

УДК 629.1.02

Математическая модель колесно-моторного блока локомотива для условий технологического процесса диагностирования подшипниковых узлов на позиции виброакустического контроля

М. Ш. Шадмонходжаев, А. П. Зеленченко, И. А. Ролле

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Шадмонходжаев М. Ш., Зеленченко А. П., Ролле И. А. Математическая модель колесно-моторного блока локомотива для условий технологического процесса диагностирования подшипниковых узлов на позиции виброакустического контроля // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 832-838. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-832-838

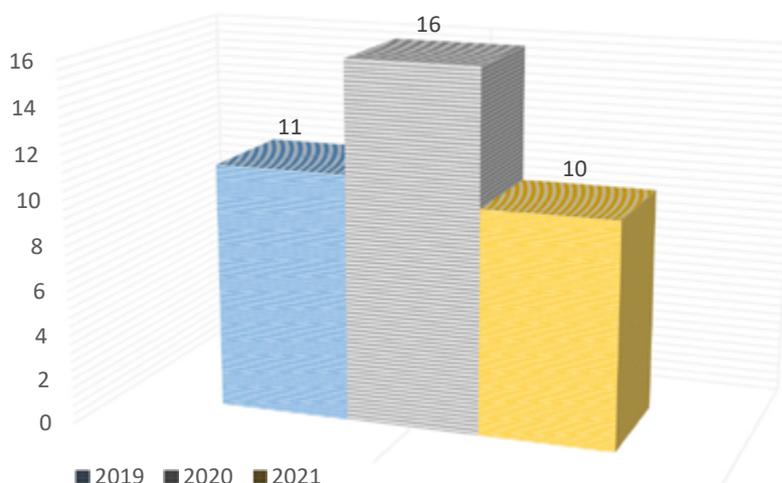
Аннотация

Цель: Проведение экспериментальных исследований в условиях локомотивного депо, переход к математическому моделированию колесно-моторного блока для условий позиции безразборной диагностики подшипников тягового электрического двигателя. **Методы:** Диагностические комплексы, позволяющие определять техническое состояние колесно-моторного блока в локомотивных депо. С целью определения подходов для выбора и оценки параметров источников питания для позиции безразборной виброакустической диагностики колесно-моторных блоков локомотивного депо выполнен анализ методологии проектирования математической модели колесно-моторных блоков. **Результаты:** Определен момент инерции колесной пары, соединенной с якорем электрического двигателя для условий процесса диагностирования подшипниковых узлов колесно-моторного блока. **Практическая значимость:** Выполнен эксперимент в локомотивном депо «Узбекистон» АО «Узбекистон темир йуллари» по определению момента инерции колесно-моторного блока и момента сопротивления вращению.

Ключевые слова: Электроподвижной состав, источник питания, тяговый электродвигатель, колесно-моторный блок, виброакустическая диагностика, момент инерции.

Повышение безопасности движения поездов является одной из приоритетных задач в компании АО «Узбекистан темир йуллари», что неразрывно связано со структурными преобразованиями, реализуемыми на железнодорожном транспорте, а также с мероприятиями, направленными на повышение безотказности технических средств. Наиболее ответственными в этом отношении являются подшипниковые узлы колесно-мотор-

ных блоков локомотивов. Внедрение в локомотиворемонтном производстве технологических процессов диагностирования подшипниковых узлов, основанных на анализе виброакустических проявлений в процессе их работы, характеризуется высокой эффективностью, о чем свидетельствуют данные по выявленным дефектам за период 2019–2021 гг. (рис. 1). Соответствующие диагностические комплексы находят массовое



Дефекты подшипников	Количество за месяц												Сумма
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	
Количество за год													
2019	1	—	1	1	2	2	1	1	1	1	—	—	11
2020	1	1	1	1	2	—	3	1	2	1	1	1	16
2021	2	1	1	1	1	2	—	—	—	—	—	—	10
Итого													37

Рис. 1. Данные о выявленных дефектах подшипников за период 2019–2021 гг., по данным депо «Узбекистон»

применение в локомотивных депо при производстве текущих ремонтов в объеме ТР-1 [1–3].

Одним из основных элементов комплекса виброакустической диагностики подшипниковых узлов колесно-моторных блоков является его источник питания, используемый для приведения во вращение якоря тягового электродвигателя и колесной пары [1–4].

