

УДК: 629.4.016.2

Определение затрат энергии на подзарядку аккумуляторной батареи тепловоза по данным микропроцессорной системы управления

Д. Н. Курилкин

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

Для цитирования: Курилкин Д. Н. Определение затрат энергии на подзарядку аккумуляторной батареи по данным микропроцессорных систем управления // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 1. — С. 68–74.

DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-68-74

Аннотация

Цель: Разработка и апробация методики определения затрат энергии на подзарядку аккумуляторной батареи тепловоза с целью уточнения тяговых расчетов. При определении затрат энергии на подзарядку аккумуляторной батареи необходимо учитывать текущее состояние как самой батареи, так и осуществляющего ее подзарядку стартер-генератора. Эта задача может быть решена в результате статистического анализа информации, регистрируемой подсистемой бортовой диагностики современных тепловозов. **Методы:** Предложены методы препроцессорной обработки массива информации и статистического анализа сформированной выборки. **Результаты:** Определены вероятные значения мощности, затрачиваемой на подзарядку аккумуляторной батареи в процессе эксплуатации тепловоза. С вероятностью 95 % для 14 секций тепловозов серии 2ТЭ116У средняя зарядная мощность аккумуляторной батареи не превышает 2,6 кВт при математическом ожидании 1,4 кВт. **Практическая значимость:** Полученные результаты позволяют уточнить величину мощности отбираемой на вспомогательные нужды и, как следствие, повысить точность определения тягово-энергетических свойств локомотива.

Ключевые слова: Энергоэффективность, аккумуляторная батарея, затраты энергии на подзарядку аккумуляторной батареи, вспомогательные нагрузки.

Введение

Решение задачи повышения энергоэффективности локомотивной тяги за счет оптимизации режимов управления локомотивом предполагает выполнение предварительных тяговых расчетов, точность которых во многом определяется достоверностью исходных данных, в том числе информацией реальных тяговых и энергетических характеристиках локомотивов.

Известно, что уровень энергоэффективности тепловоза в эксплуатации определяется главным образом техническим и теплотехническим состоянием его дизеля [1–4]. Влияние технического состояния вспомогательных механизмов не столь существенно, однако от него зависит

выбор режимов ведения поезда при необходимости выдержки времени хода по перегону. Особенно большое влияние изменение технического состояния вспомогательных нагрузок оказывает на тяговую характеристику локомотива в номинальных режимах его работы.

Затраты энергии на подзарядку аккумуляторной батареи являются одной из составляющих затрат энергии на вспомогательные нагрузки автономного локомотива. Микропроцессорные системы управления и подсистемы бортовой диагностики современных тепловозов позволяют решить задачу прогнозирования этих затрат с высокой точностью и достоверностью [5].

Целью данной работы является разработка и апробация методики прогнозирования затрат энергии на подзарядку аккумуляторной батареи тепловоза при расчете уточненной тяговой характеристики.

В статье приведено решение данной задачи применительно к тепловозам серии 2ТЭ116У, однако подобный подход может быть использован и для других серий локомотивов [4].

Определение мощности, затрачиваемой на зарядку аккумуляторной батареи

Мощность для зарядки аккумуляторной батареи можно определить как произведение напряжения стартер-генератора (бортовой сети) на величину зарядного тока, при этом потери в стартер-генераторе, от которого осуществляется зарядка, учитываются величиной его коэффициента полезного действия $\eta_{стг}$, который может быть принят равным 0,85 [6, 7]:

$$P_{заб} = \frac{U_{бс} \cdot I_{заб}}{\eta_{стг}}, \quad (1)$$

где $U_{бс}$ — напряжение бортовой сети, В;

$I_{заб}$ — ток заряда аккумуляторной батареи, А.

