It is also established that after three years of repair according to the adopted algorithm, the mathematical expectation of vibration velocity will decrease to a standard level value of 2,5 mm/s. The number of motor fans exceeding the maximum permissible level of 4,5 mm/s will be within 40–45 motor fans, which will ensure uniform loading of repair production. Thus, the results of numerical simulation of the proposed algorithm for reducing vibration and increasing the inter-repair mileage of motor fans confirmed its feasibility and effectiveness.

Keywords

auxiliary machines of electric locomotives, motor fans, input and output vibration monitoring during repair, root-mean-square value of vibration velocity, vibration diagnostics, vibration reduction of electric locomotives equipment

For citation

Luk'yanov A.V., Kaimov E.V. Povyshenie nadezhnosti vspomogatel'nykh mashin elektrovozov na osnove ispol'zovaniya dannykh vibrodiagnostiki [Improving the reliability of auxiliary machines of electric locomotives based on the use of vibration diagnostics data]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 2 (78), pp. 115–126. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.2(78).115-126.

Article Info

Received: June 9, 2022; Revised: June 19, 2023; Accepted: June 20, 2023.

Введение

Вспомогательные машины (ВМ) – мотор-вентиляторы (МВ), мотор-компрессоры (МК) и фазорасщепители (ФР) – обеспечивают работу всего оборудования электровозов и поездов:

– охлаждают тяговые электродвигатели и электрические сборки – МВ;

– являются источником сжатого воздуха для силовых, управляющих цепей и тормозной системы электровозов и поездов – МК.

Диагностирование и прогнозирование технического состояния ВМ электровозов и выявление развивающихся дефектов является важной задачей на железнодорожном транспорте [1]. Ее решение позволит повысить надежность работы машинного оборудования, выявлять и предотвращать развитие дефектов, перейти к обслуживанию и ремонту машин по фактическому состоянию.

ВМ электровозов генерируют значительные вибрации различных форм и частот узлов и деталей ВМ при стоянке и движении электровозов, которые передаются на кузов и раму электровоза, в кабины экипажа, на все электрическое и машинное оборудование.

Вибрационные воздействия стимулируют накопление повреждений в деталях, что приводит к появлению усталостных трещин и разрушениям. Вибрация вызывает постепенное ослабление неподвижных соединений, соударение сопрягаемых поверхностей подвижных соединений. В сложных объектах, обладающих широким набором собственных частот, возможно возбуждение нескольких резонансных режимов при действии полигармонического возмущения. При совпадении частоты вибрации с собственными резонансными частотами элементов электрическихборок возможны обрывы проводов в местах их закрепления, ослабление соединений шин и шунтов, выгорание контактов, возникновение коротких замыканий в электросхемах.

Виброускорения, возникающие при работе машин и механизмов, создают дополнительные динамические нагрузки на детали, увеличивают их износ, снижают ресурс изделий, оказывают опасное физиологическое воздействие на организм человека, приводя к профессиональным заболеваниям. Вибрационные воздействия могут вызвать как досрочный износ, так и

внезапные отказы машин, приборов и аппаратов. По сути, вспомогательные машины вследствие неуравновешенности масс, расцентровки и дефектов подшипников, электрических дефектов являются мощными источниками колебаний, создающими значительный вибрационный фон в электровозах. Причем вибрация, досрочно разрушая оборудование локомотивов, в свою очередь, способствует дальнейшему развитию порождающих вибрацию дефектов. Многолетними исследованиями выявлена прямая связь между уровнем вибрационного фона и снижением межремонтного пробега машин и локомотивов.

Вибродиагностика – метод неразрушающего контроля, основанный на анализе параметров вибрации, создаваемой работающим оборудованием либо обусловленной структурой исследуемого объекта. При измерении виброперемещений контролируются деформация или относительное смещение деталей ВМ, виброскорость является энергетической величиной, определяющей импульсы сил и кинетическую энергию вибрации, виброускорение характеризует динамические силовые нагрузки, разрушающие конструкцию ВМ.

Особое внимание следует уделять входному и выходному виброконтролю ВМ при текущем и среднем ремонте [2–4]. Входной виброконтроль ВМ позволит точно определить объем и содержание ремонта, оценить необходимость замены подшипников, балансировки

центробежного ротора ВМ [5–7]. Выходной виброконтроль ВМ позволяет оценить качество ремонта при замене подшипников, отсутствие расцентровки и механического ослабления в опорах, остаточный дисбаланс. Как показали исследования, до 10–15 % новых подшипников имеют дефекты завода-изготовителя [8].

Большой объем диагностической информации дает контроль и диагностика состояния электродвигателей ВМ путем спектрального анализа потребляемого тока [9–11]. В частности, контроль изоляции асинхронных электродвигателей позволяет своевременно выявлять межвитковые замыкания в обмотке статора [12]. Вихретоковый контроль технического состояния электродвигателя дополняет данные контроля тока в электродвигателях ВМ [13]. Контроль напряженности внешнего магнитного поля асинхронных электродвигателей позволяет своевременно обнаружить обрыв стержней «беличьей клетки», короткие замыкания обмоток, статический и динамический эксцентриситеты ротора [14–17]. Метод акустической диагностики позволяет уточнять данные по качеству изоляции электродвигателей ВМ [18].