Согласно требованиям к технологическому процессу диагностики источник питания должен обеспечивать:

- диапазон частот вращения до $n = 200$ об/мин;
- требуемое значение мощности источника питания;
- высокие энергетические характеристики (КПД, коэффициент мощности, низкий коэффициент пульсаций в цепи тягового электродвигателя, допустимая эмиссия высших гармоник в питающую цеховую сеть).

Условие соблюдения всех этих требований влечет за собой необходимость разработки и создания источника питания, адаптированного для условий процесса диагностики [5–8].

В этой связи целесообразно моделирование совместной работы системы «источник питания — колесно-моторный блок» с учетом ее электрических, а также механических характеристик, таких как момент инерции J и момент сопротивления M_c [9].

Эти параметры связаны известным уравнением: для случая питания от сети:

$$J \frac{d\omega}{dt} = (M_{вр} - M_c)$$

или для режима выбега:

$$J \frac{d\omega}{dt} = -M_c,$$

где $M_{вр}$ — вращающий момент тягового двигателя, Н · м;

ω — угловая скорость вращения якоря, рад/с.

Момент сопротивления вращению колесно-моторного блока M_c имеет множество составляющих, в связи с чем аналитическое определение его затруднено. Аналогично затруднено и аналитическое определение момента инерции вращающихся частей J .

Зачастую неизвестные параметры M_c и J проще определить экспериментально.

Момент сопротивления возможно определить исходя из величины затрат мощности P_b на преодоление сил сопротивления при работе колесно-моторного блока при оборотах n_d . Ее можно определить экспериментально исходя из значений тока, потребляемого двигателем I_d и подведенного напряжения U_d , сопротивления обмоток, Вт:

$$P_b = P_{xx} - \Delta P_{щ} - \Delta P_m,$$

где $P_{xx} = U_d I_d$ — мощность, потребляемая из сети, Вт;

$P_{щ} = \Delta U_{щ} I_d$ — потери мощности в щеточном контакте тягового электродвигателя, Вт,
 $\Delta U_{щ} = 2B$;

$\Delta P_m = I_{cp}^2 \sum R$ — потери мощности в меди цепи обмоток тягового электродвигателя, Вт.

Полное сопротивление обмоток $\sum R$ для тягового электродвигателя представляет сумму сопротивлений обмоток якоря, главных и добавочных полюсов, компенсационной обмотки, с учетом приведения их значений к текущему значению температуры обмоток.

В результате момент сопротивления, приведенный к валу якоря тягового электродвигателя, Н · м:

$$M_c = \frac{60P_b}{2\pi n_d}.$$

Момент инерции вращающихся частей возможно определить исходя из изменения скорости вращения якоря тягового электродвигателя (колесной пары) во времени, кг · м²:

$$J = \frac{60M_c \Delta t}{2\pi \Delta n},$$

где изменение скорости вращения Δn (об/мин) определяется за время Δt (с) экспериментально, при работе колесно-моторного блока в режиме выбега.

Указанные эксперименты предназначены для колесно-моторного блока электровоза ВЛ80с с тяговым электродвигателем НБ-418кб и колесно-моторного блока электропоезда ЭР9М с тяговым электродвигателем РТ-51Д на позиции виброакустической диагностики локомотивного депо «Узбекистон» (рис. 2, а, б).

По приведенным зависимостям были определены искомые параметры для колесно-моторного блока электровоза ВЛ80с (см. табл.).

На основании полученных результатов была составлена имитационная модель системы «источник питания — колесно-моторный блок» в программе Matlab/Simulink (рис. 3, 4). Адекватность модели подтверждена результатами эксперимента, проведенного в локомотивном депо «Узбекистон». Расхождения результатов ряда

Параметры работы колесно-моторного блока электровоза ВЛ80с на позиции виброакустической диагностики

Измеренные значения		Рассчитанные значения					
I_d	U_d	J	M_c	P_b	P_{xx}	$\Delta P_{щ}$	ΔP_m
А	В	кг · м ²	Н · м	Вт	Вт	Вт	Вт
20	58	645	81,61	1107,7	1160	40	12,32

