

## Исследование распределения вибрации и дефектов вспомогательных машин электровозов

А.В. Лукьянов<sup>1</sup>✉, А.Ю. Перелыгина<sup>2</sup>, Е.В. Каимов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

✉loukian@inbox.ru

### Резюме

Статья посвящена исследованию вибрации с использованием разработанной в лаборатории технической диагностики Иркутского государственного университета путей сообщения аппаратуры дистанционного измерения вибропараметров с последующей их автоматизированной обработкой и выдачей протоколов вибродиагностики вспомогательных машин грузовых электровозов ВЛ-85 и пассажирских электровозов ЭП-1. Измерения проводились в локомотивных депо «Нижнеудинское» и «Иркутское» перед входом электровозов на текущий и средний ремонт. Обозначенная аппаратура выполнена в виде виброизмерительных блоков с одним или двумя вибродатчиками, установленными на подшипниковых опорах вспомогательных машин, в частности мотор-вентиляторах электровозов. Большое внимание уделено статистической обработке полученного массива виброданных с целью минимизации количества необходимых вибродатчиков, располагаемых только в точках с максимальной вибрацией. Проведенный статистический анализ позволил сократить число датчиков виброизмерительных блоков на каждой вспомогательной машине. Вместо рекомендуемых четырех-пяти датчиков предложено использовать два или даже один датчик, адекватно характеризующий вибрацию вспомогательной машины. Это позволило создать комплект виброизмерительных блоков оптимальной конфигурации – четыре-пять виброизмерительных блока на секцию электровоза (т.е. по количеству вспомогательных машин в секции). Одновременно регистрируя вибрацию всех вспомогательных машин секции электровоза, можно за короткое время собрать весь массив необходимой информации о их вибрации перед заходом электровоза на ремонт. Автоматизированный анализ вибрации и вибродиагностика дефектов с помощью специально разработанной программы «Вибродефект» позволяет осуществлять ремонт вспомогательных машин с учетом фактического состояния.

### Ключевые слова

вспомогательные машины электровозов, мотор-вентиляторы, входной виброконтроль, среднееквадратическое значение виброускорения и виброскорости, снижение вибрации оборудования электровозов, автоматизированная вибродиагностика, ремонт машин

### Для цитирования

Лукьянов А.В. Исследование распределения вибрации и дефектов вспомогательных машин электровозов / А.В. Лукьянов, А.Ю. Перелыгина, Е.В. Каимов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 4(80). С. 159–173. DOI 10.26731/1813-9108.2023.4(80).159-173.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 08.12.2023 г.; поступила после рецензирования: 12.12.2023 г.; принята к публикации: 14.12.2023 г.

## Research of vibration distribution and defects of auxiliary machines in electric locomotives

A.V. Luk'yanov<sup>1</sup>✉, A.Yu. Perelygina<sup>2</sup>, E.V. Kaimov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

<sup>2</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

✉loukian@inbox.ru

### Abstract

The article is devoted to the study of vibration using the equipment for remote measurement of vibration parameters developed in the laboratory of technical diagnostics of the Irkutsk State Transport University, followed by their automated processing and the issuance of vibration diagnostics protocols for auxiliary machines of VL-85 freight electric locomotives and EP-1 passenger electric locomotives. Measurements were carried out at the «Nizhneudinsk» and «Irkutsk» locomotive depots previous to the entrance of electric locomotives for current and medium repairs. Vibration measuring equipment was made in the form of vibration measuring units with one or two vibration sensors mounted on the bearing supports of auxiliary machines, in particular, electric locomotive fan motors. Much attention is paid to the statistical processing of the received array of vibration data in order to minimize the number of necessary vibration sensors installed only at points with maximum vibration. The statistical analysis made it possible to reduce the number of vibration measuring unit sensors on each auxiliary machine. Instead of the recommended four or five sensors on each auxiliary

machine, it is proposed to reduce their number to two or even one sensor that adequately characterizes the vibration of the auxiliary machine. This made it possible to create a set of vibration measuring units of optimal configuration – four to five vibration measuring units per section of an electric locomotive (i.e., according to the number of auxiliary machines in the section). By simultaneously registering the vibration of all auxiliary machines of an electric locomotive section, it is possible to collect within a short period of time the entire array of necessary information about the vibration of all auxiliary machines of an electric locomotive before it goes into repair. Automated vibration analysis and vibration diagnostics of defects using a specially developed program «Vibration defect» makes it possible to repair auxiliary machines taking into account their actual condition.

### Keywords

auxiliary machines of electric locomotives, fan motors, input vibration control, RMS value of vibration acceleration and vibration velocity, vibration reduction of electric locomotive equipment, automated vibration diagnostics, tire repair

### For citation

Luk'yanov A.V., Perelygina A.Yu., Kaimov E.V. Issledovanie raspredeleniya vibratsii i defektov vspomogatel'nykh mashin elektrovozov [Research of vibration distribution and defects of auxiliary machines in electric locomotives]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 4(80), pp. 159–173. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.4(80).159-173.

### Article info

Received: December 8, 2023; Revised: December 12, 2023; Accepted: December 14, 2023.

### Введение

К вспомогательным машинам (ВМ) электровозов с асинхронным электроприводом относятся мотор-компрессоры (МК), фазорасщепители и мотор-вентиляторы (МВ). МВ охлаждают силовое электрическое оборудование, в частности тяговые электродвигатели, тормозные реостаты, выпрямительно-инверторные преобразователи, т.е. оборудование силовой электрической цепи. Другие ВМ создают запасы сжатого воздуха для тормозной системы и преобразуют однофазный ток в трехфазный.

Одними из главных задач на железнодорожном транспорте являются повышение надежности и увеличение межремонтного пробега электровозов за счет своевременной и достоверной диагностики технического состояния оборудования и его качественного технического обслуживания и ремонта при одновременном снижении затрат на эти мероприятия. Основными контролируемыми элементами ВМ по параметрам вибрации являются асинхронные электродвигатели с необходимостью быстрой и достоверной диагностики развивающихся дефектов.

На ВМ электровозов действует силовое инерционное возмущение от дисбалансов вращающихся масс, кинематическое возмущение от движения основания, от соседних работающих МВ, МК [1]. Исследования показывают, что электрические дефекты асинхронного электропривода ВМ, такие как обрыв стержней ротора асинхронного электродвигателя, статический и динамический эксцентриситеты, несим-

метрия тока в фазах, также являются источником повышенных вибраций и вносят вклад до 20–30 % в общий вибрационный фон электровозов [2–6].

Расположение мотор-вентиляторов на секции электровоза ВЛ-85 показано на рис. 1.

Вибрации в широких диапазонах частот приводят к накоплению микрповреждений в деталях, что вызывает появление усталостных трещин и разрушений, пластических деформаций в ответственных деталях [7, 8]. Снижение трения при вибрации приводит к уменьшению практически до нуля предварительных натяжений в болтовых и винтовых соединениях [9]. Вибрации ускоряют износ, причины и следствия высокой вибрации усиливают друг друга, в результате чего приближается полный выход машины из строя [10–12]. Практический опыт показывает, что вибрационный метод контроля технического состояния машинного оборудования является одним из наиболее информативных [13–15]. Любой дефект какого-либо узла, который подвергается механическому воздействию со стороны движущихся частей, характеризуется индивидуальным вибросигналом (смещения, скорости или ускорения) и спектром [5, 7, 8].