Анализ текущего состояния вспомогательных машин на примере отечественного электровоза ВЛ-85

Как было отмечено, одной из разновидностей ВМ в подвижном составе железнодорожного транспорта являются МВ. В основном

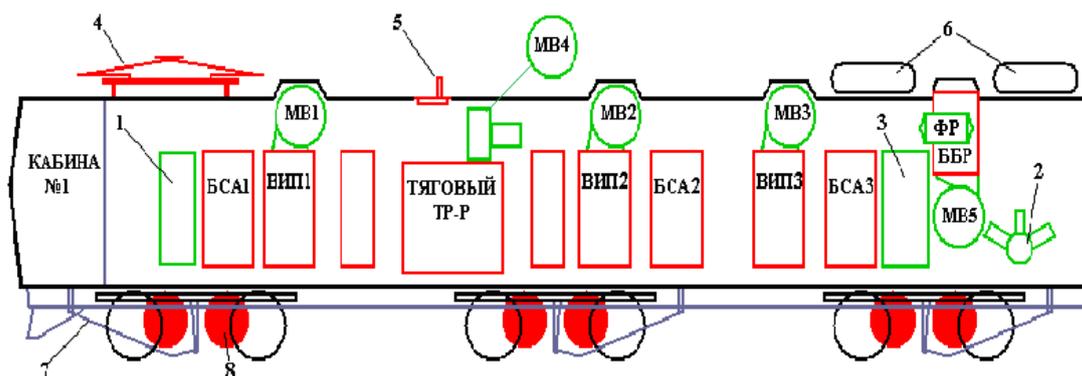


Рис. 1. Расположение оборудования на секции электровоза ВЛ-85:

1 – блок низковольтных аппаратов; 2 – мотор-компрессор; 3 – блок аппаратов вспомогательных машин; 4 – токоприемник; 5 – главный выключатель; 6 – главные резервуары; 7 – наклонная тяга; 8 – тяговый двигатель; ББР – блок балластных резисторов; МВ – мотор-вентиляторы; ФР – фазорасцепитель; ВИП – выпрямительно-инверторный преобразователь; БСА – блок силовых аппаратов

Fig. 1. The location of the equipment on the section of the VL-85 electric locomotive:

1 – block of low-voltage devices; 2 – motor compressor; 3 – block of auxiliary machines; 4 – current collector; 5 – main switch; 6 – main tanks; 7 – inclined thrust; 8 – traction motor; ББР – block of ballast resistors; МВ – motor-fans; ФР – phase splitter; ВИП – rectifier-inverter converter; БСА – power unit

они выполняют функции охлаждения оборудования электровозов. В электровозах ВЛ-85 используются вентиляторы вида ЦВВ 89-15 и Ц8-19 №7,6. Расположение основного оборудования, МВ и других вспомогательных машин секции электровоза ВЛ-85 изображено на рис. 1. График распределения отказов вспомогательных машин электровозов ВЛ-85 в зависимости от межремонтного пробега [4] приведен на рис. 2.

Из графика следует, что большинство отказов МВ наблюдается при сравнительно малых пробегах. До нормативных значений 600 тыс. км пробега между ремонтами дорабатывают всего 20 МВ, т.е. 4 % от парка МВ. Это объясняется высокой вибрацией МВ, превышающей нормативные значения [2, 8] и некачественным ремонтом. Обработка приведенного массива значений по отказам МВ с использованием программы статистической обработки данных «Statistica 10,0» показала экспоненциальное распределение с математическим ожиданием $T_0 = 282,7$ тыс. км и оценкой дисперсии 32,4 тыс. км, т.е. в среднем МВ не дорабатывают и до половины нормативного ресурса.

Целями данной статьи являются анализ показателей вибрации МВ электровоза с применением методов математической статистики и выработка рекомендаций по увеличению межремонтного интервала на основе проведенных исследований.

Выполнение экспериментальных исследований и обсуждение их результатов

Измерение вибрации на подшипниковых опорах МВ проводилось с использованием двухканальных виброизмерительных блоков (ВИБ) – разработки лаборатории технической диагностики Иркутского государственного университета путей сообщения [5]. Вибродатчики ВИБ устанавливаются с использованием магнитов на двух подшипниковых щитах МВ в горизонтальном направлении максимальной вибрации, после чего все МВ секции электровоза включаются в работу на 1 мин. При этом 4–5 аналогичных ВИБ позволяют одновременно снять виброхарактеристики всех МВ секции электровоза при прокрутке их под контактным проводом (рис. 3).

Комплекс входного виброконтроля МВ и разработанная для него программа спектрального анализа «Вибродефект» позволяют решать следующие задачи:

- одновременное измерение вибрации всех МВ секции электровоза в диапазоне 5–5 000 Гц, при этом регистрируются сигналы виброускорения длительностью 5,12 с каждый;
- управление работой ВИБ и всего комплекса осуществляется дистанционно из прохода машинного отсека, что позволяет производить измерения вибрации МВ, находящихся в высоковольтной камере;
- разработанная программа автоматизированной диагностики «Вибродефект» позво-

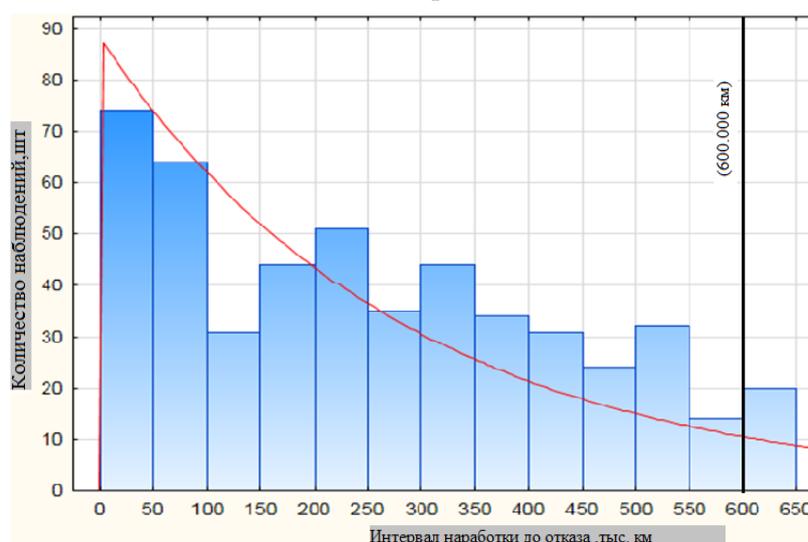


Рис. 2. Распределение отказов вспомогательных машин в зависимости от межремонтного пробега (математическое ожидание $T_0 = 282,7$ тыс. км, оценка дисперсии 32,4 тыс. км)

Fig. 2. Distribution of failures of auxiliary machines depending on the inter-repair mileage (mathematical expectation $T_0 = 282,7$ thousand km, variance estimate 32,4 thousand km)