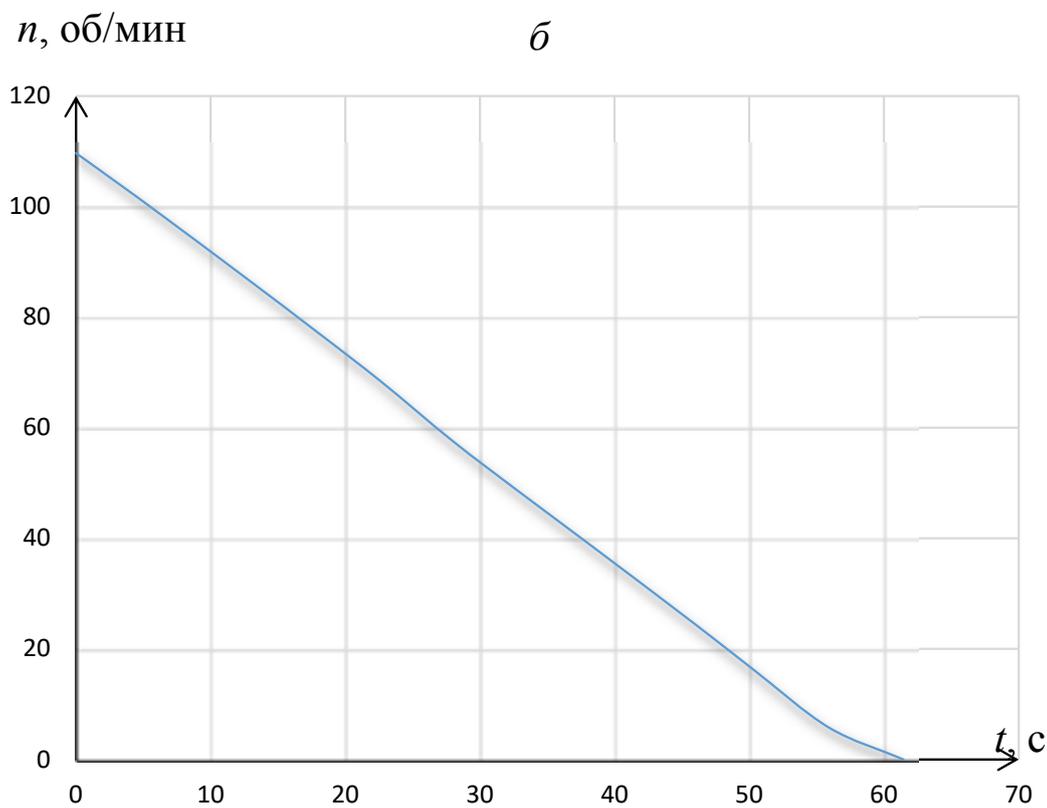
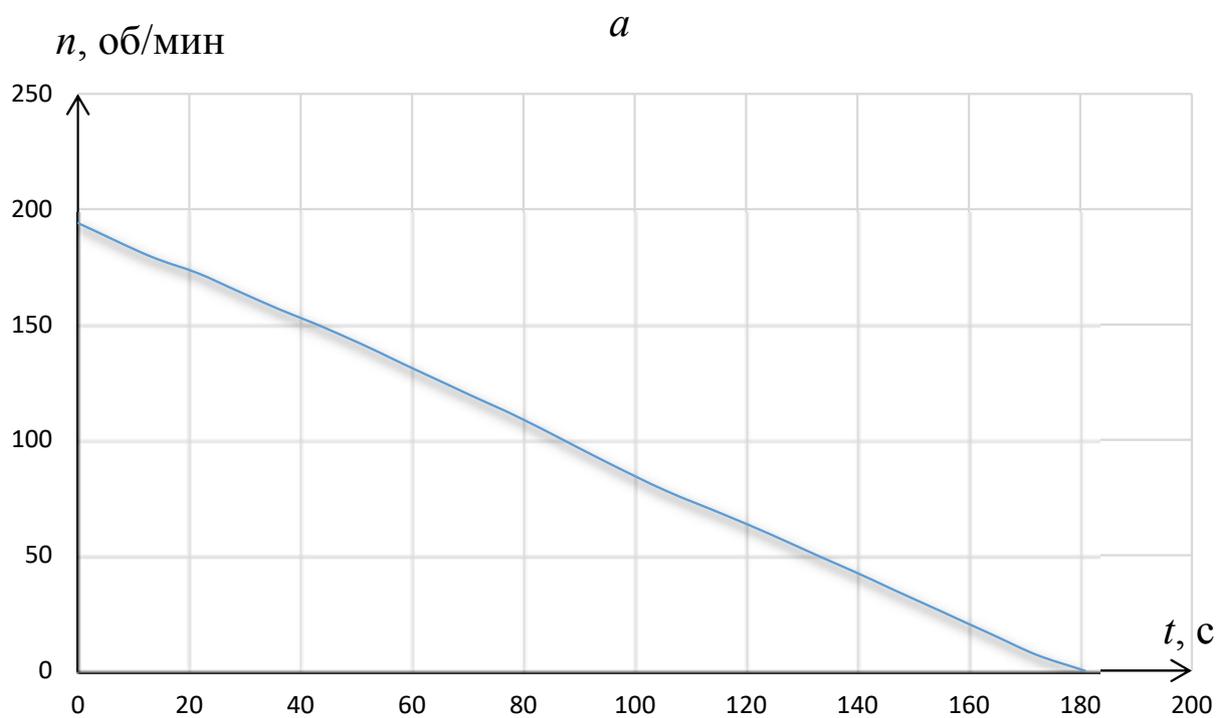


