

УДК 629.421.083

Моделирование процессов тепловой диагностики тепловозной выпрямительной установки

В. А. Кручек, П. В. Дворкин

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

Для цитирования: Кручек В. А., Дворкин П. В. Моделирование процессов тепловой диагностики тепловозной выпрямительной установки // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 52–59. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-52-59

Аннотация

Цель: Проанализировать возможность определения неисправности локомотивной выпрямительной установки с помощью определения тепловых полей и измерения температуры диодов. **Методы:** Применялись анализ неисправностей выпрямительных установок и их составляющих за определенный промежуток времени, моделирование и тепловой расчет в пакете программ Solid works. **Результаты:** Получена картина изменения тепловых полей и температуры при диагностике исправно работающей тепловозной выпрямительной установки, а также при неисправностях диодов, таких как пробой и обрыв. **Практическая значимость:** Показана возможность контроля технического состояния тепловозной выпрямительной установки при определении тепловых полей диодов, а также определения неисправностей по изменению температуры диода.

Ключевые слова: Выпрямительная установка, моделирование теплового состояния, нагрев диодов, тепловая диагностика, диагностика состояния диодов, неисправность диода.

Введение

В настоящее время распространены методы диагностики, которые требуют большого количества ресурсов. В крайних случаях необходимо демонтировать выпрямительную установку с тепловоза, чтобы проверить все ее элементы, что возможно только при текущем ремонте тепловоза.

С целью сокращения времени ремонта неисправных элементов необходимо внедрить новые виды диагностики. В данной статье будет рассмотрена тепловая диагностика выпрямительной установки с помощью пирометра. Данный метод дает возможность выявить неисправность на ранней стадии, что позволит устранить ее до того, как выпрямительная установка выйдет из строя. Также этот метод может выявить ослабле-

ние затяжки болтовых соединений, из-за которых у силовых вентилях уменьшается срок службы. Тепловую диагностику возможно будет проводить чаще, чем остальные виды диагностик, так как она занимает значительно меньше времени.

При работе выпрямительной установки с помощью пирометра возможно будет увидеть тепловую картину, позволяющую определить неисправность и своевременно устранить ее или заменить вышедшие из строя элементы. Изменения, которые происходят с течением времени в любом выпрямительном устройстве и приводят к потере его работоспособности, связаны с внешними и внутренними воздействиями, которым он подвергается. Например, электрическое воздействие, которое передается по всем узлам выпрямителя в процессе работы и проявляется в виде