Целью данной статьи является исследование вибрационных характеристик ВМ электровозов с использованием разработанных виброизмерительных блоков и программы автоматической обработки данных и диагностики развивающихся дефектов для последующего плани-

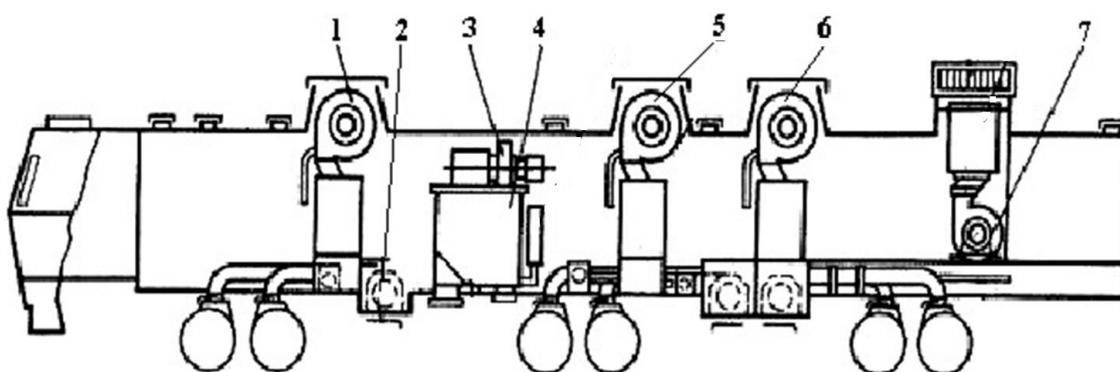


Рис. 1. Система вентиляции электровоза ВЛ-85:

1 – МВ1; 2 – сглаживающий реактор; 3 – МВ4; 4 – трансформатор; 5 – МВ2; 6 – МВ3; 7 – МВ5

Fig. 1. Ventilation system of electric locomotive VL-85:

1 – AM1; 2 – smoothing reactor; 3 – AM4; 4 – transformer; 5 – AM2; 6 – AM3; 7 – AM5  
(AM – auxiliary machine)

рования объемов ремонтных работ с учетом фактического состояния ВМ.

### Виброизмерительный блок с двумя датчиками

В рамках исследования вибрации МВ были проведены измерения пространственного распределения вибрации на мотор-вентиляторах электровозов ВЛ-85 и ЭП-1 ВСЖД с использованием восьмиканальной виброаппаратуры STD-2160 (рис. 2).

Датчики вибрации устанавливались на подшипниковых опорах (точки 1в, 1г, 2в, 2г, 3о, 4г) в вертикальном, горизонтальном, осевом и тангенциальном направлениях. Одновременно измерения вибрации проводились на основании МВ (5в, 5г). Проведенные измерения (более десяти) вибрации на каждом из четырех МВ электровозов ВЛ-85 и ЭП-1 показали, что максимальная вибрация возникает на подшипниковых опорах электродвигателей в горизонтальном и вертикальном направлениях.

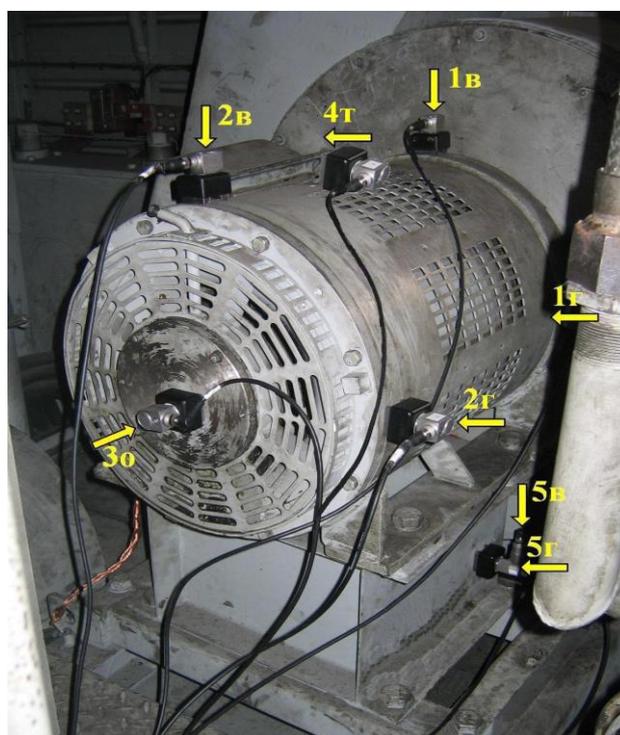


Рис. 2. Точки измерения вибрации на МВ-4 электровоза ЭП-1

Fig. 2. Vibration measurement points on FM-4 of the EP-1 electric locomotive (FM – fan motor)

Данные статистической обработки измерений виброскорости на каждом из четырех МВ электровозов ВЛ-85 показали, что коэффициенты корреляции  $R$  между показаниями датчиков в вертикальном (1в) и горизонтальном (1г) направлениях на передней опоре МВ у центробежного колеса составляют  $R = 0,85$  и, соответственно, между датчиками (2в) и (2г) на задней опоре –  $R = 0,82$ , т.е. связь между показаниями датчиков вибрации в горизонтальном и вертикальном направлениях достаточно высока (см. рис. 2). Это позволило сократить до двух количество датчиков (д1, д2) виброизмерительных блоков (ВИБ) беспроводного многоканального комплекса входного виброконтроля МВ (рис. 3), разработанного в лаборатории технической диагностики Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС) [16, 17]. Для регистрации вибрации на каждой опоре (подшипнике) МВ датчик (пьезоакселерометр) устанавливается в горизонтальном или вертикальном направлении.

### Комплекс двухканальных виброизмерительных блоков

Комплекс входного виброконтроля, состоящий из четырех-пяти ВИБ, позволяет одновременно производить измерение вибрации на всех МВ одной секции электровоза при их кратко-

временной работе (не более 1 мин.) под контактной сетью. Управление работой всех ВИБ осуществляется дистанционно из прохода машинного отделения, что позволяет производить измерения вибрации МВ, находящихся в высоковольтной зоне. С целью исключения высокочастотных электромагнитных наводок и воздействия высокого напряжения ВИБ выполнены в помехозащищенном исполнении, имеют автономное питание и дистанционное управление. Одновременно уменьшено количество подключаемых к аппаратуре и датчикам проводов.

Данные о вибрации вспомогательных машин при входе электровоза на ремонт после измерений с использованием ВИБ направляются в базу данных разработанной программы виброанализа и автоматизированной диагностики дефектов ВМ «Вибродефект» [18], которая определяет уровень вибрации (среднеквадратическое значение (СКЗ) виброскорости) на подшипниковых опорах ВМ и сравнивает его с нормативным значением; диагностирует виды развивающихся дефектов при высокой вибрации; формирует протокол виброизмерений с рекомендациями по ремонту на основе данных вибродиагностики. Общий вид данного протокола приведен в табл. 1.