Учитывая большое количество различных факторов, влияющих на величину зарядного тока (техническое состояние батареи и текущий уровень ее заряда, температура окружающей среды, величина напряжения бортовой сети), можно предположить, что значение мощности, затрачиваемой на зарядку аккумуляторной батареи, является случайной величиной, что позволяет в расчете использовать ее математическое ожидание с обязательной проверкой гипотезы о нормальном законе распределения [8, 9]. Проверка гипотезы о нормальном законе распределения осуществляется с использованием метода Е. И. Пустыльника [8], согласно которому условием соответствия выборки нормальному

закону распределения является выполнение условий:

$$|A_{P_{заб}}| \leq 3 \cdot \sqrt{D(A_{P_{заб}})}; \quad (2)$$

$$|E_{P_{заб}}| \leq 5 \cdot \sqrt{D(E_{P_{заб}})}; \quad (3)$$

где $A_{P_{заб}}$ и $E_{P_{заб}}$ — асимметрия и эксцесс выборки мощности, затрачиваемой на зарядку аккумуляторной батареи;

$D(A_{P_{заб}})$ и $D(E_{P_{заб}})$ — дисперсия асимметрии и эксцесса выборки. Указанные параметры определяются по следующим зависимостям:

$$A_{P_{заб}} = \frac{1}{n \cdot S_{P_{заб}}^3} \cdot \sum_{i=1}^n (P_{забi} - \overline{P_{заб}})^3; \quad (4)$$

$$E_{P_{заб}} = \frac{1}{n \cdot S_{P_{заб}}^4} \cdot \sum_{i=1}^n (P_{забi} - \overline{P_{заб}})^4 - 3; \quad (5)$$

$$D(A_{P_{заб}}) = \frac{6 \cdot (n-1)}{(n+1) \cdot (n+3)}; \quad (6)$$

$$D(E_{P_{заб}}) = \frac{24 \cdot n \cdot (n-2) \cdot (n-3)}{(n+1)^2 \cdot (n+3) \cdot (n+5)}, \quad (7)$$

где i — номер замера; n — число замеров и вычислений мощности, затрачиваемой на подзарядку аккумуляторной батареи;

$P_{забi}$ — мощность, затрачиваемая на зарядку аккумуляторной батареи, полученная после вычислений по результатам замера (Вт);

$\overline{P_{заб}}$ — математическое ожидание мощности, затрачиваемой на подзарядку аккумуляторной батареи (Вт);

$S_{P_{заб}}$ — среднеквадратичное отклонение выборки определения мощности, затрачиваемой на подзарядку аккумуляторной батареи.

Математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение мощности, затрачиваемой на

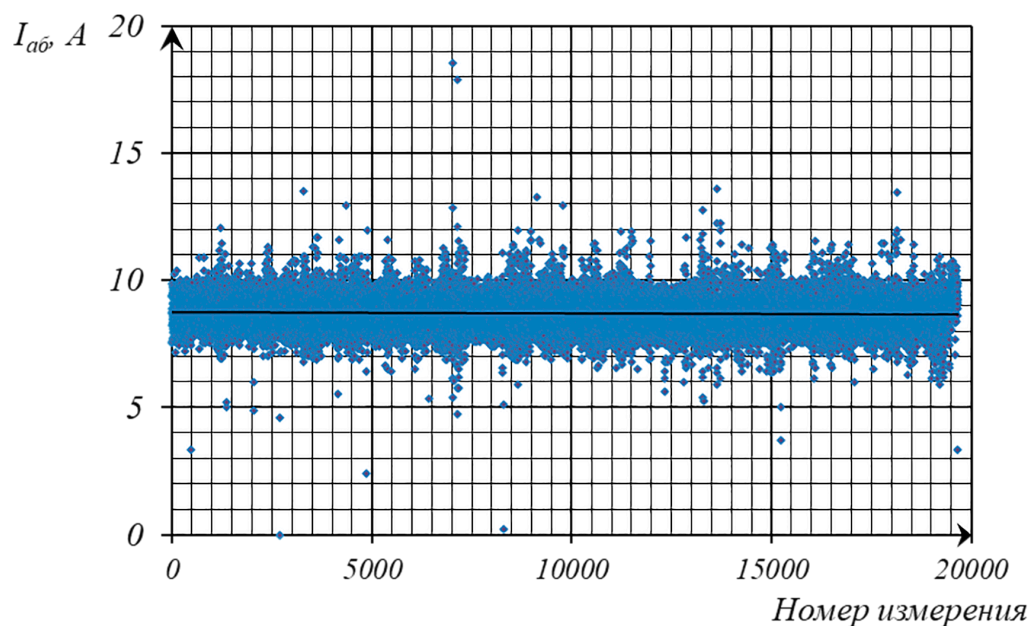


Рис. 1. Результаты измерения тока подзарядки аккумуляторной батареи тепловоза 2ТЭ116У № 078 (секция А)

