

## Анализ надежности и экономичности асинхронных вспомогательных машин электровозов

В.В. Макаров, В.Н. Иванов✉, А.М. Худоногов

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

✉v.n.ivanov40161@yandex.ru

### Резюме

В статье приводятся проанализированные данные сервисных локомотивных депо и отделов ремонта, эксплуатационных локомотивных депо Красноярской, Восточно-Сибирской и Забайкальской дирекций тяги и управлений «Локо-Тех» по заходам электровозов на межпоездной ремонт по итогам работы в 2023–2024 гг. с новым типом мотор-вентиляторов производства Новосибирского энергомашиностроительного завода «Тайра». Рассмотрены и приняты во внимание наработки Иркутского государственного университета путей сообщения по отказам вспомогательных машин электровозов переменного тока. Изучены этапы производства и изготовления асинхронных вспомогательных машин в советский и современный периоды. Исследованы конструкционные особенности асинхронных вспомогательных машин для электровозов переменного тока, работающих на Восточном полигоне, а также динамические особенности роторов с алюминиевым сплавом и со сварной медной клеткой. В работе выдвинута гипотеза, в соответствии с которой при существующих системах питания глубокопазных асинхронных вспомогательных машин проявляется не только эффект вытеснения тока в обмотке ротора, но и возникают токи Фуко, индуцированные магнитным потоком наиболее высокой частоты в верхних слоях обмотки ротора, вызывающие подплавление его поверхности (по принципу работы электрических индукционных печей). Авторами предложен способ сохранения ресурса изоляции статорных обмоток асинхронных вспомогательных машин. Однако при этом существует острая необходимость продолжения исследования работы данных машин в различных режимах их эксплуатации.

### Ключевые слова

асинхронная вспомогательная машина, рДМ225, электровозы, способы сохранения ресурса, изоляционный материал

### Для цитирования

Макаров В.В. Анализ надежности и экономичности асинхронных вспомогательных машин электровозов / В.В. Макаров, В.Н. Иванов, А.М. Худоногов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2025. № 1 (85). С. 80–89. DOI 10.26731/1813-9108.2025.1(85).80-89.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 29.01.2025 г.; поступила после рецензирования: 06.02.2025 г.; принята к публикации: 10.02.2025 г.

## Analysis of reliability and efficiency of asynchronous auxiliary machines of electric locomotives

V.V. Makarov, V.N. Ivanov✉, A.M. Khudonogov

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉v.n.ivanov40161@yandex.ru

### Abstract

The article analyzes and presents data from servicing locomotive depots and repair departments of operational locomotive depots at the Krasnoyarsk, East Siberian and Transbaikalian traction directorates and Loco-Tech departments on visits of electric locomotives for inter-train repairs based on the results of work for 2023–2024 with a new type of fan motor manufactured by Novosibirsk Power Engineering Plant «Taira» LLC, Novosibirsk. The developments of the Irkutsk State Transport University on auxiliary machines failures in alternating current electric locomotives are analyzed and taken into account. The stages of production and manufacture of asynchronous auxiliary machines of the Soviet period and modern production are considered. The design features of the manufacture of asynchronous auxiliary machines for AC electric locomotives operating at the Eastern polygon have been studied. As well as the dynamic manufacturing features of both rotors with an aluminum alloy and a welded version of the winding with a copper rotor. The article hypothesizes that with existing power systems for deep-slot asynchronous auxiliary machines, not only the effect of current displacement in the rotor winding is manifested, but Foucault currents also arise, induced by the magnetic flux of the highest frequency in the upper layers of the rotor winding, causing melting of the surface of the rotor winding, according to the principle operation of electric induction furnaces. A method for preserving the insulation life of stator windings of asynchronous auxiliary machines is proposed. At the same time, there is an urgent need to continue research into the operation of this asynchronous auxiliary machine under various operation modes.

**Keywords**

asynchronous auxiliary machine, rDM225, electric locomotives, methods of resource conservation, insulating material

**For citation**

Makarov V.V., Ivanov V.N., Khudonogov A.M. Analiz nadezhnosti i ekonomichnosti asinkhronnykh vspomogatel'nykh mashin elektrovozov [Analysis of reliability and efficiency of asynchronous auxiliary machines of electric locomotives]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2025. Vol. 85. No. 1. Pp. 80–89. DOI: 10.26731/1813-9108.2025.1(85).80-89.

**Article Info**

Received: January 29, 2025; Revised: February 6, 2025; Accepted: February 10, 2025.

**Введение**

В качестве вспомогательных машин на электровозах переменного тока применяют асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Для обеспечения двигателей переменным трехфазным напряжением используют расщепители фаз с активным фазосмещающим резистором (например, электровоз ВЛ80 в/и) и с фазосмещающими конденсаторами (ВЛ85). На электровозах «Ермак» применяется схема с пусковым двигателем и конденсаторами.