В протоколе вибродиагностики МВ при входном контроле приведены данные о СКЗ

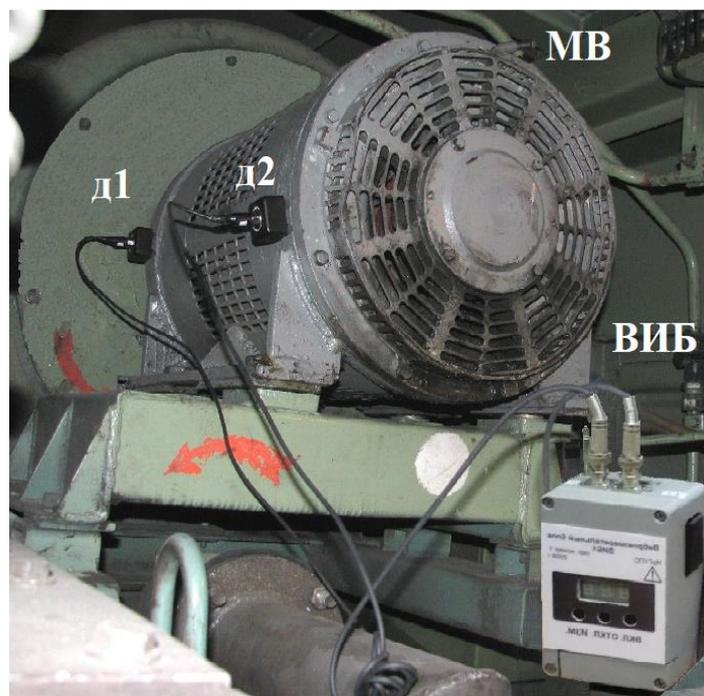


Рис. 3. Установка датчиков виброизмерительного блока на МВ-2 электровоза ВЛ-85  
Fig. 3. Installation of vibration measuring unit sensors on FM-2 of the VL85 electric locomotive

виброскорости всех мотор-вентиляторов (до 5 МВ) двух секций электровозов. Данные виброскорости приведены для радиального подшипника д1 и радиально-упорного подшипника д2 (табл. 1). Ниже производится сравнение СКЗ виброскорости с нормативным значением [19], по результатам которой формируется оценка технического состояния: «допустимо», «требуется принятия мер», «недопустимо» (табл. 1). В строке протокола «диагностика дефектов» приводится до трех дефектов, внесших в процентном отношении наибольший вклад в общий уровень вибрации. Если дефект внес более 50 % вклада в общий уровень вибрации, то отображается только этот дефект (табл. 1). В

строке протокола «рекомендации по ремонту» дается заключение: «балансировка» (при дисбалансе ротора), «ремонт» (в случае дефектов подшипников) или «электрический дефект» в случае общего заключения об уровне вибрации «недопустимо» или «требуется принятия мер». В строках с показаниями СКЗ виброскорости звездочками маркируются показания в случае дополнительного высокого значения СКЗ виброускорения или высокого ПИК-фактора, характерных при значительном износе подшипников, тем самым реализуется технология обслуживания и ремонта ВМ по фактическому состоянию.

**Таблица 1.** Протокол вибродиагностики мотор-вентиляторов электровоза при входном контроле перед ремонтом

**Table 1.** Protocol for vibration diagnostics of electric locomotive fan motors during incoming inspection before repair

ПРОТОКОЛ от «день. месяц. год» вибродиагностики мотор-вентиляторов при входном контроле электровоза № PROTOCOL from «day. month. year» vibration diagnostics of motor fans during incoming inspection of electric locomotive No.										
Датчики и показатели Sensors and indicators	Секция 1 Section 1					Секция 2 Section 2				
	МВ-1	МВ-2	МВ-3	МВ-4	МВ-5	МВ-1	МВ-2	МВ-3	МВ-4	МВ-5
Датчик 1 среднеквадратическое значение скорости (радиальный подшипник), мм/с Sensor 1 RMS speed (radial bearing), mm/s	6,30	4,84	2,28	4,11	–	2,76	12,97**	4,09	4,06**	–
Датчик 2 среднеквадратическое значение скорости (радиально-упорный подшипник), мм/с Sensor 2 RMS speed (angular contact bearing), mm/s	4,45	9,42	2,64	6,22*	–	4,04	11,22**	5,92	11,74	–

Оценка технического состояния: допустимо – до 2,8 мм/с; требуется принятие мер – 2,8–4,5 мм/с; недопустимо – более 4,5 мм/с Technical condition assessment: acceptable – up to 2,8 mm/s; measures are required – 2.8–4.5 mm/s; unacceptable – more than 4,5 mm/s	Недопустимо Unacceptable	Недопустимо Unacceptable	Допустимо Acceptable	Недопустимо Unacceptable	–	Требуется принятие мер Action is required	Недопустимо Unacceptable	Недопустимо Unacceptable	Недопустимо Unacceptable	–
Диагностика дефектов, % Defect diagnostics, %	Ослабление Attenuation 39,2 Расцентровка Misalignment 25,2 Дисбаланс Imbalance 18,2	Дисбаланс Imbalance 58,7	–	Ослабление Attenuation 24,3 Дефект внутреннего кольца Inner ring defect 12,3 Дефект наружного кольца Outer ring defect 12,1	–	Дисбаланс imbalance 52,8 Расцентровка Misalignment 10,8	Повреждение стержней ротора Damage to rotor rods 31,8 Дисбаланс Imbalance 31,3 Ослабление Attenuation 15,8	Ослабление Attenuation 29,1 Дисбаланс Imbalance 24 Расцентровка Misalignment 17	Дефект сепаратора Separator defect 24,1 Дефект внутреннего кольца Inner ring defect 19,1 Дисбаланс Imbalance 13,7	–
Рекомендации по ремонту	Ремонт Repair	Балансировать Balancing	–	Ремонт Repair	–	–	Ремонт Repair	Ремонт Repair	Ремонт Repair	–

**Примечание:**

\* высокое виброускорение, вероятен дефект подшипника; \*\* высокий ПИК-фактор, износ подшипника  
Note:

\* high vibration acceleration, possible bearing defect; \*\* high PIC factor, bearing wear

### Анализ массива виброданных мотор-вентиляторов

С использованием данного многоканального комплекса в 2009–2013 гг. проведены измерения и сформированы базы данных вибрации МВ как основных типов вспомогательных машин электровозов ЭП-1 и ВЛ-85 в локомотивных депо «Иркутское» и «Нижеудинское». Базы данных (БД) виброизмерений МВ содержат более 1 100 сигналов виброскорости грузовых электровозов ВЛ-85 и около 200 сигналов виброскорости электровозов ЭП-1.

Проведенная статистическая обработка БД с использованием программы Statistica позволила выявить ряд следующих закономерностей. Для МВ электровозов ВЛ-85 оценка математического ожидания (МО) СКЗ виброскорости составила  $\mu = 5,2$  мм/с; оценка средне-

квадратического отклонения (СКО) СКЗ виброскорости –  $\sigma = 2,8$  мм/с (при предельно допустимом СКЗ виброскорости 4,5 мм/с в соответствии с нормами вибрации [19]), т.е. более чем у половины обследованных МВ электровозов виброскорость оказалась выше предельно допустимой. Оценка МО значений СКЗ виброускорения составила  $\mu = 8,0$  м/с<sup>2</sup>, СКО СКЗ виброускорения –  $\sigma = 4,65$  м/с<sup>2</sup>. Вибрация, воздействующая на МВ электровозов ВЛ-85, очень высока и значительно сокращает фактический межремонтный пробег машин и приводит к внеплановым, преждевременным ремонтам [20]. Виброускорение, характеризующее силовое, динамическое воздействие, близко в среднем к 1g, а энергетическая составляющая вибрации (СКЗ виброскорости) в среднем значительно превышает норму.