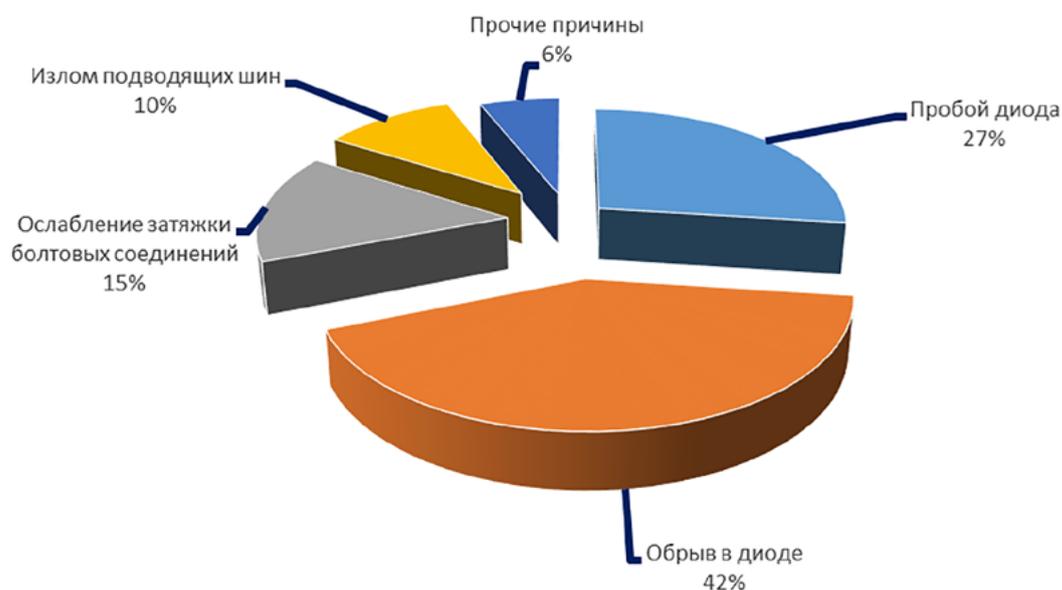


Рис. 1. Статистика отказов выпрямительной установки

статических и динамических нагрузок; механическое воздействие проявляется при различных колебаниях тепловоза, что приводит к механическим разрушениям отдельных его элементов; тепловое воздействие влияет на элементы выпрямителя, особенно в тяжелых режимах работы, изменяя характеристики его элементов; химическое воздействие вызывает коррозию элементов выпрямителя с последующим их разрушением; электромагнитное воздействие оказывает влияние на работу электронного оборудования. Статистика отказов выпрямительной установки представлена на рис. 1.

Диагностика электрооборудования локомотивов (электровозов и тепловозов) осуществляется применительно к трансформаторам тока и напряжения, выпрямительной установке, реверсивным переключателям, поездным контакторам, силовым проводам, шинам и их соединениям, шунтам ослабления поля ТЭД, шунту амперметра. Наибольший интерес из перечисленных элементов представляет выпрямительная установка. По тепловому состоянию элементов выпрямитель-

ной установки возможно сделать заключение о ее техническом состоянии. Так, в случае превышения допустимого тока, протекающего по диоду или тиристор, в них будут возникать повышенные температуры, которые возможно зафиксировать средствами технической диагностики. При этом следует отметить, что на всех тепловозах с выпрямительной установкой существует защита от превышения максимального тока генератора, который является и током выпрямительной установки [1, 2]. Превышение максимального тока в цепи одного тягового электродвигателя не приведет к превышению допустимого тока диодов. Поэтому превышение допустимого тока диода возможно только при неисправности выпрямительной установки. Браковочные критерии при изменении температуры выпрямительной установки представлены в табл. 1 [3].

Уровень дефекта:

- а) 0 — норма;
- б) 1 — предупреждение, требующее последующего наблюдения;
- в) 2 — неисправность, требующая вмешательства.

ТАБЛИЦА 1. Браковочные критерии температурных аномалий выпрямительной установки

Узел	Уровень дефекта	Превышение температуры относительно окружающей среды, °С	Максимальная разность температур ближайших элементов, °С
Элементы одного шкафа выпрямительной установки	0	Менее 50	5
	1	50–80	5–15
	2	Свыше 80	Свыше 15

Для выбора уровня дефекта выбирают худший вариант. При этом нижний уровень имеет хорошо запоминающееся значение, что позволяет слесарю проводить качественный анализ в процессе диагностики.

1. Расчет ребристого радиатора с принудительной конвекцией

Наиболее распространенный и эффективный способ охлаждения выпрямительной установки — принудительная конвекция за счет обдува вентилятором. В процессе принудительного охлаждения роль теплового излучения сводится к минимуму, из-за того что на его долю приходится около 3 % отводимого тепла. Для того чтобы улучшилось качество обдува, возможно применить один или несколько методов: увеличение скорости вращения крыльчатки вентилятора, увеличение количества вентиляторов, увеличение количества лопастей, установка вентиляторов большего диаметра, а также изменение их формы. Такой вид теплообмена, когда внутренняя энергия подается струями или потоками, называется конвекцией. При вынужденной (принудительной) конвекции перемещение вещества обусловлено действием внешних сил (насос, лопасти вентилятора и т. д.). Ее применяют, когда естественная конвекция является малоэффективной. Для моделирования параметров нагрева и получения тепловых картин неисправностей выпрямительной установки проводился расчет параметров конвекции по стандартным методикам [4].

Число Рейнольдса определяет характер потока: ламинарный, промежуточный или турбулентный [5, 6]:

- а) ламинарный, если $Re < 2300$;
- б) промежуточный, если $2300 < Re < 4000$;
- в) турбулентный, если $4000 < Re$.