Силовые цепи вспомогательных машин и устройств, включая сами приводные двигатели и механизмы (компрессоры, вентиляторы, насосы), а также системы управления ими существенно влияют на показатели надежности электровоза в целом. Отказ любого из двигателей приводит не только к неисправному состоянию, но и к неработоспособному состоя-

нию с точки зрения выполнения графика движения поездов.

Целью работы являются анализ применения приводных машин вспомогательных механизмов электровозов с точки зрения их надежности, в том числе и на электровозах, выведенных из эксплуатации, оценка надежности машин общепромышленного назначения на грузовых электровозах ОАО «РЖД» типа рДМ225L4УХЛ1 и формирование соответствующих выводов о перспективах их использования.

**История развития и современное состояние асинхронных машин**

В настоящее время железнодорожный транспорт переходит на более современные электровозы постоянного, однофазно-постоянного и переменного тока различных



**Рис. 1.** Состояние ротора НВА55С  
**Fig. 1.** The state of the NVA55S rotor

серий. Для привода основных вспомогательных механизмов, таких как компрессоры и вентиляторы, на этих электровозах начали применять наиболее надежные, как было заявлено, асинхронные вспомогательные машины (АВМ) типа НВА55С со сварным медным ротором вместо АВМ типа НВА55 с дюралюминиевым литым ротором. Однако стоимость этих новых АВМ выше по сравнению с их предшественниками. Более того, такие отказы, как потеря контакта в медном сварном роторе в результате обрыва стержня ротора или отгара короткозамыкающего кольца, значительно увеличились (рис. 1), а такой отказ, как подплавление поверхности обмотки медного ротора не исчез (рис. 2).

В табл. 1 представлены основные электромеханические параметры АВМ электровозов однофазно-постоянного тока известных серий. Она составлена на основании расчетов по паспортным и каталожным данным, полученным из различных источников. Возможны различия по таким АВМ, как АНЭ225, НВА55, НВА55С и НВА22. После развала СССР Владимирский электромоторный завод прекратил выпуск АВМ типа АНЭ225 и на Новочеркасском электровазостроительном заводе организовали производство АВМ типа НВА. Было заявлено, что их выпуск организован по технической документации АВМ типа АНЭ225. Показателями таблицы это заявление не подтверждается. Да и одинаковые коэффициенты полезного действия (КПД) у АВМ типа НВА55 и

НВА55С (с медным ротором) вызывают дополнительные вопросы [1].

Первой унифицированной АВМ для электровозов серии ВЛ80 был электродвигатель АЭ-92-4, который по заказу Министерства путей сообщения изготавливали на Харьковском электромеханическом заводе. Глубокопазный ротор этого электродвигателя позволял иметь кратность пускового и максимального моментов 4,0. Однако в статистике отказов по этим АВМ впервые появилась строка «подплавление поверхностного слоя дюралюминиевой литой обмотки ротора». Относительно других отказов по АВМ этот отказ не превышал 5–7 %.

При проектировании электровозов серии ВЛ85 для эксплуатации их в основном в условиях Байкало-Амурской магистрали АВМ для них типа АНЭ225Л4УХЛ2 производились на Владимирском электромоторном заводе. По сравнению с АВМ типа АЭ-92-4 номинальная мощность была увеличена до 55 кВт, кратность пускового момента увеличилась до 4,7. Существенно была изменена и конструкция ротора, были убраны вентиляционные окна и открыты пазы магнитопровода. Отказы в виде «подплавление поверхностного слоя дюралюминиевой литой обмотки ротора» увеличились почти в 2 раза. Электромагнитные явления в глубокопазном роторе асинхронного двигателя достаточно полно описаны в учебниках по электрическим машинам.



Рис. 2. Подплавление ротора НВА55С

Fig. 2. Melting of the rotor NVA55S

**Таблица 1.** Основные электромеханические параметры асинхронных вспомогательных машин электровозов  
**Table 1.** Main electromechanical parameters of asynchronous auxiliary machines of electric locomotives