Для МВ электровозов ЭП-1 математическое ожидание значений СКЗ виброскорости составило  $\mu = 2,53$  мм/с, СКО СКЗ виброскорости –  $\sigma = 1,23$  мм/с. Математическое ожидание СКЗ виброускорения составило  $\mu = 5,48$  м/с<sup>2</sup>, СКО СКЗ виброускорения –  $\sigma = 3,19$  м/с<sup>2</sup>. Таким образом, вибрационное состояние МВ электровозов ЭП-1 в среднем менее напряженное, чем у электровозов ВЛ-85.

### Корреляция показаний двух датчиков

Исследования с помощью программы Statistica коэффициентов корреляции СКЗ виброскорости и СКЗ виброускорения между датчиком д1 (у центробежного колеса) и датчиком д2 (с другой стороны МВ) по всему массиву 1 100 измерений вибрации МВ электровозов ВЛ-85 показали следующие результаты (табл. 2).

Взаимосвязь показаний датчиков д1 и д2 по виброскорости соответствует качественным характеристикам связи «высокая» (для МВ1 и МВ2), «очень высокая» (МВ3) и «заметная» (МВ4). Коэффициенты корреляции показаний тех же датчиков вибрации по СКЗ виброускорения имеют меньшие значения качественной характеристики силы взаимосвязи и соответствуют оценке «заметная».

Объясняется это тем, что виброскорость по конструкции МВ распространяется на большие расстояния, так как она регистрируется в диапазонах сравнительно низких и средних частот 10–1 000 Гц в которых весьма значительно проявляются такие дефекты всей конструкции мотор-вентиляторов, как дисбаланс ротора (из-за шпоночного соединения центробежного колеса на валу ротора электродвигателя), расцентровка подшипниковых опор, несимметрия тока в трехфазной обмотке статора, механические ослабления в подвижном соединении (посадке)

ротора и статора МВ. Высокочастотная вибрация, регистрируемая в виде сигналов виброускорения в диапазоне 10–5 000 Гц от дефектов подшипников качения, лопастных частот центробежного колеса, статического и динамического эксцентриситета ротора, распространяется на сравнительно небольшие расстояния и фиксируется только датчиками в районе передней и задней опор электродвигателя.

### Взаимная корреляция датчиков

С помощью программы Statistica проведен также множественный регрессионный анализ взаимосвязи вибрации на датчиках д1 или д2 на каждом из четырех МВ с показаниями аналогичных датчиков на остальных трех МВ. В основном это взаимовлияние не обнаружено или это взаимовлияние было слабым.

В частности, некоторая заметная взаимосвязь существует только между показаниями виброскорости (низкочастотный диапазон 10–1 000 Гц) датчиков № 2, установленных на задних опорах электродвигателей МВ-2 и МВ-4; показаниями виброускорения (высокочастотный диапазон 10–5 000 Гц) тех же датчиков на МВ-2 и МВ-3, МВ-2 и МВ-4 соответственно, находящихся на электровозах ВЛ-85 попарно близко друг к другу (см. рис. 1). Между парой МВ-3 и МВ-4 взаимосвязь показаний виброускорения более слабая (умеренная), так как они находятся на большом удалении друг от друга. При этом вибрация между ВИБ передается через опоры и балки основания (табл. 3).

### Одноканальный виброизмерительный блок

С учетом проведенных статистических исследований в лаборатории технической диагностики ИрГУПС был разработан одноканальный ВИБ, выполненный по беспроводной тех-

**Таблица 2.** Величины коэффициентов корреляции среднеквадратических значений виброскорости и виброускорения мотор-вентиляторов

**Table 2.** The values of the correlation coefficients of the RMS values of vibration velocity and vibration acceleration of motor fans

№ мотор-вентилятора Number of fan motor	Коэффициент корреляции $R_c$ среднеквадратического значения виброскорости мотор-вентилятора Correlation coefficient $R_c$ RMS value vibration speed of the fan motor	Коэффициент корреляции $R_y$ среднеквадратического значения виброускорения мотор-вентилятора Correlation coefficient $R_y$ RMS value vibration acceleration of the fan motor
1	0,73	0,53
2	0,79	0,56
3	0,93	0,69
4	0,52	0,66

**Таблица 3.** Результаты множественного регрессионного анализа взаимосвязи показаний датчиков виброизмерительных блоков, установленных на МВ-2–МВ-4**Table 3.** Results of multiple regression analysis of the relationship between sensor readings of vibration measuring units installed on MV-2–MV-4

Вид сигнала Signal type	Датчик (x) Sensor (x)	Мотор-вентилятор Fan motor	Коэффициент корреляции $R_{xy}$ и вид взаимосвязи Coefficient $R_{xy}$ correlations and type of relationship	Датчик (y) Sensor (y)	Мотор-вентилятор Fan motor
Среднеквадратическое значение виброскорости RMS vibration velocity value	д2	МВ-2	0,51 (заметная) perceptible	д2	МВ-4
		МВ-3	0,48 (умеренная) moderate		МВ-4
МВ-2		0,61 (заметная) perceptible	МВ-3		
МВ-2		0,59 (заметная) perceptible	МВ-4		
Среднеквадратическое значение виброускорения RMS Vibration acceleration value					

нологии (рис. 4), который позволяет формировать гибкую виброизмерительную схему одновременного контроля вибрации всех вспомогательных машин секции электровоза при их одновременной прокрутке под контактной сетью. На рис. 5 приведен вариант размещения одноканальных ВИБ на двух подшипниковых опорах ВИБ.

**Рис. 4.** Одноканальный

Виброизмерительный модуль:

- 1 – виброизмерительный блок; 2 – индикатор измерений и кнопки управления; 3 – антенна; 4 – разъем USB; 5 – магнит крепления блока; 6 – пульт дистанционного управления; 7 – ноутбук с программой «Вибродефект»

**Fig. 4.** Single-channel vibration measuring module:

- 1 – vibration measuring unit; 2 – measurement indicator and control buttons; 3 – antenna; 4 – USB connector; 5 – block mounting magnet; 6 – remote control; 7 – laptop with the «Vibrodefect» program

**Рис. 5.** Мотор-вентилятор

с виброизмерительными модулями

**Fig. 5.** Fan motor with vibration measuring modules

Данный одноканальный ВИБ защищен металлическим корпусом от мощных электромагнитных полей машинного отделения электровоза, датчик вибрации встроен в корпус ВИБ и не имеет соединительных проводов, расположенных вне корпуса ВИБ, как, например, в двухканальном варианте ВИБ (см. рис. 2). Время прокрутки ВМ и контроля с одновременной регистрацией вибросигналов – не более 1 мин.