Рис. 3. Установка двухканального виброизмерительного блока и его датчиков вибрации на МВ2
Fig. 3. Installation of a two-channel vibration measuring unit and its vibration sensors on MV2

База данных значений виброскорости и виброускорения в точках измерений
 на мотор-вентиляторах электровозов (фрагмент)
 Database of vibration velocity and vibration acceleration values at the measurement points
 on the electric locomotive fans motor (fragment)

№ электровоза, № мотор-вентилятора, дата измерения Electric locomotive num- ber, Fan motor no, date of measurement	Среднеквадратичное значение виброскорости, м/с Root-mean-square value of vibration velocity, m/s				Среднеквадратичное значение виброускорения, м/с ² Root-mean-square value of vibration acceleration, m/s ²			
	Секция 1 Section 1		Секция 2 Section 2		Секция 1 Section 1		Секция 2 Section 2	
	Датчик 1 Sensor 1	Датчик 2 Sensor 2	Датчик 1 Sensor 1	Датчик 2 Sensor 2	Датчик 1 Sensor 1	Датчик 2 Sensor 2	Датчик 1 Sensor 1	Датчик 2 Sensor 2
№5; МВ-1 (29.10.2018)	6,3	5,76	6,32	8,24	4,45	5,04	3,18	6,13
№5; МВ-2 (29.12.2018)	2,51	2,83	5,73	5,49	2,43	5,11	13,96	4,35
№5; МВ-3 (29.10.2018)	4,32	11,95	10,49	16,46	7,45	6,13	3,87	6,43
№5; МВ-4 (29.10.2018)	7,21	4,53	5,95	11,94	3,02	4,62	6,46	5,87
№91; МВ-1 (29.10.2018)	2,85	19,74	7,57	4,72	4,78	18,52	5,46	8,68
№91; МВ-2 (29.12.2018)	3,84	9,98	4,08	4,95	4,13	5,8	3,87	7,25
№91; МВ-3 (29.10.2018)	4,74	4,59	8,12	5,28	7,28	5,67	7,47	5,08
№91; МВ-4 (29.10.2018)	3,6	3,06	5,98	6,39	11,02	7,08	5,2	8,95
№210; МВ-1 (29.10.2018)	2,02	4,13	11,61	3,62	8,12	7,47	7,61	10,43

ляет проводить спектральный анализ вибрации всех ВМ за несколько секунд и выявлять дефекты ВМ, приводящие к внеплановым ремонтам и отказам;

– программа «Вибродефект» позволяет проводить более подробный анализ каждого вибросигнала, отображать спектры вибросмещения, виброскорости и виброускорения, определять среднеквадратические значения (СКЗ) виброскорости и виброускорения, значения ПИК-фактора, характеризующего импульсность сигнала [3].

Результаты измерений вибрации и диагностики дефектов всех МВ электровоза с рекомендациями по ремонту выдаются и распечатываются в виде итогового протокола.

Таким образом, при проведении входного виброконтроля определяются:

- необходимость ремонта ВМ (по уровню СКЗ виброскорости);
- виды дефектов (по результатам спектрального анализа), которые делятся на устранимые и неустраняемые без разборки и ремонта ВМ.

К устранимым дефектам относятся: дисбаланс ротора; ослабление крепления ВМ к основанию; несимметрия тока в фазах.

К неустраняемым дефектам без разборки и ремонта ВМ относятся: дефекты подшипников, электрические дефекты ротора и статора.

В результате, при проведении входного виброконтроля в локомотивном депо ст. Нижнеудинск была сформирована база данных виброизмерений МВ электровозов ВЛ-85. На первом этапе обработки данных создана таблица СКЗ виброскорости и виброускорений (табл.) в точках измерений 1 и 2 (подшипниковых опорах) МВ каждого электровоза.

В столбцах таблицы по горизонтали отображаются номера электровозов, МВ и дата измерений, далее номера секций, датчиков (Д1, Д2) и значения СКЗ виброскорости и виброускорения.

Всего в таблицу было занесено 1 333 СКЗ по виброскорости и столько же по виброускорению. Далее построены диаграммы рассеяния данных в координатах X – виброскорости, Y – виброускорения. Были исключены заведомо ложные значения массива, которые существенно (в несколько раз) выделялись из общей выборки. Выбросы появились в процессе сбора данных при неправильной установке датчиков на МВ или в результате сбоя аппаратуры при неправильном ее использовании эксплуатационным персоналом. После удаления недостоверных данных был составлен новый массив

значений, диаграмма рассеяния которых показана в координатах «СКЗ виброскорости – СКЗ виброускорения» (рис. 4).

Крайние точки данной диаграммы не являются ложными, так как их временные сигналы и спектры имеют реальные значения и свидетельствуют о характерных дефектах. В итоге, после исключения ложных значений, получился массив из 1 268 измерений виброскорости и виброускорений, что составляет 95 % от общей выборки.

По всему массиву измерений был проведен анализ математического ожидания (МО), среднеквадратического отклонения (СКО), а также аппроксимация распределений виброскорости и виброускорения математическими функциями с помощью программы обработки статистических данных Statistica.

При проверке параметров распределения математическими функциями установлено, что наиболее точно описывает данную выборку логнормальное распределение СКЗ виброскорости (рис. 5) и виброускорения (рис. 6) с плотностью:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot x \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\lg x - \mu)^2}{2\mu^2}},$$

где μ – параметр масштаба; σ – параметр формы.