Технические характеристики асинхронных вспомогательных машин Technical characteristics of asynchronous auxiliary machines	Серии электровоза Electric locomotive series							
	ВЛ60	ВЛ60 ВЛ80к	ВЛ80	ВЛ85	2(3)ЭС5к «Ермак»	2(3)ЭС5к «Ермак» с поосным регулированием «Ермак» with axis-by-axis regulation	ЭП1	ЗЭС5к
	Тип асинхронных вспомогательных машин Type of asynchronous auxiliary machines							
	АП-82-4	АС-82-4	АЭ-92-4	АНЭ225	НВА55, НВА55С		НВА22	рДМ-225L4
Номинальный момент ( $M_H$ , Н·м) Nominal torque ( $M_H$ , N·m)	360	380	268	367	364	380	298	357
Критический момент ( $M_K$ , Н·м) Critical moment ( $M_K$ , N·m)	792	914	1 072	1 763	1 747	1 824	745	785
Пусковой момент ( $M_P$ , Н·м) Starting torque ( $M_P$ , N·m)	648	838	1 072	1 688	1 677	1 748	596	714
Номинальный ток статора ( $I_H$ , А) Nominal stator current ( $I_H$ , A)	107	110	90	119	113	120	69	115
Пусковой ток ( $I_P$ , А) Starting current ( $I_P$ , A)	696	550	684	898	847	900	352	690
Частота вращения ( $n_0$ , об/мин) Rotation frequency ( $n_0$ , rpm)	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	750	1 500
Номинальная частота вращения ( $n_H$ , об/мин) Nominal rotation speed ( $n_H$ , rpm)	1 460	1 380	1 425	1 430	1 440	1 445	705	1 470
Критическая частота вращения ( $n_K$ , об/мин) Critical rotational speed ( $n_K$ , rpm)	1 058	945	909	835	930	960	534	1 350
Номинальное скольжение ( $S_H$ , %) Nominal slip ( $S_H$ , %)	2,6	8,0	4,6	5,0	4,0	3,8	6,0	2,0
Критическое скольжение ( $S_K$ , %) Critical slip ( $S_K$ , %)	29	37	40	44	38	36	29	10
Номинальная мощность ( $P_H$ , кВт) Nominal power ( $P_H$ , kW)	55	55	40	55	55	55	22	55
Коэффициент полезного действия, % Efficiency factor, %	90,5	86,2	85,5	88,0	90,2	90,2	82,1	92,8

cos φ, отн. ед.	0,88	0,86	0,79	0,80	0,82	0,77	0,59	0,78
Коэффициент полезного действия cos φ ( $K_{\text{эф}}$ ) Coefficient of efficiency cos φ ( $K_{\text{эф}}$ )	0,796	0,741	0,675	0,704	0,739	0,694	0,484	0,730
Класс изоляции Insulation class	B	B	H	H	F	H	F	H
Масса, кг Mass, kg	400	400	390	375	375	385	375	330

При существующих системах питания глубокопазных АВМ проявляется не только эффект вытеснения тока в обмотке ротора, но и возникают токи Фуко, индуцированные гармониками магнитного потока наиболее высокой частоты в верхних слоях обмотки ротора, вызывающие подплавление поверхности обмотки ротора (по принципу работы электрических индукционных печей) [2–6].

#### Анализ надежности асинхронных вспомогательных машин

Самый существенный просчет по проектированию и производству асинхронного вспомогательного электропривода был для электровозов серии «Ермак». Катастрофа с надежностью АВМ типа НВА55 проявилась при выпуске электровозов серии «Ермак» с системой питания от преобразователя частоты фаз на грузовых электровозах. В локомотивных депо Вихоревка и Смоляниново за 2006–2008 гг. было заменено 98 электродвигателей НВА55 или 14,2 % от их общего числа, что составляет 13,9 случаев на 1 млн. км пробега. Таким образом, показатель отказов электродвигателей НВА55 на электровозах 2ЭС5К, 3ЭС5К в 21 раз превышает среднесетевой показатель отказов вспомогательных электродвигателей серийных электровозов. Все повреждения электродвигателей НВА55 произошли на электровозах 2ЭС5К и 3ЭС5К в период гарантии [1, 7].

Повреждения электродвигателей НВА55 в этих депо по характеру отказа распределились следующим образом:

- выплавление ротора – 86 случаев (87,7 %);
- короткое замыкание обмотки статора – 11 случаев (11,2 %);
- шум подшипника – 1 случай (1,0%) [1].

Ситуация по массовым отказам АВМ типа НВА55 повторилась в локомотивном депо Вихоревка в 2008–2009 гг. После демонтажа на

электровозах серии «Ермак» полупроводниковых преобразователей частоты и фаз и замены их на электромашинные симметричные фазорасщепители (пусковые электродвигатели) ситуация изменилась в лучшую сторону. Но проблема окончательно не была решена [1, 7–18].

Машины имеют принудительную самовентиляцию, осуществляемую крыльчаткой, составляющей как бы одно целое с сердечником ротора.