С учетом проведенных статистических исследований корреляции (см. табл. 2) показаний датчиков д1 (у центробежного колеса) и датчиков д2 (с другой стороны электродвигателя МВ) можно оценивать вибрационное состояние каждого МВ по показаниям только одного датчика

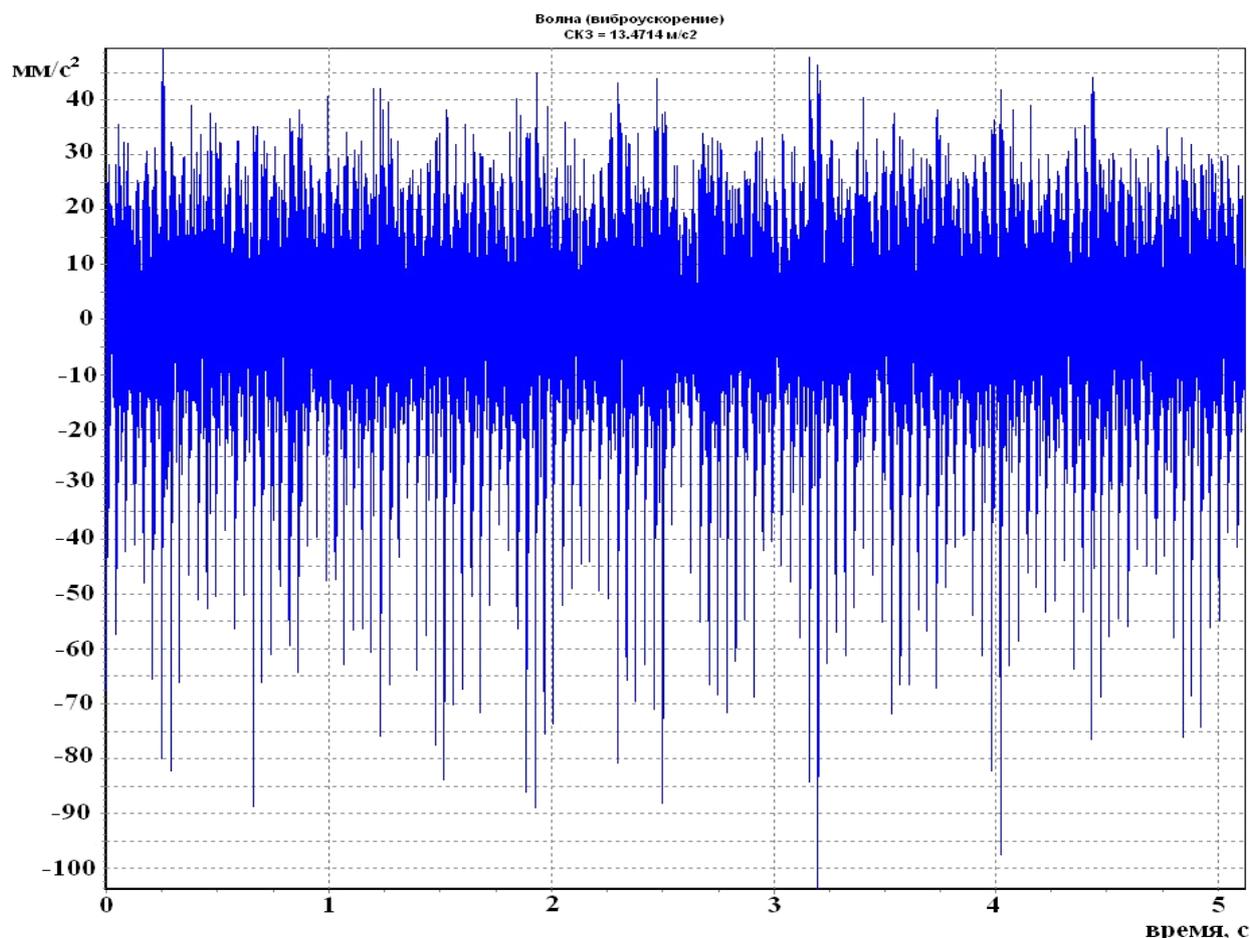
вибрации, например датчика д2, расположенного на подшипниковом щите у задней опоры электродвигателя с другой стороны от центрального колеса (см. рис. 5). Это в два раза сократит необходимое число ВИБ и увеличит эффективность капиталовложений в систему входного контроля ВМ перед ремонтом. Для контроля вибрации ВМ секции электровоза понадобится не более 5 ВИБ (по числу ВМ в секции).

Преимущества предлагаемых конструкций ВИБ: одновременный контроль вибрации всех ВМ секции электровоза при входе на ремонт, что позволяет производить ремонт с учетом технического состояния ВМ. Модульно-распределенная система измерения и регистрации вибрации вспомогательных машин электровозов на основе одноканальных ВИБ, позволяет формировать любую конфигурацию и число каналов измерительной системы. На виброизмерительный модуль получен патент [17].

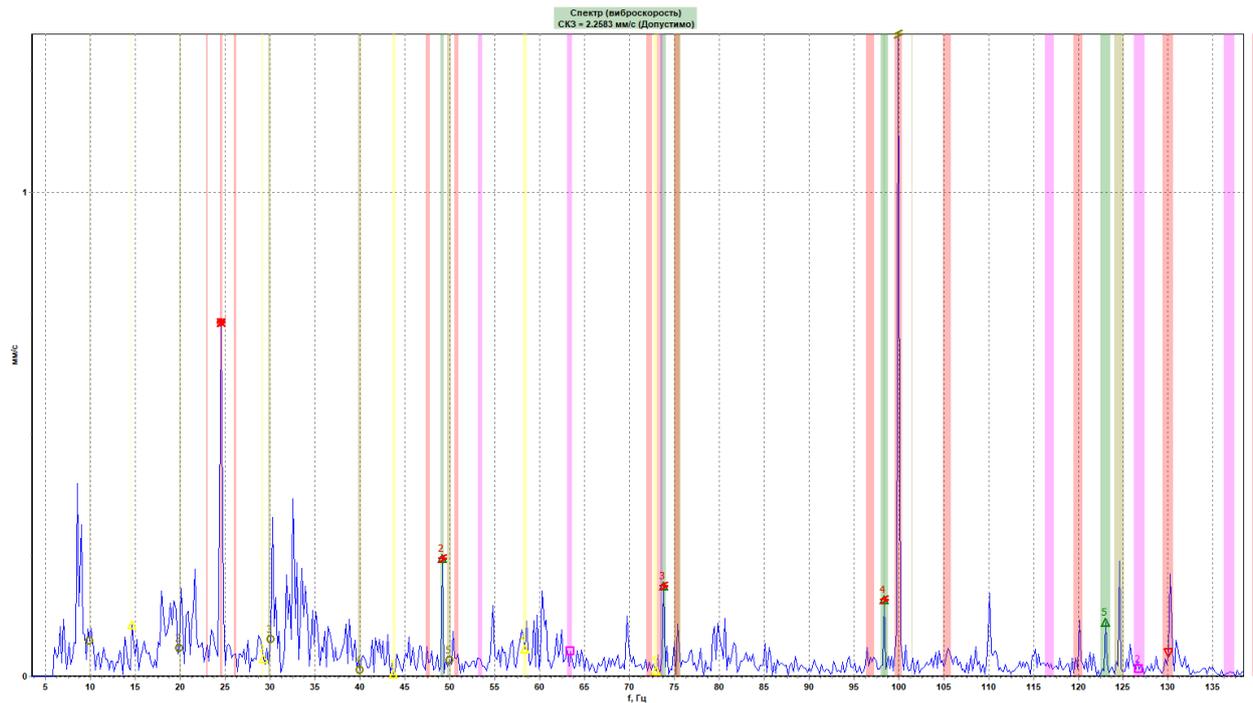
На программу автоматизированной вибродиагностики дефектов ВМ «Вибродефект» получено свидетельство [18].