Зоны вибрационного состояния по ГОСТ ИСО 10816-3-2002 [2] для машин номинальной мощностью 15–300 кВт (электрических машин

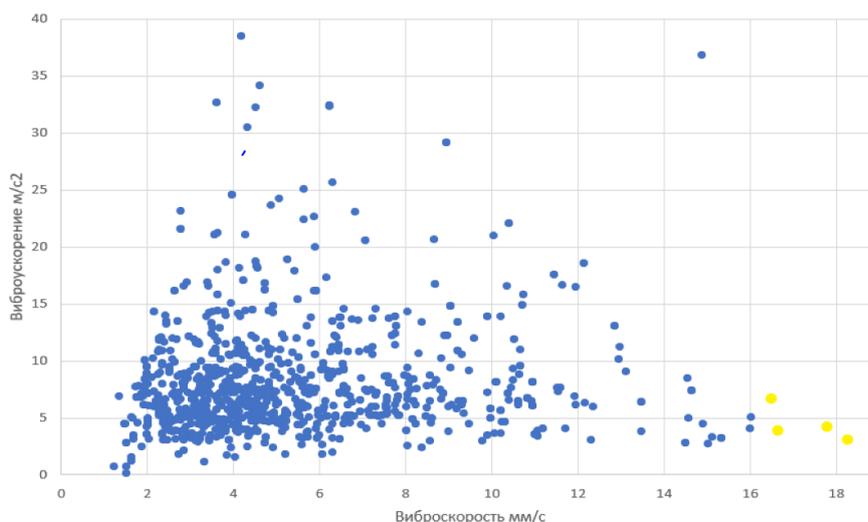


Рис. 4. Уточненная диаграмма рассеяния данных измерений в координатах «среднеквадратичное значение виброскорости – среднеквадратичное значение виброускорения»

Fig. 4. Revised scattering diagram of measurement data in coordinates «root-mean-square value of vibration velocity – root-mean-square value of vibration acceleration»

с высотой оси вращения вала 160–315 мм) (границы зон – СКЗ виброскорости):

– зона А – вибрация новых машин или машин после капитального ремонта (менее 1,4 мм/с);

– зона В («допустимо») – машины пригодные для эксплуатации без ограничения сроков (менее 2,8 мм/с);

– зона С («требует принятия мер») – машины непригодные для длительной непрерывной эксплуатации, такие машины могут функционировать ограниченный период времени до начала ремонтных работ (менее 4,5 мм/с);

– зона D («недопустимо») – уровни вибрации в данной зоне могут вызывать серьезные

повреждения машин (более 4,5 мм/с).

Анализ плотности распределения виброскорости по всему массиву измерений показал следующее:

– доля МВ с допустимой вибрацией (зоны А и В) составляет 21,5 % (273 ед.);

– доля МВ с высокой вибрацией, по которым возможна кратковременная эксплуатация (зона С) – 27,7 % (351 ед.);

– доля МВ с недопустимой вибрацией (зона D) – 50,8 % от всех МВ по которым измерялась вибрация (644 ед.).

В соответствии с ГОСТ ИСО 10816-3-2002 предельно допустимый уровень виброскорости составляет 4,5 мм/с. Это значит, что

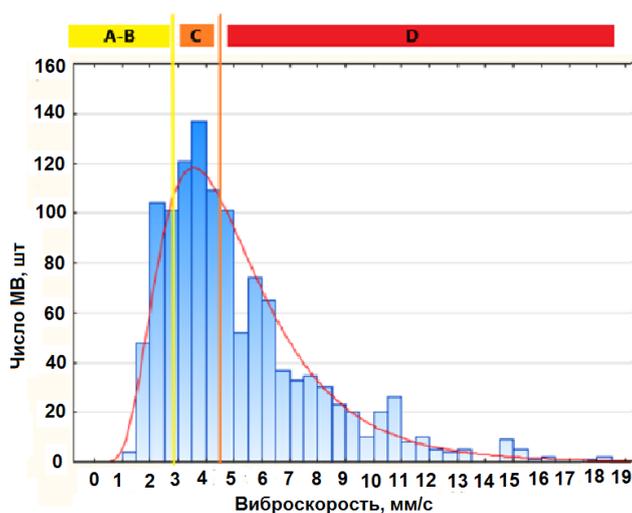


Рис. 5. Логнормальная плотность распределения вероятности виброскорости мотор-вентилятора: математическое ожидание (μ) – 5,2 мм/с; среднеквадратическое отклонение (σ) 2,8 мм/с

Fig. 5. Lognormal density probability distribution of motor-fan vibration velocity: mathematical expectation (μ) – 5,2 mm/s; standard deviation (σ) 2,8 mm/s

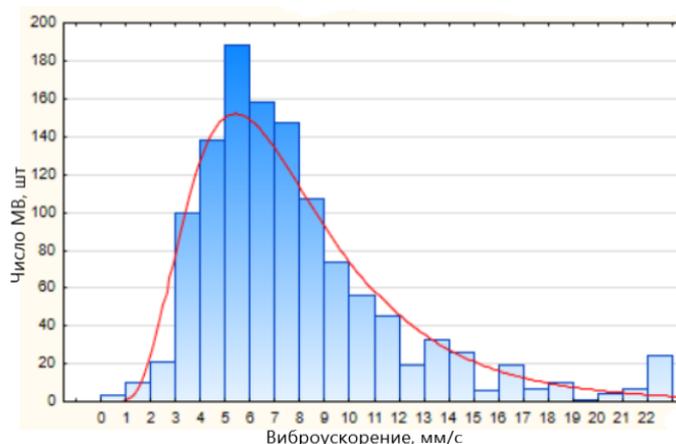


Рис. 6. Плотность распределения вероятности значений виброускорения (логнормальная зависимость): математическое ожидание (μ) – 8,0 м/с²; среднеквадратическое отклонение (σ) – 4,65 м/с²

Fig. 6. Probability distribution density of vibration acceleration values (lognormal dependence): mathematical expectation (μ) – 8,0 m/s²; standard deviation (σ) – 4,65 m/s²

среднее значение виброскорости по всему массиву МВ (МО 5,2 мм/с) превышает предельно допустимое значение.

Таким образом, анализ вибрации МВ и ее сопоставление с существующими нормами показал, что половина МВ непригодны к эксплуатации (т.е. с высокой вероятностью могут выйти из строя в любой момент), четверть МВ могут эксплуатироваться кратковременно (до достижения значений виброскорости 4,5 мм/с и более) и четверть МВ пригодна для длительной эксплуатации. Полученные данные по вибрации подтверждают высокий уровень отказов ВМ (см. рис. 2), которые не дорабатывают и половины нормативного пробега между ремонтами.