Рис. 2. Экспериментальные кривые выбега вращающихся частей колесно-моторных блоков электроваза ВЛ80с (*a*) и электропоезда ЭР9М (*б*)

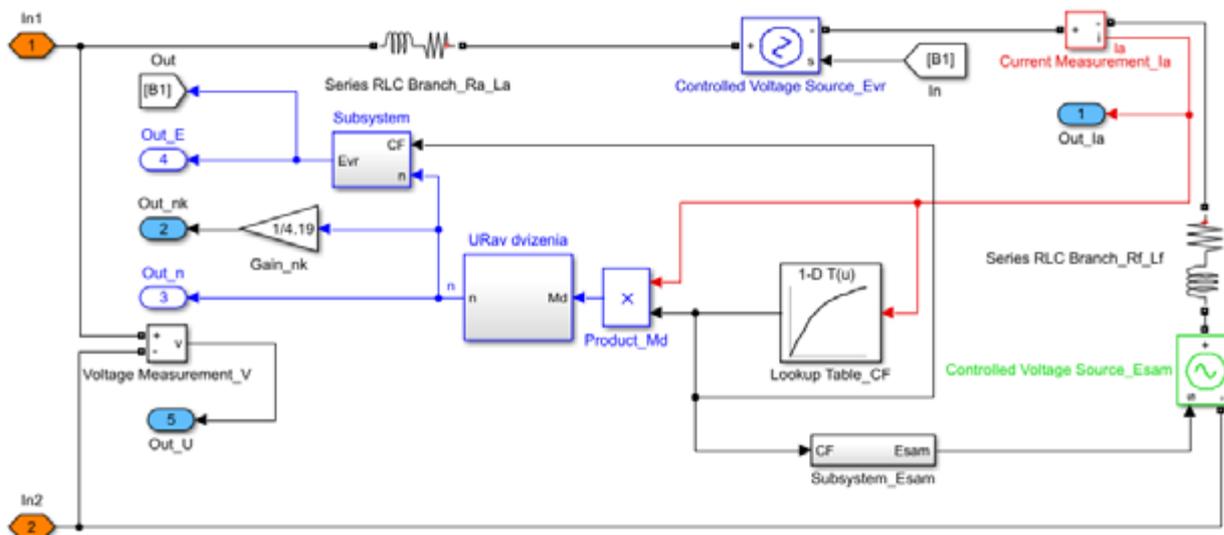


Рис. 3. Математическая модель колесо-моторного блока электровоза ВЛ80С в программе MatLab/Simulink