#### Решения по повышению надежности за счет конструктивных изменений машин

Было предложено АВМ типа НВА55 заменить на АВМ55С со сварным медным ротором. Фрагменты отказов этих АВМ приведены ранее (см. рис. 1, 2). Можно сослаться на некачественное производство сварных медных роторов. Однако проблема надежности и экономичности АВМ не исчезла, а лишь усложнилась. Динамический момент инерции ротора АВМ типа НВА55С больше динамического момента инерции ротора АВМ типа НВА55, так как его масса на 10 кг больше. По законам механики в этой связи вероятность появления эксцентриситета у этих АВМ будет выше, а, следовательно, надежность АВМ на 80 % будет зависеть от величины эксцентриситета. Расход электроэнергии на питание АВМ при увеличении эксцентриситета также будет увеличиваться.

На ряде электровозов серии 3ЭС5К установлены в условиях Новочеркасского электровозостроительного завода мотор-вентиляторы производства Новосибирского энергомашиностроительного завода «Тайра».

Разработке научной и практической базы по влиянию эксцентриситета на надежность и технико-экономические показатели асинхронных электродвигателей посвящены многочисленные исследования для различных отраслей промышленности, сельскохозяйственного производства и транспорта. На основании изу-

чения и обобщения этих работ было установлено, что эксплуатация электродвигателя с таким видом дефекта не приводит к немедленному выходу его из строя, но снижает надежность работы, долговечность и влияет на другие технико-экономические показатели: искажается магнитное поле в воздушном зазоре, создается одностороннее магнитное притяжение, КПД снижается на 1,5–2 %, появляются дополнительные высшие гармоники поля, снижается пусковой момент на 10–13 %, растут местные нагревы на 5–6 %. Для отражения экономической актуальности этой проблемы покажем расчет на основе технического паспорта АВМ типа НВА55С (рис. 3).



### ДВИГАТЕЛЬ АСИНХРОННЫЙ

ТИП НВА 55С1М 1001 № 162

3Ф ~50 НЗУ 380 V 120 А 55кВт

IP 20 1440r/min КПД 90,2% cosφ 0,77

РЕЖИМ S1 ТУ16-99 ДЖТИ.526413.011ТУ

КЛ. ИЗОЛЯЦИИ F385кг 2012г

Рис. 3. Фрагмент технического паспорта асинхронной вспомогательной машины

Fig. 3. Fragment of the technical data sheet of the asynchronous auxiliary machine

Суммарные потери определяются КПД.

В техническом паспорте приводится номинальная мощность  $P_n$ , развиваемая электродвигателем на валу, равная 55 кВт.  $P_a$  – активная мощность (кВт) – расходуется на преобразование электрической энергии в механическую и на покрытие электрических и механических потерь:

$$P_a = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi}{1000};$$

$$P_a = \frac{P_n}{\eta_n} = \frac{55}{0,902} = 60,98 \text{ кВт.}$$

При отсутствии эксцентриситета суммарные потери будут составлять:

$$\Sigma P = P_a - P_n = 60\,980 - 55\,000 = 5\,980 \text{ Вт.}$$

При снижении КПД на 2 % в результате появления эксцентриситета суммарные потери будут составлять на 119,6 Вт больше, т.е. суммарные потери составят 6 099,6 Вт. Увеличение потерь на 119,6 Вт в годовом исчислении приведет к перерасходу электроэнергии на один

электродвигатель около 11 000 кВт · ч. На одной секции электровоза серии «Ермак» таких электродвигателей пять.

Практика показывает, что при номинальной мощности машины 55 кВт реальная потребляемая мощность составляет порядка 35 кВт. В этом случае перерасход составит порядка 7 300 кВт · ч. При стоимости электроэнергии на тягу поездов 3,35 р. за 1 кВт · ч перерасход составит в стоимостном выражении почти 24 тыс. р. на одну машину или 240 тыс. р. на один электровоз эксплуатируемого парка.

Как указывалось ранее, масса ротора за счет применения медной клетки выше. При одинаковом объеме беличьей клетки с учетом повышенной массы расходы только на материал при ее изготовлении более чем в 6 раз выше.

Существующие методы, способы и средства контроля и диагностики эксцентриситета ротора условно можно разделить на несколько групп:

- вибрационный контроль;
- электромагнитный контроль;
- непосредственное измерение величины воздушного зазора.