С учетом среднеучастковой скорости электровоза, среднего времени нахождения в пути было определено время наработки 600 тыс. км – 6 667 ч непрерывной работы МВ (около 9 мес.). Таким образом, каждый квартал необходимо выводить в ремонт 8,3 % МВ.

Рассмотрим возможный алгоритм повышения надежности и увеличения межремонтного пробега вспомогательных машин электровозов:

1. Так как вывести в ремонт 50,8 % от всего парка МВ невозможно, исходя из потребности вывода в ремонт каждый квартал 8,3 % от всего парка МВ, временно верхние границы зон А–С должны быть увеличены в 2 раза до значений 2,8, 5,6 и 9,0 мм/с соответственно.

2. Необходимо повысить качество ремонта МВ, добиться снижения СКЗ виброскорости на выходе из ремонта не выше нор-

мативной величины 1,4 мм/с (зона А по ГОСТ ИСО 10816-3-2002 [2]).

Добиться последнего возможно путем установки в МВ качественных подшипников, проведения динамической балансировки ротора, ликвидации источников электрических дефектов, таких как несимметрия тока в фазах, обрыв стержней «беличьей клетки» асинхронного электродвигателя МВ, межвитковые замыкания обмоток статора, статический и динамический эксцентриситет. Эти дефекты можно выявить путем спектрального анализа вибрации и диагностики дефектов при входном и выходном виброконтроле, а также путем измерения и контроля электрических параметров МВ [5, 17].

Проведем численное моделирование изменения уровня вибрации (СКЗ виброскорости) при реализации предложенного алгоритма увеличения межремонтного пробега МВ. При этом будут моделироваться два взаимно противоположных процесса:

– понижение нормативных требований по выводу МВ в ремонт по предельному уровню вибрации, а именно – временное увеличение нормы недопустимой СКЗ виброскорости (зона С нормы [2]) до 9 мм/с позволит выводить в ремонт каждый квартал 8,3 % от всего парка МВ с очень высокой вибрацией, обеспечит равномерную загрузку ремонтного производства;

– повышение нормативных требований к качеству ремонта, а именно – обеспечение уровня вибрации на выходе из ремонта (СКЗ виброскорости не должно превышать 1,4 мм/с,

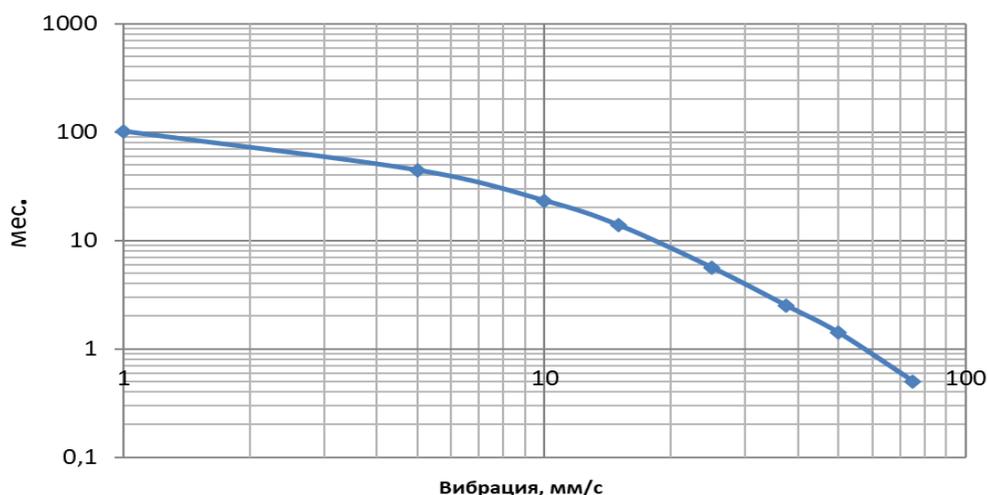


Рис. 7. График зависимости срока службы подшипников от вибрации по статистике CSI в логарифмических координатах

Fig. 7. Dependence graph of bearings service life upon vibration according to CSI statistics in logarithmic coordinates

т.е. допустимой вибрации зоны А по выходу МВ из ремонта) [2].

При моделировании должен быть учтен неравномерный (нелинейный) закон износа МВ, увеличивающийся с повышением вибрации. По данным статистики CSI (США), влияние вибрации на срок службы подшипников машин определяется зависимостью, представленной на рис. 7 [7].

Уровень вибрации значительно и нелинейно влияет на скорость изнашивания и срок остаточного ресурса подшипников (см. рис. 7): от 8 лет (при СКЗ виброскорости 1 мм/с) до 1 недели (при СКЗ виброскорости 75 мм/с).

Для прогноза изменения величины вибрации (а значит и степени износа) МВ примем нормальный закон увеличения СКЗ виброскорости. Увеличение виброскорости МВ, а значит и износа за год возьмем в промежутке 1,2–3,6 мм/с в зависимости от фактической величины вибрации. Соответственно, за месяц это значение будет увеличиваться на 0,3 мм/с для 25 % МВ с максимальной вибрацией; на 0,1 мм/с для 25 % МВ с минимальной вибрацией и на 0,2 мм/с для 50 % остальных МВ (рис. 8).

Плотность распределения СКЗ виброскорости по всему массиву МВ в начальный момент времени изображена на рис. 5. Через три

месяца (квартал) 8,3 % МВ будут отремонтированы и их СКЗ виброскорости уменьшиться до 1,4 мм/с. В то же время СКЗ виброскорости остальных МВ увеличатся в зависимости от уровня текущей вибрации на величину 0,3–0,9 мм/с в соответствии с нормальным законом распределения плотности вероятности.

Численное моделирование изменения вибрации МВ по принятому алгоритму показывает, что плотность распределения СКЗ виброскорости МВ через год будет иметь вид, показанный на рис. 9.