Число Нуссельта — один из основных критериев подобия тепловых процессов, характеризующий соотношение между интенсивностью теплообмена за счет конвекции и интенсивностью теплообмена за счет теплопроводности (в условиях неподвижной среды).

Для моделирования нагрева элементов выпрямительной установки необходимо рассчитать конвекцию, так как этот режим соответствует принудительному обдуву воздухом. Для этого потребуются характеристики вентилятора выпрямительной установки и физические параметры воздуха, которые представлены в табл. 2, 3.

Скорость потока воздуха, м/с:

$$V = \frac{P}{3600 \cdot F} = \frac{5040}{3600 \cdot 0,104} = 13,46 \text{ м/с}, \quad (1)$$

где P — производительность вентилятора, м³/ч;
 F — площадь охлаждаемой поверхности, м².

Критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{V \cdot L}{\nu} = \frac{13,46 \cdot 0,08}{16,96 \cdot 10^{-6}} = 61320,75, \quad (2)$$

где L — размер радиатора вдоль ребра, м;

ν — коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/ч.

Критерий Нуссельта:

$$\begin{aligned} Nu &= 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} = \\ &= 0,021 \cdot 6762,17 \cdot 0,86 = 122,12, \end{aligned} \quad (3)$$

где Pr — число Прандтля.

Коэффициент конвективного теплообмена ребер радиатора, Вт / (м² · К):

$$\alpha_k = Nu \cdot \frac{\lambda_v}{L} = \frac{122,12 \cdot 0,0276}{0,08} = 42 \text{ Вт / (м}^2 \cdot \text{К)}, \quad (4)$$

где λ_v — коэффициент теплопроводности воздуха, Вт / (м · К).

Сборка элемента выпрямительной установки состоит из диода ВЛ-200 и ребристого охладителя. Диод припаян к массивному медному основанию. Основание является токоведущим элементом цепи вентиля и служит для отвода тепла, которое выделяется в элементе при прохождении электрического тока

ТАБЛИЦА 2. Характеристики вентилятора

Параметр	Значение
Тип вентилятора	центробежный
Диаметр колеса вентилятора, мм	364
Привод	электрический
Мощность электродвигателя, кВт	6
Производительность вентилятора, м ³ /ч	5040

ТАБЛИЦА 3. Физические параметры сухого воздуха

Температура воздуха, $t_v, ^\circ\text{C}$	Коэффициент кинематической вязкости воздуха, $\nu \cdot 10^6, \text{ м}^2 / \text{с}$	Теплопроводность воздуха, $\lambda_v \cdot 10^2 \text{ Вт / (м} \cdot \text{К)}$	Число Прандтля, Pr
10	14,16	1,51	0,705
20	15,06	2,59	0,703
30	16,00	2,67	0,70
40	16,96	2,76	0,699
50	17,95	2,83	0,697
60	18,97	2,90	0,696
70	20,02	2,96	0,694
80	21,09	3,05	0,692

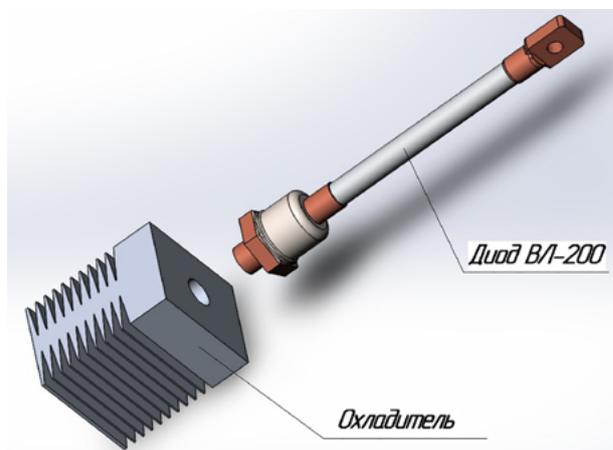


Рис. 2. Сборка диода с охладителем

К верхнему электроду элемента припаяна гибкая вставка из медного кабеля, которая выходит наружу сквозь изоляционную втулку, укрепленную в верхней части стального корпуса. Для расчета тепловая энергия, выделяемая диодом, рассеивается посредством конвекции. Коэффициент конвективной теплопередачи равен 42 Вт / (м² · К), а температура окружающей среды температура равна 40 °С.