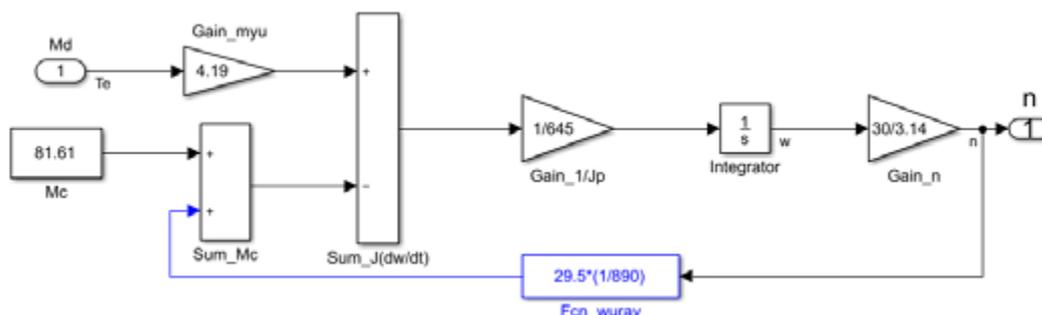


Рис. 4. Математическая модель механической части колесо-моторного блока электровоза ВЛ80С в программе MatLab/Simulink

экспериментов и результатов моделирования по значениям конечной скорости вращения, а также времени разгона и выбега не превышает 10 %.

Библиографический список

1. Зеленченко А. П. Надежность электрического подвижного состава: учебное пособие / А. П. Зеленченко. — СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения, 2001. — 37 с.
2. Зеленченко А. П. Техническая диагностика электрического подвижного состава: учебное пособие / А. П. Зеленченко, А. Е. Цаплин, И. А. Ролле. — СПб.: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2016. — 68 с.

3. Зеленченко А. П. Диагностика электрооборудования силовой схемы моторного вагона электропоезда ЭР2: учебное пособие / А. П. Зеленченко. — СПб.: МПС РФ «ПГУПС», 1999. — 28 с.

4. Зеленченко А. П. Диагностические комплексы электрического подвижного состава: учеб. пособие / А. П. Зеленченко, Д. В. Федоров. — М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2014. — 112 с.

5. Шадмонходжаев М. Ш. Позиция диагностики межкатушечных соединений тягового двигателя / М. Ш. Шадмонходжаев, А. П. Зеленченко // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы. — 2019. — С. 78–81.

6. Шадмонходжаев М. Ш. Позиция виброакустической диагностики подшипников качения электрического подвижного состава / М. Ш. Шадмонходжаев, А. П. Зеленченко // Материалы X Международного симпозиума «Элтранс — 2019» ФГБОУ ВО ПГУПС. — СПб., 2019. — С. 63–69.

7. Зеленченко А. П. Источник питания для позиции безразборной диагностики подшипников / А. П. Зеленченко, А. А. Богдан, М. Ш. Шадмонходжаев // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2021. — Т. 18. — Вып. 4. — С. 554–560.

8. Шадмонходжаев М. Ш. Разработка источника питания для позиции виброакустической диагностики подшипников локомотивного депо / М. Ш. Шадмонходжаев, А. П. Зеленченко // Бюллетень результатов науч-

ных исследований. — 2022. — Вып. 2. — С. 43–49. — DOI: 10.20295/2223-9987-2022-2-43-49

9. Осипов С. И. Теория электрической тяги. Руководство к выполнению лабораторных работ для студентов V курса / С. И. Осипов. — М., 2005.

Дата поступления: 26.09.2022

Решение о публикации: 06.11.2022

Контактная информация:

ШАДМОНХОДЖАЕВ Муродилла Шухратиллаевич — аспирант; smurodilla@gmail.com

ЗЕЛЕНЧЕНКО Алексей Петрович — канд. техн. наук, доц.; v-zelenchenko46@mail.ru

РОЛЛЕ Игорь Александрович — канд. техн. наук, доц.; igor.rollet@inbox.ru

Mathematical Model of Locomotive Wheel-Motor Block for the Conditions of Diagnostics Technological Process for Bearing Units at the Position of Vibroacoustic Control

M. Sh. Shadmonkhodjaev, A. P. Zelenchenko, I. A. Rolle

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Shadmonkhodjaev M. Sh., Zelenchenko A. P., Rolle I. A. Mathematical Model of Locomotive Wheel-Motor Block for the Conditions of Diagnostics Technological Process for Bearing Units at the Position of Vibroacoustic Control // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 4, pp. 832–838. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-832-838

Summary

Purpose: The conduction of experimental studies in the conditions of locomotive depot, the transition to mathematical modeling of wheel-motor block for the conditions of diagnostics position, not allowing disassembly, of traction electric motor bearings. **Methods:** Diagnostic complexes allowing to determine wheel-motor block technical state in locomotive depots. In order to determine the approaches for the choice and evaluation of power source parameters for vibroacoustic diagnostics position, not allowing disassembly, of wheel-motor blocks of locomotive depot the analysis of designing methodology for wheel-motor block mathematical model was carried out. **Results:** Inertia moment of wheelset connected to electric motor anchor is determined for the conditions of diagnostics process of bearing units of a wheel-motor block. **Practical significance:** Experiment in “Uzbekiston” locomotive depot of JSC “Uzbekiston Temir Yullari” to determine inertia moment of wheel-motor block and resistance to rotation moment was carried out.