Характеристика распределения изменилась и близка к гамма-распределению: МО (μ) = 5,8 мм/с; СКО (σ) = 3,2 мм/с. МО и дисперсия несколько увеличились. Число МВ с невысокой вибрацией растет, однако уровень средней вибрации основной массы МВ ввиду износа также увеличился.

Численное моделирование (рис. 10) показывает, что после двух лет реализации алгоритма повышения надежности МВ первоначальные логнормальное распределение и гамма-распределение плотности СКЗ виброскорости приблизились к нормальному распределению, которое имеет характерный двухвершинный вид. Справа распределения сосредоточился массив МВ с высокой вибрацией еще не прошедших ре-

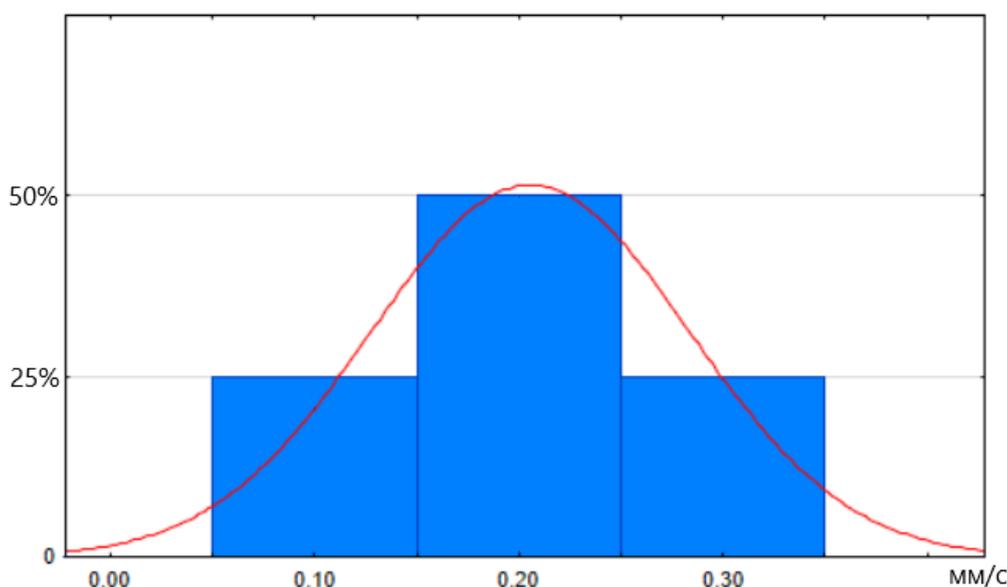


Рис. 8. Плотность распределения вероятности увеличения среднеквадратичного значения виброскорости мотор-вентилятора за месяц в зависимости от текущей величины вибрации (степени износа мотор-вентилятора)

Fig. 8. The density of the probability distribution of an increase in the root-mean-square value of the vibration velocity of the motor fan per month, depending on the current vibration value (the degree of wear of the motor fan)

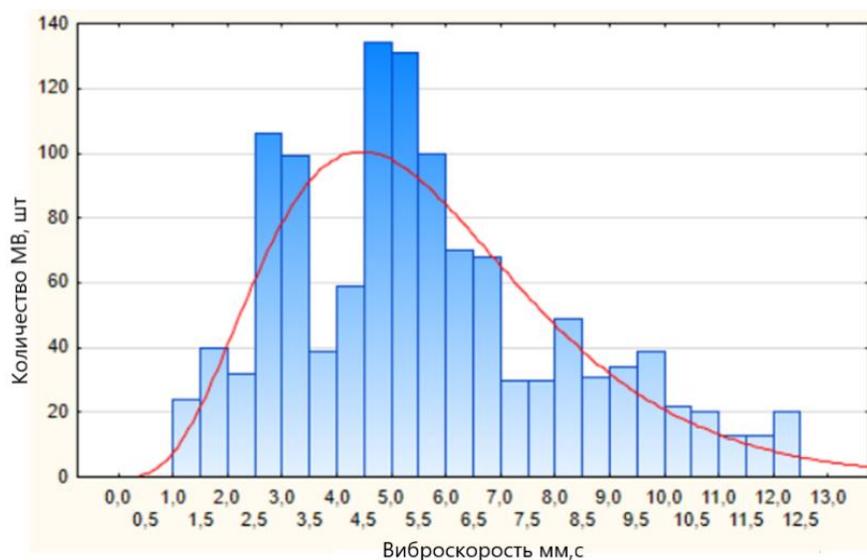


Рис. 9. Плотность распределения среднеквадратичного значения виброскорости парка мотор-вентиляторов через год после реализации алгоритма повышения надежности мотор-вентиляторов
Fig. 9. The distribution density of the root-mean-square value of the vibration velocity of the motor-fan fleet one year after the implementation of the algorithm for improving the reliability of motor-fans