Методы, основанные на анализе спектра, амплитуды и мест появления вибрации электродвигателей, получили широкое применение. Но их применение на электровозе часто осложняется наличием большого количества источников дополнительных вибраций со стороны приводимого во вращения механизма и других двигателей. Электромагнитные способы контроля эксцентриситета основаны на анализе токов статора, напряжения, потребляемой мощности и при этом обладают высокой точностью. Однако при анализе обычно рассматривается ток в одной из обмоток двигателя, что не всегда позволяет точно провести диагностику. Также при реализации этих способов сложно учесть влияние на измеряемые параметры отклонения показателей качества электроэнергии, внешних электромагнитных полей и характера нагрузки. Проведенный анализ литературных источников показывает, что в настоящее время мало исследований, посвященных контролю и диагностике асинхронных двигателей в переходных режимах работы, в частности в процессе пуска. К одной из таких работ, выполненной для агропромышленных комплексов, но для электродвигателей малой мощности, можно

отнести исследования А.Ю. Прудникова. Однако для системы непрерывного контроля эксцентриситета этот метод непригоден. Анализ методов, способов и средств непрерывного контроля, диагностики и мониторинга эксцентриситета применительно к современным электровозам указал на необходимость осуществлять эти процессы на основе существующих микропроцессорных систем управления и диагностики. Эксцентриситет ротора АВМ определяется относительной величиной  $\varepsilon$  ( $0 < \varepsilon < 1$ ), которая выражается соотношением:

$$\varepsilon = \frac{\delta - \delta_{\min}}{\delta},$$

где  $\delta$  – значение воздушного зазора при наличии эксцентриситета ротора;  $\delta_{\min}$  – минимальное значение воздушного зазора.

При проектировании вращающихся асинхронных машин обычно стараются получить для них возможно малое значение воздушного зазора, чтобы иметь небольшой ток холостого хода, от которого главным образом зависит коэффициент мощности электродвигателя. При этом нужно считаться с необходимостью получить надежную машину, изготовление и монтаж которой не вызывает существенных затруднений.

Величина  $\delta_{\min}$  зависит от внутреннего диаметра статора  $D$ , диаметра и длины вала между подшипниками. От диаметра  $D$  зависят неизбежные производственные отклонения (допуски) при механической обработке подшипниковых щитов и корпуса статора, при штамповке листов и сборке их в пакеты статора и ротора. От диаметра и длины вала между подшипниками зависит прогиб вала. При выборе  $\delta_{\min}$  обращаются к данным рационально спроектированных и построенных машин, эксплуатация которых подтвердила их высокие технико-экономические характеристики и надежность в работе. Для параметров АВМ типа НВА55С рекомендуется использовать следующую эмпирическую формулу:

$$\delta_{\min} = \frac{D}{1200} \left( 1 + \frac{9}{2p} \right) \text{ (мм)},$$

где  $p$  – число полюсов на фазу (в нашем случае  $p = 2$ ). Тогда формула примет следующий вид:

$$\delta_{\min} = \frac{D}{3900} \text{ (мм)}.$$

С целью повышения надежности и экономичности АВМ необходимо создавать систему

непрерывного контроля ее эксцентриситета, что соответствует еще одному мероприятию по ее увеличению (надежности) – техническая диагностика. Создание системы непрерывного контроля требует проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

В настоящее время на электровозах серии ЗЭС5К последних номеров начали применять АВМ типа рДМ225L4УХЛ1. АВМ типа рДМ225 является машиной общепромышленного назначения, производится «Уралэлектромаш», кратность пускового момента не превышает 2,0. В процессе наработки опытной партии АВМ типа рДМ225 ряд из них уже имеют пробег более 500 тыс. км, при этом отказы по их работе в процессе эксплуатации отсутствуют. На данный момент эксплуатации результаты их работы носят положительную динамику.

В табл. 2 представлены результаты опытной эксплуатации по семи электровозам, эксплуатируемым на железных дорогах Восточного полигона.

Говорить о резком повышении надежности вспомогательной машины еще рано, поскольку их количество и наработка недостаточны для окончательных выводов.

Анализируя представленные характеристики АВМ и дополнительные данные, имеющиеся в паспортах, можно сказать о том, что при проектировании и изготовлении новых АВМ нарушаются основные принципы, обеспечивающие повышение их надежности [10]. Так, на стадии проектирования должно предусматриваться применение более надежных элементов, а также облегчение их ремонта. На стадии производства необходимо применять новые материалы. Наряду с другими мероприятиями их реализация дает больший эффект и обеспечивает системный подход к решению задачи по повышению надежности, который предусматривает согласование мероприятий в процессе проектирования, изготовления и эксплуатации электровозов и их систем, узлов, сборочных единиц и т.п. Так, на АВМ НВА55С и НВА55 понижен класс изоляции обмоток статора с класса  $H$  до класса  $F$ . Ранее было показано, что на короткое замыкание статора приходилось 11,2 % случаев отказов. О необходимости повышения класса изоляции говорит и работа [16], где экспериментально доказано, что во время пуска температура нагрева достигает величины, превышающей допустимое значение для класса изоляции  $F$ .