При протекании тока по вентилю возникают повышенные температуры, и для эффективного охлаждения используются специальные охладители, представленные на рис. 2. [7]. Как правило, такие охладители изготавливают из алюминия или алюминиевых сплавов (силумина). Вентиль вставляется в охладитель, в котором для улучшения теплоотвода имеются перпенди-

кулярно расположенные ребра. Для уменьшения электрического и теплового сопротивления все контактирующие поверхности должны иметь плотный контакт (плотное примыкание частей, что учитывается при моделировании в пакете программ Solid works установкой соответствующих сопряжений). При завинчивании вентиля в охладитель для снижения механических усилий на выпрямительном элементе необходимо применять специальные гаечные ключи с нормированным крутящим моментом.

Результаты тепловых расчетов диода выпрямительной установки в сборе с охладителем приведены в следующей главе.

2. Моделирование неисправностей тепловозной выпрямительной установки

Для моделирования нагрева выпрямительной установки используется приложение Solid Works Simulation (имеющий набор стандартных инструментов по заданию параметров теплообмена и сопротивлений). Расчет производился с учетом методик, представленных в научных публикациях [8–10] (выбор граничных условий и сопротивлений).

ТАБЛИЦА 4. Параметры сетки при моделировании

Параметр	Значение
Имя исследования	Нагрев диода
Тип сетки	Сетка на твердом теле (стандартная сетка)
Используемое разбиение	Сетка на основе кривизны
Качество сетки	Высокая

ТАБЛИЦА 5. Сравнение результатов моделирования

Элемент	Состояние элемента	Температура °С	
		Минимальная	Максимальная
Диод ВЛ 200	Исправное	50	67
	Пробой	50	75
	Обрыв	50	67
Охла-дитель	Исправное	20	50
	Пробой	20	50
	Обрыв	20	50