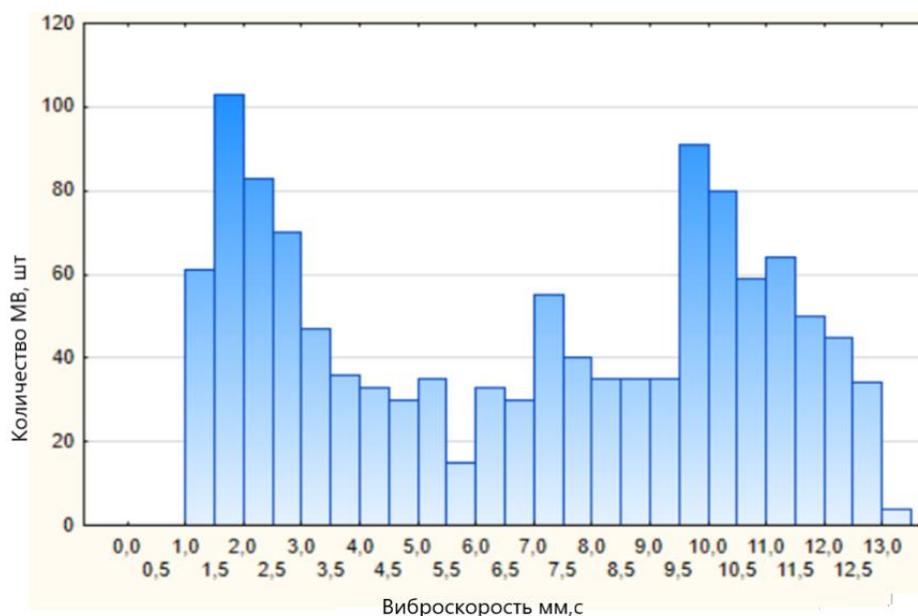


Рис. 10. Плотность распределения среднеквадратичного значения виброскорости парка мотор-вентиляторов через два года после реализации алгоритма повышения надежности мотор-вентиляторов
 (математическое ожидание – 5,8 мм/с, среднеквадратичное отклонение – 3,2 мм/с)
Fig. 10. The distribution density of the root-mean-square value of the vibration velocity of the motor-fan fleet two years after the implementation of the algorithm for improving the reliability of motor fans
 (mathematical expectation – 5,8 mm/s, standard deviation – 3,2 mm/s)

монт, слева – увеличивающийся массив отремонтированных МВ с невысокой вибрацией.

Через три года реализации повышения надежности плотность распределения СКЗ виброскорости приобрела вид, показанный на рис. 11.

Вид распределения близок к гамма-распределению: $MO = 2,5$ мм/с, $СКО = 1,4$ мм/с. Около 40–45 МВ должны выводиться в ремонт ежемесячно. Нормирование вибрации после трех лет реализации данного алгоритма и

далее можно осуществлять в соответствии с ГОСТ ИСО 10816-3-2002 [2].

Заключение

Таким образом, численное моделирование реализации предложенного в данной статье алгоритма снижения вибрации и повышения надежности работы парка МВ электровозов ВЛ-85, приписанных к ремонтному локомотивному депо «Нижеудинское» доказало свою

осуществимость и эффективность. Это приведет к увеличению межремонтных пробегов МВ, уменьшению unplanned ремонтов, равномерной загрузке ремонтных структур и оборудования. Общее снижение средней вибрации МВ снизит динамические нагрузки на все оборудование электровозов и уменьшит негативное воздействие на здоровье машинистов.

Список литературы

1. Коробейников А.Б., Сарваров А.С. Анализ существующих методов диагностирования электродвигателей и перспективы их развития // Электротехнические системы и комплексы. 2015. № 1 (26). С. 4–9.
2. ГОСТ ИСО 10816-3-2002. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Ч. 3. Промышленные машины номинальной мощностью более 15 кВт и номинальной скоростью от 120 до 15 000 мин⁻¹. Введ. 2007–11–01. М. : Стандартинформ, 2007. 14 с.
3. Неразрушающий контроль : справочник. / под ред. В.В. Клюева. Т. 7, кн. 1-2. М. : Машиностроение. 2006. 829 с.
4. Шубов И.Г. Шум и вибрация электрических машин. Л. : Энергоатомиздат, 1986. 208 с.
5. Лукьянов А.В. Проблемы управления техническим состоянием локомотивов по данным неразрушающего контроля и диагностики // Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте : материалы Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участ. Красноярск, 2005. Т. 2. С. 464–472.
6. Русов В.А. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам. Пермь : Вибро-Центр, 2012. 198 с.
7. Ширман А.Р., Соловьёв А.Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. М. : Наука, 1996. 276 с.
8. Лукьянов А.В., Понаморёва Ю.В. Исследование вибрации вспомогательных машин пассажирских электровозов // Молодая наука Сибири. 2020. № 4 (10). С. 248–256. URL: https://mnv.irgups.ru/sites/default/files/articles_pdf_files/ponamoreva_lukyanov.pdf (дата обращения 26.05.2023).
9. Петухов В.С., Соколов В.А. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока // Новости электротехники. 2005. № 1 (31). URL : <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/31/11.php> (Дата обращения 26.05.2023).
10. Барков А.В., Борисов А.А. Современные возможности диагностирования машин с электроприводом по току двигателя // Металлургические процессы и оборудование. 2013. № 1 (31). С. 61–65.
11. Вольдек А.И. Электрические машины. Л. : Энергия, 1978. 832 с.
12. Воробьёв Н.П., Суханкин Г.В., Герцен Н.Т. Методы и приборы диагностирования изоляции асинхронных двигателей // Ползуновский Вестник. 2011. № 2-2. С. 261–269.
13. Бобров В.В., Хомутов С.О. Использование метода вихретокового контроля для определения технического состояния асинхронных электродвигателей // Ползуновский Вестник. 2011. № 2-2. С. 65–71.
14. Сурков Д.В. Электромагнитные способы определения эксцентриситета и несимметрии короткозамкнутой клетки ротора асинхронных двигателей : дис. ... канд. техн. наук. Оренбург, 2008. 126 с.
15. Диагностика и прогнозирование состояния асинхронных двигателей на основе использования параметров их внешнего электромагнитного поля / А.Ю. Алексеенко, О.В. Бродский, В.Н. Веденеев и др. // Вестник Алтай. гос. техн. ун-та им. И.И. Ползунова. 2006. № 2. С. 24–27.
16. Исследование внешнего магнитного поля асинхронного электродвигателя / В.Е. Вавилов, Д.Ю. Пашали, И.Ф. Саяхов и др. // Вестник УГАТУ. 2016. Т. 20. № 1 (71). С. 122–127.
17. 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.
18. Герцен Н.Т. Акустическая диагностика изоляции обмоток асинхронных двигателей в сельскохозяйственном производстве : дис. ... канд. техн. наук. Барнаул, 2007. 152 с.