**Таблица 2.** Результаты опытной эксплуатации о надежности асинхронных вспомогательных машин типа рДМ225L4УХЛ1  
**Table 2.** Experimental operation results on the reliability of asynchronous auxiliary machines of the rDM225L4UHL1 type

№ п/п	Серия и номер Series and number	Депо приписки Depot of registration	Постройка Manufactured	Пробег, км Mileage, km				Отказы Failures
				НЭВЗ	ТР-3	ТР-2	ТР-1	
1	ЗЭС5к-1296	ТЧЭ-9 Вихоревка	03.03.2022	534564	–	СЛД Раздольная 259280	СЛД Братск 42795	0
2	ЗЭС5к-1301	ТЧЭ-9 Вихоревка	03.03.2022	537874	СЛД Канск-Ил 17922	–	–	0
3	ЗЭС5к-1304	ТЧЭ-7 Абакан	18.03.2022	538349	СЛД Боготол 6204	–	–	0
4	ЗЭС5к-1305	ТЧЭ-7 Абакан	19.03.2022	531230	СЛД Канск-Ил 2772	–	–	0
5	ЗЭС5к-1306	ТЧЭ-7 Абакан	23.03.2022	520659	СЛД Канск-Ил 53448	–	СЛД Канск-Ил 2440	0
6	ЗЭСС5к-1308	ТЧЭ-7 Абакан	27.03.2022	484666	–	СЛД Чита 215083	СЛД Хабаровск 5979	0
7	ЗЭС5к-1495	ТЧЭ-3 Чита	15.10.2023	231806	–	–	СЛД Раздольная 20076	0

Сравнение конструкции АВМ НВА55, НВА55С и АНЭ225L4УХЛ2 электровозов «Ермак» и ВЛ85 в сравнении с АВМ рДМ225L4УХЛ1, установленных на электровозах «Ермак» с номерами в соответствии с табл. 2, показывает, что на последних нарушен принцип применения более надежных элементов и облегчения ремонта.

Как указывалось, машины имеют самовентиляцию. При этом на АВМ серии рДМ225L4УХЛ1 крыльчатка вентилятора самовентиляции находится под защитным кожухом и крепится на валу болтом. Таким образом, появился новый узел сопряжения, который не только усложняет конструкцию, но еще и требует проверки и настройки баланса. И то, и другое влечет за собой дополнительные эксплуатационные расходы и увеличивает сортамент запасных частей. Наличие узла повлияет на надежность машины, а значит и на показатели использования единицы тягового подвижного состава в целом.

Появление в конструкции дополнительного сопряжения в случае возникновения отказов узла в дальнейшей эксплуатации потянет за собой корректировки технологии обслуживания и ремонта, ее внесения в технологические

карты. Поток отказов покажет, в перечень работ какого технического обслуживания или деповского ремонта необходимо будет внести эту корректировку. Изменение конструкции требует дополнительного нормирования времени на ремонт АВМ.

Кроме корректировки технологии потребуются и капитальные расходы на дополнительное оборудование для устранения дисбаланса в сборочной единице «ротор – крыльчатка». Появление дополнительных деталей повлечет за собой не только увеличение сортамента дополнительных запасных частей, но и затрат на их планирование и закупку.

### Заключение

На вновь изготавливаемых электровозах необходимо принимать следующий шаг по расширению эксперимента по применению двигателей рДМ225 путем ввода очередной партии. Для проведения ТР-3 электровозов необходимо актуализировать технологический процесс их ремонта. Для более точного анализа по надежности этих машин потребуется дополнительное время их эксплуатации при различных системах питания.



По мере накопления наработки и количества машин в случае появления прогнозируемых отказов необходимо внести изменения в технологию не только ремонта системы самовентилиации, но и предусмотреть в перечне работ какого-либо объема депоовского ремонта ее проверку и обслуживание. Кроме нормирования продолжительности ремонта нужно предусмотреть и затраты как эксплуатационные, так и капитальные, связанные с необходимостью осуществления балансирования подсистемы «ротор». Возможно, потребуется разработка стенда для балансировки узла.

На электровозах «Ермак» с АВМ серий НВА55, НВА55С на заводских ремонтах или ранее необходимо реализовать повышение класса изоляции до уровня *H*. Для слежения за эксцентриситетом машин требуется создать систему его непрерывного контроля. Нужен переход на электродвигатели с дюралюминиевыми роторами с целью недопущения быстрого развития эксцентриситета. При этом необходимо учитывать и то, что эксплуатационные расходы на машины с медной клеткой только за счет расхода электроэнергии увеличиваются на 240 тыс. р. на один электровоз.