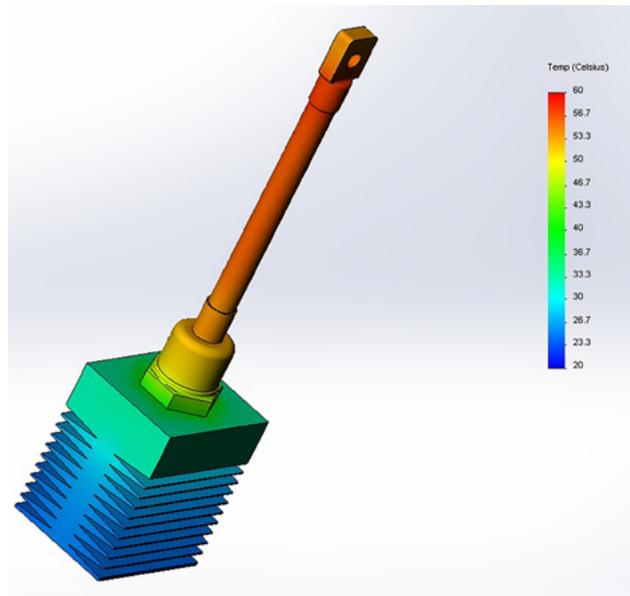


Рис. 3. Модель нагрева одного диода

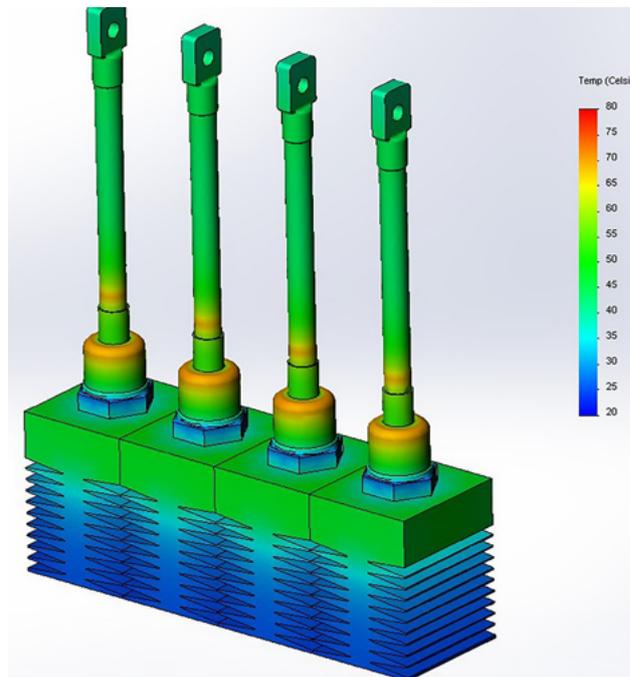


Рис. 4. Нагрев при исправном режиме работы

При построении сетки используются параметры, представленные в табл. 4.

Данные параметры выбраны исходя из наличия малоразмерных элементов — отверстия, фаски, скругления.

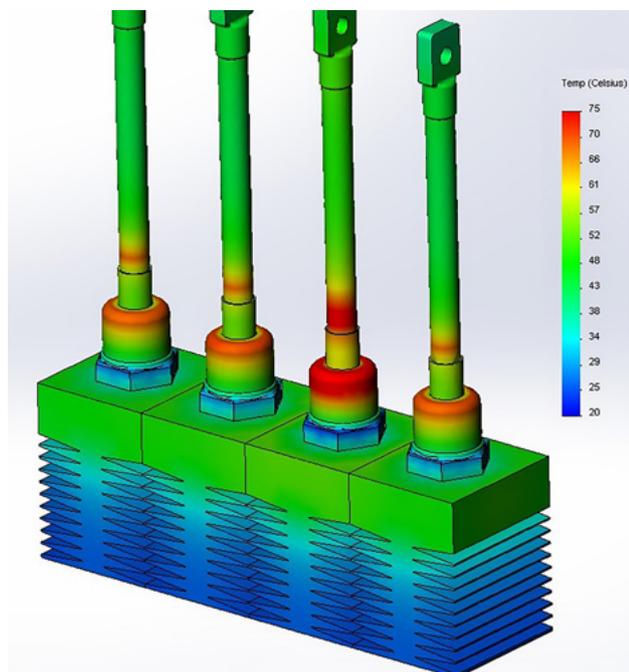


Рис. 5. Нагрев при пробое одного диода

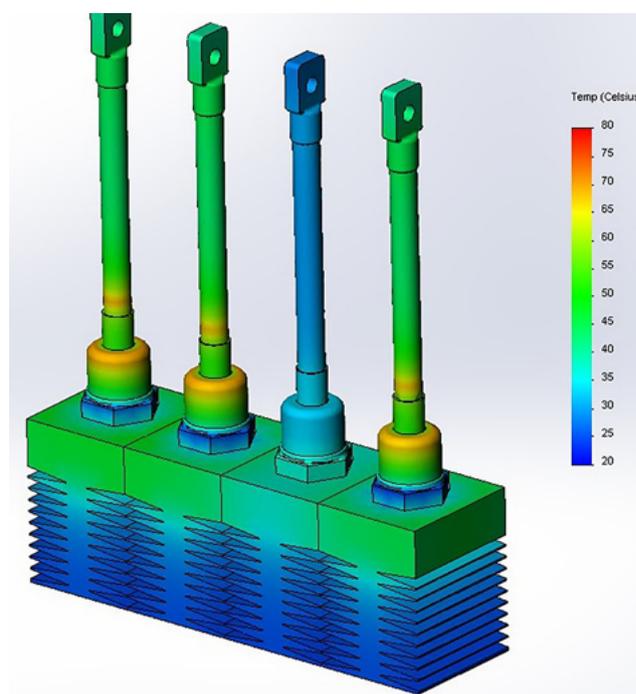


Рис. 6. Нагрев при обрыве одного диода

Значения для исследования подбираем из эксплуатационных показателей выпрямительной установки УВКТ-5. Начальная температура переходного процесса принимается 40 °С. Условия конвенции задаются исходя из параметров, полученных при расчете формул (1) – (3). Результаты теплового расчета диода ВЛ-200 в Solidworks представлены на рис. 3.