подзарядку аккумуляторной батареи, определяются по формулам:

$$\overline{P_{\text{заб}}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n P_{\text{заб}i}; \quad (8)$$

$$S_{P_{\text{заб}}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (P_{\text{заб}i} - \overline{P_{\text{заб}}})^2}. \quad (9)$$

Для устранения влияния переходных процессов в бортовой сети на результаты определения зарядной мощности аккумуляторной батареи в процессе движения поезда из исходного массива данных должны быть исключены:

- периоды запуска дизеля и первые полчаса работы после них (эти периоды времени характеризуются повышенными значениями зарядного тока);
- периоды работы тормозного компрессора, характеризующиеся значительными колебаниями напряжения бортовой сети.

Характер изменения тока заряда аккумуляторной батареи в установившихся режимах работы силовой цепи тепловоза 2ТЭ116У № 078А показан на рис. 1.

Группированный статистический ряд значений зарядной мощности, соответствующий токам на рис. 1, приведен на рис. 2.

Результаты статистической обработки значений параметров узла зарядки аккумуляторной батареи для 14 секций тепловозов серии 2ТЭ116У приведены в табл. 1.

Как следует из табл. 1, математическое ожидание мощности, затрачиваемой на подзарядку аккумуляторной батареи для различных секций тепловозов, находится в пределах от 514 до 1417 Вт, а математическое ожидание тока подзарядки аккумуляторной батареи составляет от 3,98 до 10,94 А. У двух секций из 14 зафиксированы отклонения напряжения бортовой сети более четырех вольт от номинального значения.

Гипотеза о нормальном законе распределения мощности на подзарядку аккумуляторной батареи не нашла подтверждения ни для одной из секций тепловозов, так как фактические значения асимметрии и эксцесса существенно превосходят свои допустимые значения.

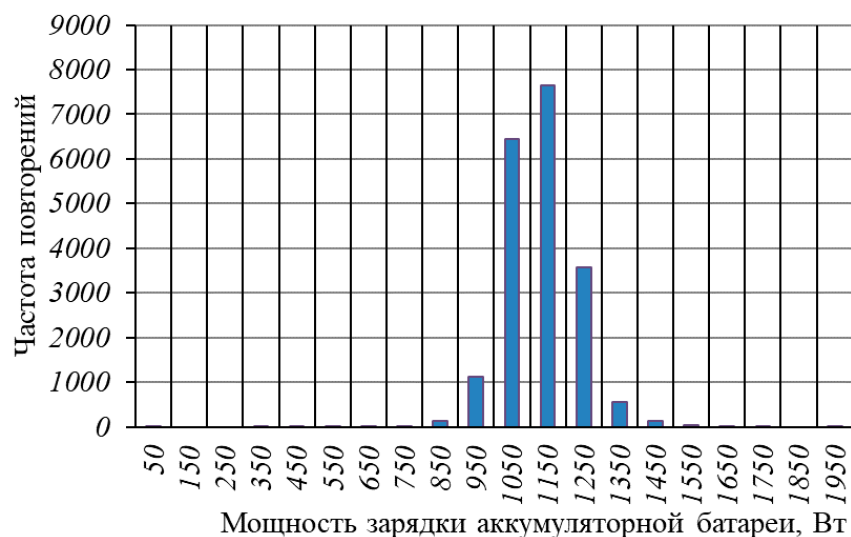


Рис. 2. Группированный статистический ряд значений мощности, затрачиваемой на подзарядку аккумуляторной батареи тепловоза 2ТЭ116У № 078 (секция А)

ТАБЛИЦА 1. Результаты определения затрат мощности на подзарядку аккумуляторной батареи