### Программа «Вибродефект»

Программа «Вибродефект» кроме формирования протокола виброизмерений (см. рис. 4) позволяет проводить анализ каждого вибросигнала индивидуально: проанализировать его вид (рис. 6), определить ПИК-фактор (импульсность сигнала), СКЗ, получить спектры виброскорости, вибросмещения и виброускорения с наложением маски характерных частот дефектов (рис. 7). Программа имеет широкий набор инструментов для вычисления характерных частот дефектов ВМ, суммарного значения СКЗ виброскорости на этих частотах и оценки этого вклада в СКЗ виброскорости во всем диапазоне частот 10–5 000 Гц.



**Рис. 6.** Пример сигнала виброускорения вспомогательной машины при дефекте «механическое ослабление»  
**Fig. 6.** An example of a vibration acceleration signal of an auxiliary machine under a «mechanical weakening» defect



**Курсор**  
f = 24.6075Гц, 0.7317мм/с

**Полосы частот дефектов**

<input checked="" type="checkbox"/> Курсор	
<input checked="" type="checkbox"/> Обратная частота	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Гармоника ОЧ	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Дефект сепаратора	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Дефект внутреннего кольца	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Дефект наружного кольца	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Дефект тел качения	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Повреждение стержней ротора	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Несимметричный режим нагрузки	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Стат. эксцентриситет	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Дин. эксцентриситет ротора	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> 2 Номер гармоники	

**Оборотная частота**  
24.6075

Только максимум в полосе

**Диагностировать**

**Диагностика**

<input checked="" type="checkbox"/> Электрические дефекты: 1.8541 (37.7%)
<input checked="" type="checkbox"/> Механические дефекты: 1.8325 (37.3%)
<input checked="" type="checkbox"/> Дефекты подшипника: 1.2266 (25.0%)

**Рис. 7.** Спектр виброскорости с наложением маски характерных частот дефектов  
**Fig. 7.** Vibration velocity spectrum with overlay of a mask of defects' characteristic frequencies

Для анализируемого массива 1 100 измерений вибрации МВ электровозов ВЛ-85 получено распределение видов дефектов (рис. 8). Результаты вибродиагностики (рис. 9) отображаются в правой части спектра (см. рис. 7) и показывают процент вклада характерных спектральных компонентов дефектов в общее СКЗ вибрации МВ в контролируемой точке.

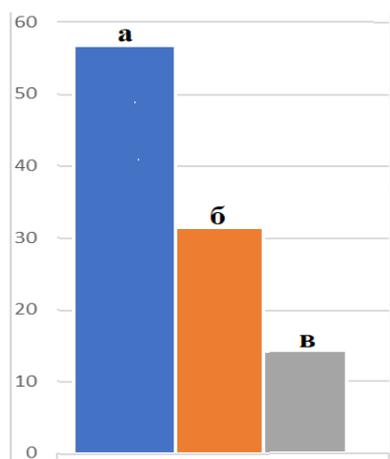
По результатам автоматизированной вибродиагностики ВМ перед заходом электровозов на ремонт возможны следующие действия:

- при обнаружении дисбаланса ротора ВМ необходимо значительно уменьшить вибрацию путем балансировки ротора в собственных подшипниках с использованием стандартных функций виброанализатора (например, STD-3300), что значительно увеличит межремонтный ресурс ВМ;

- при дефекте подшипников необходима их замена при ремонте и проверка вибрации при выходе из ремонта;

- при электрическом дефекте необходим ремонт электродвигателя ВМ или контроль величины несимметрии тока в цепи питания электродвигателя;

- виброконтроль ВМ на выходе из ремонта позволит оценить качество ремонта и обеспечить безаварийную работу ВМ во время эксплуатации.



**Рис. 8.** Распределение дефектов мотор-вентиляторов по видам:

*а* – механические (55,1 %); *б* – дефекты подшипников (30,8 %); *в* – электрические дефекты (14,1 %)

**Fig. 8.** Distribution of motor fan defects by type:

*a* – mechanical (55.1%); *b* – bearing defects (30.8%);

*c* – electrical defects (14.1%)

Контроль вибрации ВМ электровозов при техническом осмотре (в случае необходимости) и перед заходом электровоза на ремонт позволяет оптимизировать объем ремонтных работ и выполнять только те ремонтные операции, которые действительно необходимы. Как показывают исследования в области вибродиагностики машинного оборудования, проведение работ по снижению уровня вибрационного фона в электровозах может принести ощутимые экономические выгоды за счет повышения производительности, увеличения межремонтного пробега и снижения расходов на обслуживание и ремонт оборудования.

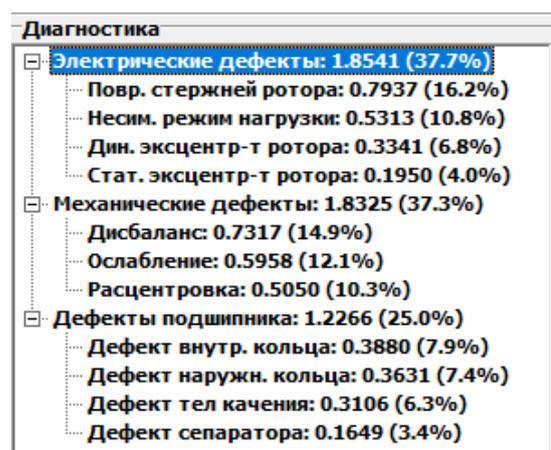
Применение комплекса вибродиагностики на основе разработанной аппаратуры ВИБ и программы «Вибродефект» реализует два метода анализа собранных данных:

- с помощью автоматизированного генерирования протокола результатов обработки сигналов виброскорости;

- с помощью детального индивидуального анализа вибрации, измеренной датчиками.

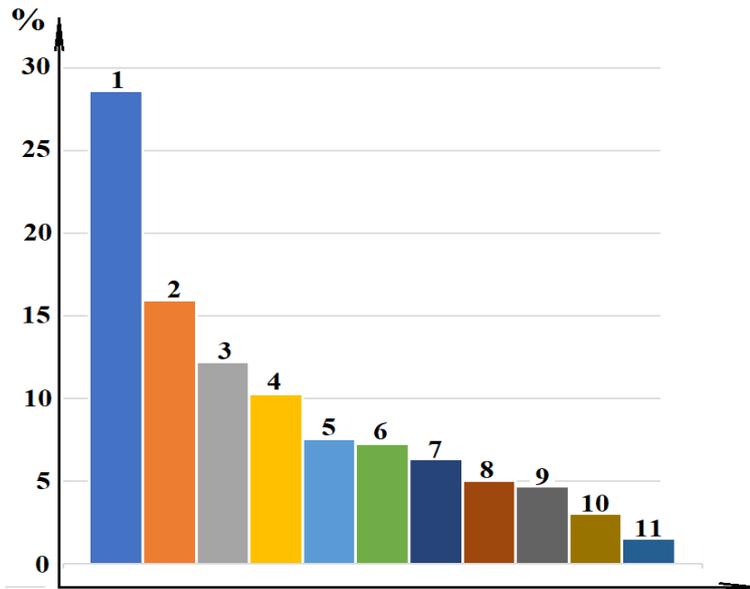
### Результаты автоматизированной вибродиагностики