Исследования на четырех диодах, для определения разницы по нагреву элементов при разных режимах работы диода, представлены на рис. 4–6.

Сравнение результатов исследований приведено в табл. 5. Моделирование разных режимов работы выпрямительной установки в SolidWorks показало, что с помощью тепловой картины можно найти неисправный элемент.

Заключение

Моделирование работы выпрямительной установки показало, что по тепловой картине, которую будет отображать пирометр, возможно определить неисправность. В зависимости от нее нагрев отдельных элементов выпрямительной установки

будет разной, что позволит своевременно устранить неисправность выпрямительной установки. Контроль технического состояния выпрямительной установки и своевременный ремонт, в рамках современной системы технического обслуживания и ремонта, позволят повысить надежность работы тепловоза в целом и уменьшить количество внеплановых ремонтов. Предложенные тепловые картины можно использовать в перспективных системах ремонта, в рамках предложенной ОАО «РЖД» концепции современного ремонта.

Библиографический список

1. Бабков Ю. В. Автоматизация локомотивов / Ю. В. Бабков, Ф. Ю. Базилевский, А. В. Грищенко. — Учеб.-метод. центр по образованию на ж. д. транспорте, 2007. — 323 с.
2. Курилкин Д. Н. Электрические передачи локомотивов: учебное пособие / Д. Н. Курилкин. — СПб.: ПГУПС, 2020. — Ч. 1. — 66 с.
3. Ровдо А. А. Полупроводниковые диоды и схемы с диодами: справочник / А. А. Ровдо. — М.: ДМК Пресс, 2006. — 287 с.

4. Грищенко А. В. Повышение эффективности охлаждения силовых полупроводниковых приборов / А. В. Грищенко, И. Г. Киселев, А. С. Корнев и др. // *Электротехника*. — 2016. — № 5. — С. 32–36.
5. Киселев И. Г. Математическое моделирование контактного теплообмена в полупроводниковых преобразовательных установках железнодорожного транспорта / И. Г. Киселев, Д. В. Крылов // *Известия ПГУПС*. — 2012. — № 1. — С. 66–71.
6. Киселев И. Г. Метод диагностирования исправности охладителей ДТС, применяемых в преобразовательных установках железнодорожного транспорта / И. Г. Киселев, Д. В. Крылов // *Элтранс-2011: материалы шестого Международного симпозиума*. — СПб., 2013. — С. 424–428.
7. Сергеев П. С. Проектирование электрических машин / П. С. Сергеев. — М.: Энергия, 1969. — 632 с.
8. Степанов С. И. Методика расчета теплового состояния силового полупроводникового прибора с охладителем / С. И. Степанов, А. Б. Буянов // *Совершенствование систем охлаждения мощных полупроводниковых преобразователей железнодорожного транспорта: сб. науч. тр. ЛИИЖТа*. — Л., 1988. — С. 105–116.
9. Киселев И. Г. Теплотехника на подвижном составе железных дорог / И. Г. Киселев. — М., 2007. — 277 с.
10. Михальчук Н. Л. Энергетическая эффективность полупроводниковых преобразователей локомотивов / Н. Л. Михальчук, Д. Н. Курилкин, С. В. Урушев и др. // *Электротехника*. — 2018. — № 10. — С. 15–20.

Дата поступления: 12.01.2023

Решение о публикации: 03.02.2023

Контактная информация:

КРУЧЕК Виктор Александрович — д-р техн. наук, профессор; victor.kruchek@yandex.ru

ДВОРКИН Павел Вадимович — канд. техн. наук; pvdvorkin@yandex.ru

Modeling the Processes of Thermal Diagnostics of Diesel Locomotive Rectifier

V. A. Kruchek, P. V. Dvorkin

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

For citation: Kruchek V. A., Dvorkin P. V. Modeling the Processes of Thermal Diagnostics of Diesel Locomotive Rectifier // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 1, pp. 52–59. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-5 88X-2023-1-52-59

Summary

Purpose: To analyze the possibility of determining locomotive rectifier unit malfunction with the help of thermal fields and diode temperature measurement. **Methods:** There were applied the analysis of rectifier unit faults and their components for a certain period, modeling and thermal calculation in Solid Works Software Package. **Results:** The picture of thermal field and temperature changes at the diagnosis of regularly running diesel rectifier unit as well as at diode faults such as a breakdown and break. **Practical significance:** The possibility of monitoring the technical condition of a diesel locomotive rectifier unit when determining diode thermal fields as well as of determining possible malfunctions by diode temperature change is shown.