№ п/п	Локомотив (секция)	n	Ток батареи, А		Напряжение сети, В		Мощность, затрачиваемая на подзарядку батареи, Вт					
			МО	СКО	МО	СКО	МО	СКО	АС	ЭК	Доп. А	Доп. Э
1	078 (А)	19 652	8,70	0,75	110,45	0,15	1130	98	0,48	9,8	0,05	0,17
2	078 (Б)	30 817	9,66	1,08	103,74	0,26	1179	137	12,3	723	0,04	0,14
3	079 (А)	30 464	7,30	0,71	110,07	0,17	945	93	0,27	7,3	0,04	0,14
4	080 (А)	30 047	7,27	1,32	108,53	0,26	929	170	1,93	68,6	0,04	0,14
5	082 (Б)	29 686	9,29	1,38	110,13	0,33	1204	179	1,34	12,2	0,04	0,14
6	107 (А)	10 919	6,77	1,21	110,75	0,63	882	158	0,07	6,21	0,07	0,23
7	109 (Б)	24 524	3,98	1,76	109,62	0,29	514	228	0,26	0,008	0,05	0,16
8	110 (А)	19 819	4,56	2,96	105,56	0,37	566	368	0,31	-0,93	0,05	0,17
9	124 (Б)	26 103	5,86	0,79	110,15	0,16	760	103	2,89	86,6	0,05	0,15
10	135 (А)	23 614	5,83	1,76	110,78	0,21	760	230	-0,88	15,6	0,05	0,16
11	143 (А)	15 527	4,39	3,77	109,68	0,44	565	485	1,01	-0,55	0,06	0,20
12	143 (Б)	28 260	6,77	2,68	109,98	0,24	875	345	-0,34	-1,67	0,04	0,15
13	154 (А)	18 393	8,38	1,98	110,98	0,34	1095	261	5,23	27,3	0,05	0,18
14	154 (Б)	19 325	10,94	1,60	110,04	0,25	1417	208	-1,95	15,5	0,05	0,18

Примечание: n — число измерений для данной секции; МО — математическое ожидание величины; СКО — среднеквадратичное отклонение величины; АС — асимметрия измерения; ЭК — эксцесс измерения; Доп. А — допустимая асимметрия измерения мощности подзарядки аккумуляторной батареи; Доп. Э — допустимый эксцесс

Согласно [8], в этом случае для оценки доверительного интервала величины мощности $P_{\text{заб}}$, затрачиваемой на подзарядку аккумуляторной батареи, необходимо воспользоваться следствием из неравенства Чебышева в следующем виде:

$$\begin{aligned} \bar{P}_{\text{заб}} - S_{P_{\text{заб}}} \cdot p \cdot \sqrt{\frac{1}{1-p}} \leq P_{\text{заб}} \leq \\ \leq \bar{P}_{\text{заб}} + S_{P_{\text{заб}}} \cdot p \cdot \sqrt{\frac{1}{1-p}}, \end{aligned} \quad (10)$$

где p — вероятность нахождения мощности, затрачиваемой на подзарядку аккумуляторной батареи в рассматриваемом интервале.

Приняв вероятность нахождения мощности батареи в заданном диапазоне 0,95 (95 %), получим:

$$\overline{P}_{заб} - 4,24 \cdot S_{P_{заб}} \leq P_{аб} \leq \overline{P}_{аб} + 4,24 \cdot S_{P_{заб}} \quad (11)$$

При этом очевидно, что отрицательные значения мощности, отбираемой на подзарядку аккумуляторной батареи, не будут иметь физического смысла.

Результаты расчета доверительного интервала значений зарядной мощности для доверительной вероятности 95 % приведены в табл. 2.

Как следует из результатов, приведенных в табл. 2, максимальное значение мощности, отбираемой на подзарядку аккумуляторной батареи, не превышает 2,6 кВт. С учетом того, что даже на первой позиции контроллера мощность дизель-генераторной установки составляет 120 кВт, затраты мощности на подзарядку аккумуляторной батареи могут быть оценены на уровне не более 2–2,5 % от мощности дизель-генератора, что позволяет при расчете тяговой характеристики локомотива использовать величину математического ожидания зарядной мощности, вычисленную по данным подсистемы диагностики тепловоза за предшествующий период эксплуатации.

Выводы

1. Предложена методика определения затрат энергии на подзарядку аккумуляторной батареи тепловоза по данным подсистемы бортовой диагностики.

2. С вероятностью 95 % средняя зарядная мощность аккумуляторной батареи тепловоза серии 2ТЭ116У в процессе эксплуатации не превышает 2,6 кВт при математическом ожидании от 570 до 1420 Вт.