Методом генерирования протокола результатов диагностики обеспечивается высокая производительность обработки данных и формирование стандартных выводов по реагированию на высокую вибрацию и методов ее устра-



**Рис. 9.** Пример результатов диагностики дефектов в программе «Вибродефект»

**Fig. 9.** An example of the results of defect diagnostics in the «Vibrodefect» program



**Рис. 10.** Распределение процента вклада дефектов в общем уровне вибрации:

- 1 – дисбаланс; 2 – механическое ослабление; 3 – расцентровка; 4 – повреждение стержней ротора;  
 5 – дефект внутреннего кольца подшипника; 6 – дефект наружного кольца подшипника;  
 7 – дефект тел качения подшипника; 8 – динамический эксцентриситет ротора; 9 – несимметрия тока;  
 10 – статический эксцентриситет ротора; 11 – дефект сепаратора

**Fig. 10.** Distribution of the percentage contribution of defects to the overall vibration level:

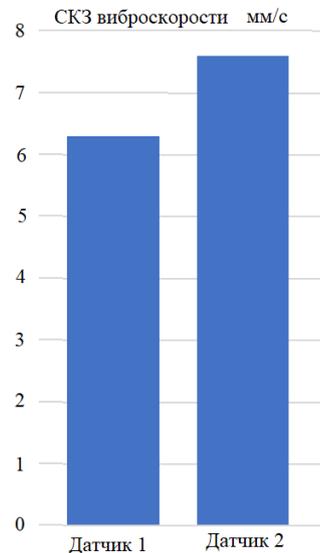
- 1 – imbalance; 2 – mechanical weakening; 3 – misalignment; 4 – damage to the rotor rods;  
 5 – defect of the inner ring of the bearing; 6 – defect of the outer ring of the bearing;  
 7 – defect of the rolling elements of the bearing; 8 – dynamic eccentricity of the rotor; 9 – current asymmetry;  
 10 – static eccentricity of the rotor; 11 – separator defect

нения. Индивидуальный анализ вибросигнала или спектров позволяет уточнить диагноз технического состояния ВМ.

На рис. 10 приведены результаты распределения процентного вклада дефектов в общий уровень вибрации ВМ. Более половины дефектов ВМ составляют механические дефекты: дисбаланс, механическое ослабление, расцентровка. Наиболее распространенным дефектом является дисбаланс – 28 %. Два первых дефекта (44 % дефектов) могут быть ликвидированы при балансировке ротора в собственных опорах и при устранении люфтов в неподвижных соединениях ВМ. Дефект «дисбаланс» может быть ошибочно поставлен в случае резонанса механической системы вспомогательной машины, который проявляется в случае снижения собственной частоты крепления ВМ к основанию. Резонанс выявляется дополнительным исследованием собственной частоты колебаний ВМ при импульсном механическом воздействии на станину ВМ.

На рис. 11 приведен средний уровень СКЗ виброскорости зарегистрированный на

датчиках д1 и д2 ВИБ массива измерений вибрации на МВ электровозов ВЛ-85.



**Рис. 11.** Средний уровень среднеквадратических значений виброскорости на датчиках д1 и д2 виброизмерительного блока

**Fig. 11.** Average level of rms vibration velocity values on sensors d1 and d2 of the vibration measuring unit

При использовании одноканального ВИБ (см. рис. 5) наиболее рационально устанавливать единственный датчик в районе задней опоры электродвигателя с другой стороны от центробежного колеса. Датчики следует размещать на подшипниковых щитах электродвигателя в вертикальном или горизонтальном направлениях, т.е. в точках максимально близких к подшипникам. Другое расположение датчиков на мотор-вентиляторе (например, на кожухе корпуса) может привести к существенной погрешности измерения уровня вибрации.

### Заключение

Рассмотренные конструкции модульных ВИБ с одним или двумя датчиками вибрации способствуют формированию оптимальной структуры измерительной системы, дающей возможность зарегистрировать вибрацию на

всех ВМ секции электровоза перед началом ремонта электровоза. Данные конструкции ВИБ позволяют свести к минимуму количество проводов, создающих помехи при измерениях в высоковольтном машинном отделении электровоза. Управление синхронным включением и отключением ВИБ производится из прохода машинного отделения. Передача данных в программу «Вибродефект» осуществляется через USB-порт ВИБ. Программа «Вибродефект» способна одновременно провести анализ и вибродиагностику дефектов всех ВМ электровоза и выдать заключение в виде протокола. Данные, приведенные в протоколе вибродиагностики, позволяют гибко планировать объем и содержание ремонтных работ, т.е. перейти к обслуживанию и ремонту вспомогательных машин по фактическому состоянию.

### Список литературы

1. Романовский А.И. Динамика вентиляционных машин с асинхронным электроприводом при несимметрии фазных токов : дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2012. 219 с.
2. Романовский А.И. Исследование вибрационных признаков несимметричных режимов работы вспомогательных машин электровозов // Информационные и математические технологии в науке и управлении : тр. XVI Байкал. Всерос. конф. Иркутск, 2010. Т. 2. С.101–108.
3. Романовский А.И. Исследование вибрационных признаков электрических дефектов вспомогательных машин электровозов // Проблемы механики современных машин : материалы IV Междунар. конф. Улан-Удэ, 2009. Т. 4. С.150–154.
4. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. М. : Машиностроение, 1987. 282 с.
5. Васильевский Ю.Н., Гераскин А.А. Анализ сигналов датчиков вибрации в короткозамкнутых асинхронных двигателях на основе математических моделей вибровозмущающих электромагнитных сил // Электротехника и электромеханика. 2010. № 5. С. 12–16.
6. Попков В.И., Мышинский Э.Л., Попков О.И. Виброакустическая диагностика в судостроении. Л. : Судостроение, 1989. 256 с.
7. Шубов И.Г. Шум и вибрация электрических машин. Л. : Энергоатомиздат, 1986. 208 с.
8. 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.
9. Лукьянов А.В., Пономорёва Ю.В. Исследование вибрации вспомогательных машин пассажирских электровозов // Молодая наука Сибири. 2020. № 4 (10). С. 248–256. URL: [https://mnv.irkups.ru/sites/default/files/articles\\_pdf\\_files/ronamoreva\\_lukyuanov.pdf](https://mnv.irkups.ru/sites/default/files/articles_pdf_files/ronamoreva_lukyuanov.pdf) (дата обращения 27.11.2023).
10. Биргер И.А. Техническая диагностика. М. : Машиностроение, 1978. 240 с.
11. Явленский К.Н., Явленский А.К. Вибродиагностика и прогнозирование качества механических систем. Л. : Машиностроение, 1983. 239 с.
12. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов / Ф.Я. Балицкий, М.А. Иванова, А.Г. Соколова и др. М. : Наука, 1984. 119 с.
13. Русов В.А. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам. Пермь : Вибро-Центр, 2012. 198 с.
14. Неразрушающий контроль : справочник. / под ред. В.В. Клюева. Т. 7, Кн. 1-2. М. : Машиностроение. 2006. 829 с.
15. Барков А.В. Диагностика и прогнозирование технического состояния подшипников качения по их виброакустическим характеристикам // Судостроение. 1985. № 3. С. 21–23.
16. Разработка комплекса входного виброконтроля мотор-вентиляторов электровозов / А.В. Лукьянов, А.Ю. Портной, В.Ю. Гарифулин и др. // Проблемы механики современных машин : материалы IV Междунар. конф. Улан-Удэ, 2009. Т. 1. С. 252–256.
17. Пат. № 2492441, Рос. Федерация. Устройство для измерения вибрации / А.Ю. Портной, А.В. Лукьянов, Н.Ю. Лебедева и др. № 2010118565/28 : заявл. 07.05.2010 ; опубл. 10.09.2013, Бюл. № 25. 8 с.
18. Свидетельство № 2011610455. Вибродефект. Версия 1.1.1 / А.В. Лукьянов, В.Ю. Гарифулин, В.Н. Перелыгин и др. № 2010615511 : заявл. 08.09.2010 ; опубл. 11.01.2011.