### Список литературы

1. Макаров В.В., Иванов В.Н., Худогов А.М. Пути совершенствования асинхронного привода вспомогательных машин грузовых электровозов переменного тока // *Локомотив*. 2024. № 9 (213). С. 13–14.
2. Барэмбо К.Н., Бернштейн Л.М. Сушка, пропитка и компаундирование обмоток электрических машин. М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1961. 368 с.
3. Алексеев А.Е. Конструкция электрических машин. М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1958. 427 с.
4. Борхерт Р., Юбиц В. Техника инфракрасного нагрева. М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1963. 278 с.
5. Филиппов И.Ф. Теплообмен в электрических машинах. Л. : Энергоатомиздат, 1986. 256 с.
6. Ваксер Н.М. Изоляция электрических машин. Л. : ЛПИ, 1985. 81 с.
7. Анализ конструктивных особенностей элементов электромагнитной системы тяговых электродвигателей локомотивов / А.М. Худогов, Е.Ю. Дульский, В.Н. Иванов и др. // *Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф.* Иркутск, 2018. Т. 2. С. 351–355.
8. Малютин А.Ю. Особенности электромагнитных процессов асинхронных двигателей вспомогательных машин электровозов переменного тока // *Наука МИИТа – транспорту : тр. Всерос. науч.-практ. конф.* М., 2016. С. III-67.
9. Надежность асинхронных вспомогательных машин электровозов / А.М. Худогов, В.Н. Иванов, Д.А. Оленевич и др. // *Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та*. 2008. № 4 (36). С. 117–119.
10. Горский А.В., Воробьев А.А. Надежность электроподвижного состава. М. : Маршрут, 2005. 303 с.
11. Дейнеко В. Дуюнов Д., Иванов В. Изменение конструкции обмоток асинхронных электродвигателей – потенциал обеспечения надежности электросетей // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2015. № 2 (29). С. 48–55.
12. Орленко А.И., Ундрейтис А.А., Лыткина Е.М. К вопросу о надежности электровозов серии «Ермак» при их эксплуатации на Восточном полигоне ОАО «РЖД» // *Наука и техника транспорта*. 2024. № 1. С. 25–30.
13. Шрайбер М.А. Развитие остаточных напряжений в изоляции тяговых электродвигателей при отверждении пропиточного состава // *Транспорт Урала*. 2024. № 1 (80). С. 35–40.
14. Исследование процесса нагрева индуктора тягового линейного асинхронного двигателя для экспериментального стенда / В.А. Соломин, А.В. Соломин, Н.А. Трубицина и др. // *Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщ.* 2023. № 2 (90). С. 30–37.
15. Шрайбер М.А. Модернизация воздействия неоднородности материала изоляции тяговых электрических машин на процессы роста усталостных трещин // *Вестник транспорта Поволжья*. 2023. № 3 (99). С. 42–45.
16. Иванов П.Ю. Повышение эксплуатационной надежности асинхронных вспомогательных машин магистральных электровозов переменного тока : дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2015. 198 с.
17. Скворцова К.П. Влияние гармонических составляющих на режимы работы асинхронного двигателя // *Молодой ученый*. 2024. № 18 (517). С. 36–38.
18. Дульский Е.Ю. Научные основы теории упрочнения электрооборудования тягового подвижного состава тепловым излучением : дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2023. 394 с.

### References

1. Makarov V.V., Ivanov V.N., Khudonogov A.M. Puti sovershenstvovaniya asinkhronnogo privoda vspomogatel'nykh mashin gruzovykh elektrovozov peremennogo toka [Ways to improve the asynchronous drive of auxiliary machines for AC freight locomotives]. *Lokomotiv* [Locomotive], 2024, no 9 (213), pp. 13–14.
2. Barembo K.N. Bernstein L.M. Sushka, propitka i kompaundirovanie obmotok elektricheskikh mashin [Drying, impregnation and compounding of windings of electric machines]. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat Publ., 1961. 368 p.
3. Alekseev A.E. Konstruktsiya elektricheskikh mashin [Construction of electric machines]. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat Publ., 1958. 427 p.
4. Borkhert R., Yubits V. Tekhnika infrakrasnogo nagreva [Infrared heating technology]. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat Publ., 1963. 278 p.
5. Filippov I.F. Teploobmen v elektricheskikh mashinakh [Heat exchange in electric machines]. Leningrad: Energoatomizdat Publ., 1986. 256 p.