ТАБЛИЦА 2. Результаты расчета доверительного интервала мощности, затрачиваемой на подзарядку аккумуляторной батареи

№ п/п	Локомотив (секция)	Мощность, затрачиваемая на подзарядку батареи, Вт			
		МО	СКО	Min	Max
1	078 (А)	1130	98	814	1545
2	078 (Б)	1179	137	598	1760
3	079 (А)	945	93	551	1339
4	080 (А)	929	170	208	1650
5	082 (Б)	1204	179	445	1962
6	107 (А)	882	158	212	1552
7	109 (Б)	514	228	0	1481
8	110 (А)	566	368	0	2126
9	124 (Б)	760	103	323	1197
10	135 (А)	760	230	0	1735
11	143 (А)	565	485	0	2621
12	143 (Б)	875	345	0	2338
13	154 (А)	1095	261	0	2201
14	154 (Б)	1417	208	535	2298

Примечание: МО — математическое ожидание мощности, отбираемой на подзарядку аккумуляторной батареи, Вт; СКО — величина среднеквадратичного отклонения, Вт; Min — минимальное значение доверительного интервала, Вт; Max — максимальное значение доверительного интервала, Вт.

3. Полученные результаты позволяют повысить точность расчета тяговой характеристики локомотива за счет уточнения прогнозирования затрат энергии на подзарядку аккумуляторной батареи.

Библиографический список

1. Перминов В. А. Влияние технического состояния вспомогательного оборудования тепловозов на их энергоэффективность в эксплуатации / В. А. Перминов, В. В. Грачев, Д. Н. Курилкин, И. Э. Нестеров // Вестник научно-исследовательского и конструкторско-технологического института подвижного состава. — 2015. — № 97. — С. 45–58.
2. Клименко Ю. И. Влияние параметрических отказов оборудования тепловозов на его энергоэффектив-

ность в эксплуатации / Ю. И. Клименко, В. А. Перминов, В. В. Грачев, Д. Н. Курилкин и др. // Локомотив. — 2017. — № 4. — С. 40–45.

3. Перминов В. А. Оперативный контроль уровня энергоэффективности магистрального тепловоза рабочего парка / В. А. Перминов, М. В. Федотов, В. В. Грачев, И. Э. Нестеров // Вестник научно-исследовательского и конструкторско-технологического института подвижного состава. — 2015. — № 97. — С. 45–58.

4. Разработка показателей энергоэффективности тепловозов и методик их определения. Экспериментальные исследования по определению показателя энергоэффективности локомотивов (ПЭЛ) для оценки качества ремонта тепловозов (на примере тепловозов 2ТЭ116У, ТЭП70БС, ТЭМ18ДМ): техн. отчет № 27-2014-19, ОАО «ВНИКТИ»; рук. работы В. А. Перминов. — Коломна, 2014. — 175 с.

5. Система микропроцессорная управления, регулирования и диагностики. Руководство по эксплуатации 27.Т.156.00.00.000 РЭ/АО ВНИКТИ. — Коломна, 2007. — 111 с.

6. Марченко В. С. Электрооборудование тепловозов: справочник / В. С. Марченко, А. А. Сергеев, В. Т. Иванченко и др. М.: ИКЦ «Академкнига», 2003 — 248 с.

7. Грищенко А. В. Новые электрические машины локомотивов: учебное пособие для вузов железнодорожного транспорта / А. В. Грищенко, Е. В. Казаченко. — М.: ГОУ «Учебного методического центра по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. — 271 с.

8. Пустыльник Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений / Е. И. Пустыльник. — М.: Наука, 1968 — 288 с.

9. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие для вузов / В. Е. Гмурман. — М.: Высш. шк., 2003 — 479 с.

Дата поступления: 15.01.2022

Решение о публикации: 14.02.2022

Контактная информация:

КУРИЛКИН Дмитрий Николаевич — канд. техн. наук;
kurilkin_d@mail.ru

Definition of Power Expenses on Booster Charge of Rechargeable Battery of Diesel Locomotive According to the Data of Microprocessor Control System

D. N. Kurilkin

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

For citation: Kurilkin D. N. Definition of Power Expenses on Booster Charge of Rechargeable Battery of Diesel Locomotive According to the Data of Microprocessor Control System // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 1, pp. 68–74. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-68-74

Summary

Purpose: Development and approbation of the methodology of the definition of power expenses on booster charge of diesel locomotive rechargeable battery with the purpose to clarify tractive calculations. While definition of power expenses on charge of a battery it's necessary to take into account the current state of a battery itself as well as of starter-generator implementing this battery charge. This task can be solved as a result of statistical analysis of information being registered by subsystem of board diagnostics of modern diesel locomotives.