19. 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<sup>-1</sup>. Введ. 2007–11–01. М. : Стандартинформ, 2007. 14 с.

20. Ширман А.Р., Соловьёв А.Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. М. : Наука, 1996. 276 с.

### References

1. Romanovskii A.I. Dinamika ventilyatsionnykh mashin s asinkhronnym elektroprivodom pri nesimmetrii faznykh tokov [Dynamics of ventilation machines with asynchronous electric drive with phase current asymmetry]. Ph.D.'s thesis. Irkutsk, 2012. 219 p.

2. Romanovskii A.I. Issledovanie vibratsionnykh priznakov nesimmetrichnykh rezhimov raboty vspomogatel'nykh mashin elektrovozov [Investigation of vibrational signs of asymmetric modes of operation of auxiliary machines of electric locomotives]. *Trudy XVI Baikal'skoi Vserossiiskoi konferentsii «Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii»* [Proceedings of the XVI Baikal All-Russian Conference «Information and mathematical technologies in science and management»]. Irkutsk, 2010, vol. 2, pp. 101–108.

3. Romanovskii A.I. Issledovanie vibratsionnykh priznakov elektricheskikh defektov vspomogatel'nykh mashin elektrovozov [Research of vibration signs of electrical defects of auxiliary machines of electric locomotives]. *Materialy IV Mezhdunarodnoi konferentsii «Problemy mekhaniki sovremennykh mashin»* [Proceedings of the IV International Conference «Problems of mechanics of modern machines»]. Ulan-Ude, 2009, vol. 4, pp. 150–154.

4. Genkin M.D., Sokolova A.G. Vibroakusticheskaya diagnostika mashin i mekhanizmov [Vibroacoustic diagnostics of machines and mechanisms]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1987. 282 p.

5. Vas'kovskii Yu.N., Geraskin A.A. Analiz signalov datchikov vibratsii v korotkozamknutykh asinkhronnykh dvigatelyakh na osnove matematicheskikh modelei vibrovzmozhashchayushchikh elektromagnitnykh sil [Analysis of vibration sensor signals in short-circuited asynchronous motors based on mathematical models of vibration-disturbing electromagnetic forces]. *Elektrotehnika i elektromekhanika* [Electrical Engineering and Electromechanics], 2010, no. 5, pp. 12–16.

6. Popkov V.I., Myshinskii E.L., Popkov O.I. Vibroakusticheskaya diagnostika v sudostroenii [Vibroacoustic diagnostics in shipbuilding]. Leningrad: Sudostroenie Publ., 1989. 256 p.

7. Shubov I.G. Shum i vibratsiya elektricheskikh mashin [Noise and vibration of electrical machines]. Leningrad: Energoatomizdat Publ., 1986. 208 p.

8. 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.

9. 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.

10. Birger I.A. Tekhnicheskaya diagnostika [Technical diagnostics]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1978. 240 p.

11. Yavlenskii K.N., Yavlenskii A.K. Vibrodiagnostika i prognozirovaniye kachestva mekhanicheskikh sistem [Vibration diagnostics and prediction of the quality of mechanical systems]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1983. 239 p.

12. Balitskii F.Ya., Ivanova M.A., Sokolova A.G., Khomyakov E.I. Vibroakusticheskaya diagnostika zarozhdayushchikhsya defektov [Vibroacoustic diagnostics of incipient defects]. Moscow: Nauka Publ., 1984. 119 p.

13. 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.

14. 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.

15. Barkov A.V. Diagnostika i prognozirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya podshipnikov kacheniya po ikh vibroakusticheskim kharakteristikam [Diagnostics and forecasting of the technical condition of rolling bearings according to their vibroacoustic characteristics]. *Sudostroenie* [Shipbuilding], 1985, no. 3, pp. 21–23.

16. Luk'yanov A.V., Portnoi A.Yu., Garifulin V.Yu., Romanovskii A.I. Razrabotka kompleksa vkhodnogo vibrokontrolya motor-ventilyatorov elektrovozov [Development of a complex for input vibration control of electric locomotive motor fans]. *Materialy IV Mezhdunarodnoi konferentsii «Problemy mekhaniki sovremennykh mashin»* [Proceedings of the IV International Conference «Problems of mechanics of modern machines»]. Ulan-Ude, 2009, vol. 1, pp. 252–256.

17. Portnoi A.Yu., Luk'yanov A.V., Lebedeva N.Yu., Luk'yanov D.A., Romanovskii A.I. Patent RU 2492441 C2, 10.09.2013.

18. Luk'yanov A.V., Garifulin V.Yu., Perelygin V.N., Luk'yanov D.A., Romanovskii A.I. Certificate of registration of a computer program 2011610455, 11.01.2011.

19. 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<sup>-1</sup> [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.

20. 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.

**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.

**Перельгина Александра Юрьевна**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой инженерной и компьютерной графики, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск; e-mail: perelygina@istu.edu.

**Каймов 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.

**Alexandra Yu. Perelygina**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department of Engineering and Computer Graphics, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk; e-mail: perelygina@istu.edu.

**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.

**Современные технологии**  
**Системный анализ**  
**Моделирование**

**№ 4 ( 80 )**  
**2 0 2 3**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

Главный редактор **А.П. Хоменко**  
Ответственный за выпуск **Д.В. Буторин**

Подписано в печать 29.12.2023. Формат 60x84/8.

Дата выхода в свет 29.12.2023

Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 18,48.

Уч.-изд. л. 13,54. Тираж 500 экз. Заказ № 3699

Подписной индекс по каталогу «Урал-Пресс»: 64556

ISSN: 1813-9108

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ РАН.

Сведения о журнале ежегодно

публикуются в международной справочной системе

по периодическим и продолжающимся изданиям

«Ulrich's Periodicals Directory»

ИД №06506 от 26.12.01

Маркировка информационной продукции - не маркируется

Цена свободная

Адрес редакции, издательства и типографии

664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Иркутский государственный университет путей сообщения

Телефон: 8(3952) 63-83-74, E-mail: stsam@irgups.ru

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство ПИ № ФС77-66109 от 20 июня 2016 г.

Учредитель: ФГБОУ ВО "Иркутский государственный университет путей сообщения"  
(664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15)