References

1. Korobeinikov A.B., Sarvarov A.S. Analiz sushchestvuyushchikh metodov diagnostirovaniya elektrodvigateli i perspektivy ikh razvitiya [Analysis of existing methods for diagnosing electric motors and prospects for their development]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrical systems and complexes], 2015, no. 1 (26), pp. 4–9.
2. GOST ISO 10816-3-2002. Vibratsiya. Kontrol' sostoyaniya mashin po rezul'tatam izmerenii vibratsii na nevrashchayushchikhsya chastyakh. Ch. 3. Promyshlennyye mashiny nominal'noi moshchnost'yu bolee 15 kVt i nominal'noi skorost'yu ot 120 do 15 000 min⁻¹ [State Standard ISO 10816-3-2002. Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts - Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15000 r/min when measured in situ]. Moscow: Standartinform Publ., 2007. 14 p.

3. Nerazrushayushchii kontrol': spravochnik v 8 t. T. 7 (v 2-kh knigakh) [Non-destructive testing: handbook in 8 vol. Vol. 7 (in 2 books)]. Ed. by. Klyuev V.V. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2005. 829 p.
4. Shubov I.G. Shum i vibratsiya elektricheskikh mashin [Noise and vibration of electrical machines]. Leningrad: Ehnergoatomizdat Publ., 1986. 208 p.
5. Luk'yanov A.V. Problemy upravleniya tekhnicheskim sostoyaniem lokomotivov po dannym nerazrushayushchego kontrolya i diagnostiki [Problems of managing the technical condition of locomotives according to non-destructive testing and diagnostics]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Resursoberegayushchie tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte»* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation «Resource-saving technologies in railway transport»]. Krasnoyarsk, 2005, vol. 2, pp. 464–472.
6. Rusov V.A. Diagnostika defektov vrashchayushchegosya oborudovaniya po vibratsionnym signalam [Diagnostics of rotating equipment defects by vibration signals]. Perm': Vibro-Tsentr Publ., 2012. 198 p.
7. Shirman A.R., Solov'ev A.B. Prakticheskaya vibrodiagnostika i monitoring sostoyaniya mekhanicheskogo oborudovaniya [Practical vibration diagnostics and monitoring of the state of mechanical equipment]. Moscow: Nauka Publ., 1996. 276 p.
8. Luk'yanov A.V., Ponamoreva Yu.V. Issledovanie vibratsii vspomogatel'nykh mashin passazhirskikh elektrovozov [Investigation of vibration of auxiliary machines of passenger electric locomotives]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2020, no. 4 (10), pp. 248–256.
9. Petukhov V.S., Sokolov V.A. Diagnostika sostoyaniya elektrodvigatelei. Metod spektral'nogo analiza potrebyaemogo toka [Diagnostics of the state of electric motors. The method of spectral analysis of the consumed current]. *Novosti elektrotekhniki* [Bulletins of electrical engineering], 2005, no. 1 (31). Available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/31/11.php> (Accessed May 26, 2023).
10. Barkov A.V., Borisov A.A. Sovremennye vozmozhnosti diagnostirovaniya mashin s elektroprivodom po toku dvigatelya [Modern possibilities of diagnosing machines with electric motor current]. *Metallurgicheskie protsessy i oborudovanie* [Metallurgical processes and equipment], 2013, no. 1 (31), pp. 61–65.
11. Vol'dek A.I. Elektricheskie mashiny [Electric machines]. Leningrad: Energiya Publ., 1978. 832 p.
12. Vorob'ev N.P., Sukhankin G.V., Gertsen N.T. Metody i pribory diagnostirovaniya izolyatsii asinkhronnykh dvigatelei [Methods and devices for diagnosing isolation of asynchronous motors]. *Polzunovskii Vestnik* [Bulletin's Polzunov I.I.], 2011, no. 2-2, pp. 261–269.
13. Bobrov V.V., Khomutov S.O. Ispol'zovanie metoda vikhretokovogo kontrolya dlya opredeleniya tekhnicheskogo sostoyaniya asinkhronnykh elektrodvigatelei [Using the eddy current control method to determine the technical condition of asynchronous electric motors]. *Polzunovskii Vestnik* [Bulletin's Polzunov I.I.], 2011, no. 2-2, pp. 65–71.
14. Surkov D.V. Elektromagnitnye sposoby opredeleniya ekscentrisiteta i nesimmetrii korotkozamknutoi kletki rotora asinkhronnykh dvigatelei [Electromagnetic methods for determining the eccentricity and asymmetry of a short-circuited rotor cage of asynchronous motors]. Ph.D.'s thesis. Orenburg, 2008, 126 p.
15. Alekseenko A.Yu., Brodskii O.V., Vedeneev V.N., Tonkikh V.G., Khomutov S.O. Diagnostika i prognozirovaniye sostoyaniya asinkhronnykh dvigatelei na osnove ispol'zovaniya parametrov ikh vneshnego elektromagnitnogo polya [Diagnostics and prediction of the state of asynchronous motors based on the use of parameters of their external electro-magnetic field]. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. I.I. Polzunova* [Bulletin of the Altai State Technical University named after I.I. Polzunov], 2006, no. 2, pp. 24–27.
16. Vavilov V.E., Pashali D.Yu., Sayakhov I.F., Aiguzina V.V. Issledovanie vneshnego magnitnogo polya asinkhronnogo elektrodvigateleya [Investigation of the external magnetic field of an asynchronous electric motor]. *Vestnik UGATU* [Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University], 2016, vol. 20, no. 1 (71), pp. 122–127.
17. Luk'yanov A.V., Mukhachev Yu.S., Bel'skii I.O. Issledovanie kompleksa parametrov vibratsii i vneshnego magnitnogo polya v zadachakh diagnostiki asinkhronnykh elektrodvigatelei [Investigation of the complex parameters of vibration 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.
18. Gertsen N.T. Akusticheskaya diagnostika izolyatsii obmotok asinkhronnykh dvigatelei v sel'skokhozyaistvennom proizvodstve [Acoustic diagnostics of insulation of windings of asynchronous motors in agricultural production]. Ph.D.'s thesis. Barnaul, 2007. 152 p.

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.
Каимов Евгений Витальевич, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства железных дорог, мостов и тоннелей, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: Eugen-Kaimov@yandex.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.
Evgenii V. Kaimov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Building Railways, Bridges and Tunnels, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: Eugen-Kaimov@yandex.ru.