Methods: The methods of preprocessor treatment of information array and statistical analysis of formed sampling have been proposed. **Results:** Capacity probable values, spent on battery charge in the process of diesel locomotive exploitation, have been defined. With 95 % probability for 14 section of diesel locomotives of

2ТЭ116У series, average charging capacity of rechargeable battery doesn't exceed 2.6 kW at expected value of 1.4 kW. **Practical significance:** The obtained results allow to clarify capacity value selected for auxiliary needs and as a consequence to rise accuracy of locomotive tractive-energetic properties.

Keywords: Power effectiveness, rechargeable battery, power expenses on boost charge of battery, auxiliary loads.

References

1. Perminov V. A. Vliyanie tekhnicheskogo sostoyaniya vspomogatel'nogo oborudovaniya teplovozov na ikh energoeffektivnost' v ekspluatatsii [Influence of the technical condition of the auxiliary equipment of diesel locomotives on their energy efficiency in operation]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo i konstruktorsko-tekhnologicheskogo instituta podvizhnogo sostava* [Bulletin of the Research and Design Institute of Rolling Stock]. 2015, I. 97, pp. 45–58. (in Russian)

2. Klimenko Yu. I. Vliyanie parametricheskikh otkazov oborudovaniya teplovozov na ego energoeffektivnost' v ekspluatatsii [Influence of parametric failures of diesel locomotive equipment on its energy efficiency in operation]. *Lokomotiv* [Locomotive]. 2017, I. 4, pp. 40–45. (in Russian)

3. Perminov V. A. Operativnyy kontrol' urovnya energoeffektivnosti magistral'nogo teplovoza rabocheho parka [Operational control of the level of energy efficiency of the main diesel locomotive of the working fleet]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo i konstruktorsko-tekhnologicheskogo instituta podvizhnogo sostava* [Bulletin of the Research and Design Institute of Rolling Stock]. 2015, I. 97, pp. 45–58. (in Russian)

4. *Razrabotka pokazateley energoeffektivnosti teplovozov i metodik ikh opredeleniya. Eksperimental'nye issledovaniya po opredeleniyu pokazatelya energoeffektivnosti lokomotivov (PEL) dlya otsenki kachestva remonta teplovozov (na primere teplovozov 2TE116U, TEP70BS, TEM18DM): tekhn. otchet №27-2014-19, OAO "VNIKTI"* [Development of indicators of energy efficiency of diesel locomotives and methods for their determination. Experimental studies to determine the energy efficiency index of locomotives (PEL) to assess

the quality of repair of diesel locomotives (on the example of diesel locomotives 2TE116U, TEP70BS, TEM18DM)]. Kolomna, 2014. 175 p. (in Russian)

5. *Sistema mikroprotsessornaya upravleniya, regulirovaniya i diagnostiki. Rukovodstvo po ekspluatatsii 27.T.156.00.00.000 RE/AO VNIKTI* [Microprocessor control, regulation and diagnostics system. Operation manual 27.T.156.00.00.000 RE/JSC VNIKTI]. Kolomna, 2007. 111 p. (in Russian)

6. Marchenko V. S. *Elektrooborudovanie teplovozov* [Electrical equipment of diesel locomotives]. Moscow: IKTs "Akademkniga" Publ., 2003. 248 p. (in Russian)

7. Grishchenko A. V., Kazachenko E. V. *Novye elektricheskie mashiny lokomotivov* [New Electric Machines of Locomotives]. Moscow: GOU "Uchebnogo metodicheskoy tsentr po obrazovaniyu na zhelezodorozhnom transporte" Publ., 2008. 271 p. (in Russian)

8. Pustyl'nik E. I. *Statisticheskie metody analiza i obrabotki nablyudeniy* [Statistical methods of analysis and processing of observations]. Moscow: Nauka Publ., 1968. 288 p. (in Russian)

9. Gmurman V. E. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Theory and Mathematical Statistics: Textbook for High Schools]. Moscow: Vyssh. shk. Publ., 2003. 479 p. (in Russian)

Received: January 15, 2022

Accepted: February 14, 2022

Author's information:

Dmitry N. KURILKIN — PhD in Engineering;
kurilkin_d@mail.ru