Keywords: Electric rolling stock, power source, traction electric motor, wheel-motor block, vibroacoustic diagnostics, inertia moment.

References

1. Zelenchenko A. P. *Nadezhnost' elektricheskogo podvizhnogo sostava: uchebnoe posobie* [Reliability of electric rolling stock: a tutorial]. St. Petersburg: Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2001, 37 p. (In Russian)
2. Zelenchenko A. P., Tsaplin A. E., Rolle I. A. *Tekhnicheskaya diagnostika elektricheskogo podvizhnogo sostava: uchebnoe posobie* [Technical diagnostics of electric rolling stock: textbook]. St. Petersburg: FGBOU VPO PGUPS Publ., 2016, 68 p. (In Russian)
3. Zelenchenko A. P. *Diagnostika elektrooborudovaniya silovoy skhemy motornogo vagona elektropoezda ER2: uchebnoe posobie* [Diagnostics of the electrical equipment of the power circuit of the motor car of the ER2 electric train: a tutorial]. St. Petersburg: MPS RF "PGUPS" Publ., 1999, 28 p. (In Russian)
4. Zelenchenko A. P., Fedorov D. V. *Diagnosticheskie komplekсы elektricheskogo podvizhnogo sostava: ucheb. posobie* [Diagnostic complexes of electric rolling stock: tutorial]. Moscow: FGBOU "Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte" Publ., 2014, 112 p. (In Russian)
5. Shadmonkhodzhaev M. Sh., Zelenchenko A. P. *Pozitsiya diagnostiki mezhkatushechnykh soedineniy tyagovogo dvigatelya* [Position of diagnostics of intercoil connections of the traction motor]. *Transport: problemy, idei, perspektivy* [Transport: problems, ideas, prospects]. 2019, pp. 78–81. (In Russian)
6. Shadmonkhodzhaev M. Sh., Zelenchenko A. P. *Pozitsiya vibroakusticheskoy diagnostiki podshipnikov kacheniya elektricheskogo podvizhnogo sostava* [Position of vibroacoustic diagnostics of rolling bearings of electric rolling stock]. St. Petersburg, 2019, pp. 63–69. (In Russian)
7. Zelenchenko A. P., Bogdan A. A., Shadmonkhodzhaev M. Sh. *Istochnik pitaniya dlya pozitsii bezrazbornoy diagnostiki podshipnikov* [Power supply for CIP bearing position]. *Izvestiya Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the St. Petersburg State University of Communications]. St. Petersburg: PGUPS, 2021, vol. 18, I. 4, pp. 554–560. (In Russian)
8. Shadmonkhodzhaev M. Sh., Zelenchenko A. P. *Razrabotka istochnika pitaniya dlya pozitsii vibroakusticheskoy diagnostiki podshipnikov lokomotivnogo depo* [Development of a power source for the position of vibroacoustic diagnostics of bearings of a locomotive depot]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of Research Results]. 2022, I. 2, pp. 43–49. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-2-43-49. (In Russian)
9. Osipov S. I. *Teoriya elektricheskoy tyagi. Rukovodstvo k vypolneniyu laboratornykh rabot dlya studentov V kursa* [Theory of electric traction. Guide to the implementation of laboratory work for students of the 5th year]. Moscow, 2005. (In Russian)

Received: September 26, 2022

Accepted: November 06, 2022

Author's information:

Murodilla Sh. SHADMONKHODJAEV — Postgraduate Student; smurodilla@gmail.com

Aleksey P. ZELENCHENKO — PhD in Engineering, Associate Professor; v-zelenchenko46@mail.ru

Igor A. ROLLE — PhD in Engineering, Associate Professor; igor.rollet@inbox.ru