Keywords: Rectifier, thermal state simulation, diode heating, thermal diagnostics, diode state diagnostics, diode malfunction.

References

1. Babkov Yu. V., Bazilevskiy F. Yu., Grishchenko A. V. *Avtomatizatsiya lokomotivov* [Locomotive automation]. Moscow: GOU “Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zhelezнодорожном транспорте” Publ., 2007. 323 p. (In Russian)
2. Kurilkin D. N. *Elektricheskiye peredachi lokomotivov: uchebnoye posobiye* [Electric transmissions of locomotives]. St. Petersburg: Saint-Petersburg State transport university Publ., 2020. 66 p. (In Russian)
3. Rovdo A. A. *Poluprovodnikovye diody i skhemy s diodami: spravochnik* [Semiconductor diodes and circuits with diodes: a reference book]. Moscow: DMK Press Publ., 2006. 287 p. (In Russian)
4. Grishchenko A. V., Kiselev I. G., Kornev A. S. et al. Povyshenie effektivnosti okhlazhdeniya silovykh poluprovodnikovyykh priborov [Improving the cooling efficiency of power semiconductor devices]. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering]. 2016, Iss. 5, pp. 32–36. (In Russian)
5. Kiselov I. G., Krylov D. V. Matematicheskoye modelirovaniye kontaktnogo teploobmena v poluprovodnikovyykh preobrazovatel'nykh ustanovkakh zhelezнодорожного транспорта [Mathematical modeling of contact heat transfer in semiconductor converters of railway transport]. *Izvestiya PGUPS* [Izvestiya PGUPS]. 2012, pp. 66–71. (In Russian)
6. Kiselev I. G., Krylov D. V. *Metod diagnostirovaniya ispravnosti okhladiteley DTS, primenyayemykh v preobrazovatel'nykh ustanovkakh zhelezнодорожного транспорта. Eltrans-2011: materialy shestogo Mezhdunarodnogo simpoziuma* [A method for diagnosing the health of diesel engine coolers used in converting installations of railway transport. Eltrans-2011: Proceedings of the 6th International Symposium]. St. Petersburg, 2013, pp. 424–428. (In Russian)
7. Sergeev P. S. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Design of electrical machines]. Moscow: Energiya Publ., 1969. 632 p. (In Russian)
8. Stepanov S. I., Buyanov A. B. *Metodika rascheta teplovogo sostoyaniya silovogo poluprovodnikovogo pribora s okhladitelem. Sovershenstvovanie sistem okhlazhdeniya moshchnyykh poluprovodnikovyykh preobrazovateley zhelezнодорожного транспорта: sb. nauch. tr. LIIZhTA* [The method of calculating the thermal state of a power semiconductor device with a cooler. scientific tr. LIIZhTA]. L., 1988, pp. 105–116. (In Russian)
9. Kiselov I. G. *Teplotekhnika na podvizhnom sostave zheleznykh dorog* [Heating technology on rolling stock of railways]. Moscow, 2007. 277 p. (In Russian)
10. Mikhal'chuk N. L., Kurilkin D. N., Urushev S. V. et al. Energeticheskaya effektivnost' poluprovodnikovyykh preobrazovateley lokomotivov [Energy efficiency of semiconductor converters for locomotives]. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering]. 2018, pp. 15–20. (In Russian)

Received: January 12, 2023

Accepted: February 03, 2023

Author's information:

Viktor A. KRUCHEK — Dr. Sci. in Engineering,
Professor; victor.kruchek@yandex.ru

Pavel V. DVORKIN — PhD in Engineering;
pvdvorkin@yandex.ru