6. Vakser N.M. Izolyatsiya elektricheskikh mashin [Isolation of electrical machines]. Leningrad: LPI Publ., 1985. 31 p.
7. Khudonogov A.M., Dul'skii E.Yu., Ivanov V.N., Lobytsin I.O. Analiz konstruktivnykh osobennosti elementov elektromagnitnoi sistemy tyagovykh elektrodvigatelei lokomotivov [Analysis of the design features of the elements of the electromagnetic system of traction electric motors of locomotives]. *Materialy IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* [Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2018, Vol. 2, pp. 351–355.
8. Malyutin A.Yu. Osobennosti elektromagnitnykh protsessov asinkhronnykh dvigatelei vspomogatel'nykh mashin elektrovozov peremennogo toka [Features of electromagnetic processes of asynchronous motors of auxiliary machines of alternating current electric locomotives]. *Trudy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauka MIITa – transportu»* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference «Science of Moscow Institute of Engineers of Railway Transport for transport»]. Moscow, 2016, pp. III-67.
9. Khudonogov A.M., Ivanov V.N., Olentsevich D.A., Lytkina E.M. Nadezhnost' asinkhronnykh vspomogatel'nykh mashin elektrovozov [Reliability of asynchronous auxiliary machines of electric locomotives]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University], 2008, no 4 (36), pp. 117–119.
10. Gorskii A.V., Vorob'ev A.A. Nadezhnost' elektropodvizhnogo sostava [Reliability of electric rolling stock]. Moscow: Marshrut Publ., 2005. 303 p.
11. Deineko V., Duyunov D., Ivanov V. Izmenenie konstruktssii obmotok asinkhronnykh elektrodvigatelei – potentsial obespecheniya nadezhnosti elektrosetei [Changing the design of windings of asynchronous electric motors is the potential for ensuring the reliability of power grids]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie* [Electric Power. Transmission and distribution], 2015, no 2 (29), pp. 48–55.
12. Orlenko A.I., Undraitis A.A., Lytkina E.M. K voprosu o nadezhnosti elektrovozov serii «Ermak» pri ikh ekspluatatsii na Vostochnom poligone OAO «RZhD» [On the issue of reliability of electric locomotives of the Ermak series during their operation at the Eastern Polygon of JSC Russian Railways]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and Technology of Transport], 2024, no 1, pp. 25–30.
13. Shraiber M.A. Razvitie ostatochnykh napryazhenii v izolyatsii tyagovykh elektrodvigatelei pri otverzhenii propitochnogo sostava [The development of residual stresses in the insulation of traction electric motors during the curing of the impregnation compound]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2024, no 1 (80), pp. 35–40.
14. Solomin V.A., Solomin A.V., Trubitsina N.A., Zamshina L.L., Chekhova A.A. Issledovanie protsessa nagreva induktora tyagovogo lineinogo asinkhronnogo dvigatelya dlya eksperimental'nogo stenda [Investigation of the heating process of an inductor of a traction linear asynchronous motor for an experimental stand]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2023, no 2 (90), pp. 30–37.
15. Shraiber M.A. Modernizatsiya vozdeistviya neodnorodnosti materiala izolyatsii tyagovykh elektricheskikh mashin na protsessy rosta ustalostnykh treshchin [Modernization of the impact of the heterogeneity of the insulation material of traction electric machines on the processes of fatigue crack growth]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Transport of the Volga region], 2023, no 3 (99), pp. 42–45.
16. Ivanov P.Yu. Povyshenie ekspluatatsionnoi nadezhnosti asinkhronnykh vspomogatel'nykh mashin magistral'nykh elektrovozov peremennogo toka [Improving the operational reliability of asynchronous auxiliary machines of mainline electric locomotives of alternating current]. Ph.D.'s theses. Irkutsk, 2015. 198 p.
17. Skvortsova K.P. Vliyaniye garmonicheskikh sostavlyayushchikh na rezhimy raboty asinkhronnogo dvigatelya [The influence of harmonic components on the operating modes of an asynchronous motor]. *Molodoi uchenyi* [Young Scientist], 2024, no 18 (517), pp. 36–38.
18. Dul'skii E.Yu. Nauchnye osnovy teorii uprochneniya elektrooborudovaniya tyagovogo podvizhnogo sostava teplovym izlucheniem [Scientific foundations of the theory of strengthening electrical equipment of traction rolling stock by thermal radiation]. Doctor's theses. Saint Petersburg, 2023. 394 p.

### Информация об авторах

**Макаров Виктор Васильевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: makarov\_vv@itgups.ru.

**Иванов Владимир Николаевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: v.n.ivanov40161@yandex.ru.

**Худоногов Анатолий Михайлович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: a.hudonogov@yandex.ru.

### Information about the authors

**Viktor V. Makarov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: makarov\_vv@itgups.ru.

**Vladimir N. Ivanov**, Ph.D. Engineering in Science, Associate Professor of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: v.n.ivanov40161@yandex.ru.

**Anatolii M. Khudonogov**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: a.hudonogov@yandex.ru.