



**П. В. Губарев, Д. В. Глазунов, А. С. Шапшал**

*Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация*

*Дата поступления: 25 мая 2019 г.*

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕСУРСА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВЗОВ

**Аннотация.** В статье проведено исследование ресурса полупроводниковых приборов преобразователей электровозов. Тепловое сопротивление полупроводниковых приборов преобразователей электровозов, например, ДЛ153 (ВЛ200) не должно превышать величину  $0,55 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$  (около 50 % диодов имеют внутренний обрыв цепи). Однако, если его ресурс стремится к нулю, обнаружить это с помощью современных методов мониторинга падений напряжения и определения класса практически невозможно. Определить остаточный ресурс полупроводниковых приборов, предотвращая отказы на линии, можно только при помощи теплового сопротивления. Для определения температурных режимов силового диода разработан и изготовлен измеритель температуры нагрева с контактным датчиком. Измеритель температуры нагрева с контактным датчиком апробирован путем замера температуры нагретых диодов. Для снижения отказов выпрямительных установок в эксплуатации разработана методика определения остаточного ресурса полупроводниковых приборов преобразователей электровозов. Данная методика существенно повышает надежность полупроводниковых приборов и обеспечивает значительный экономический эффект от своевременной смены диодов. Рассмотрен принцип действия прибора для измерения теплового сопротивления. Предложена зависимость теплового сопротивления силовых диодов выпрямительной установки электровоза от наработки. Анализ работы показывает, что с увеличением пробега электровоза, тепловое сопротивление диодов возрастает, но в пределах наблюдаемых пробегов оно не достигает опасных значений. Результаты измерений теплового сопротивления диодов, полученных с помощью описанного прибора, подтверждают приведенную зависимость при погрешности, не превышающей 10 %.

**Ключевые слова:** электроподвижной состав, локомотиворемонтные предприятия, выпрямительные установки, полупроводниковые диоды, срок службы.

**P. V. Gubarev, D. V. Glazunov, A. S. Shapshal**

*Rostov State University of Railway Transport, Rostov-on-Don, Russian Federation*

*Received: May 25, 2019*

## RESEARCH ON THE RESOURCE OF SEMICONDUCTOR CONVERTERS OF ELECTRIC LOCOMOTIVES

**Abstract.** The article studies the resource of semiconductor devices of electric locomotive converters. The thermal resistance of semiconductor devices of electric locomotive converters (for example, DL153 (VL200)) should not exceed  $0.55 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$  (about 50% of the diodes have an internal open-circuit fault). However, if its resource tends to zero, it is almost impossible to detect this with the help of modern methods for monitoring voltage drops and class determination. It is possible to determine the residual life of semiconductor devices, preventing failures on the line, only with the help of thermal resistance. To determine the temperature regimes of the power diode, a heating temperature meter with a contact sensor was designed and manufactured. A heating temperature meter with a contact sensor was tested by measuring the temperature of heated diodes. To reduce failures of rectifier units in operation, a method has been developed for determining the residual life of semiconductor devices of electric locomotive converters. This technique significantly improves the reliability of semiconductor devices and provides a significant economic effect from the timely change of diodes. The article considers the principle of operation of the device for measuring thermal resistance. The authors propose the dependence of the thermal resistance of the power diodes of a locomotive rectifier installation on the operating time. The analysis of the work shows that with an increase in the locomotive's mileage, the thermal resistance of the diodes increases, but within the observed mileage it does not reach dangerous values. The results of measurements of the thermal resistance of the diodes, obtained using the described device, confirm the above relation with an error not exceeding 10%.

**Keywords:** electric rolling stock, locomotive repair enterprises, rectifiers, semiconductor diodes, service life.

### Введение

Условия работы электроподвижного состава вызывают нестабильный характер токовых нагрузок выпрямительных установок, надежность которых, помимо других параметров, зависит от теплового состояния полупроводниковых диодов [1–3]. Их срок службы во многом

обусловлен интенсивностью нагревания и охлаждения в рабочем режиме с ограничением температуры внутренней структуры  $140 \text{ }^\circ\text{C}$  [4–6]. Малая тепловая инерционность диодов с охладителями, как показали исследования, приводит к их нестационарному тепловому состоянию с непрерывно меняющейся температурой. На ло-



комотиворемонтных предприятиях проверки параметров силовых диодов выпрямительных установок, как правило, включают измерения падения напряжения и определение класса. В выпрямительные установки устанавливаются силовые диоды с неизвестным ресурсом [7–10].

### Способ определения остаточного ресурса силового диода

В данной работе рассмотрен способ определения остаточного ресурса силового диода [11–12]. Для реализации способа необходимо нагреть диод током, измерить падение напряжения на диоде и определить тепловое сопротивление.

Тепловое сопротивление определяется по формуле:

$$R_T = \frac{\tau_2 - \tau_1}{I \cdot \Delta U},$$

где  $\tau_1$  – температура корпуса диода, °C;  $\tau_2$  – температура пластины кремния, °C;  $I$  – прямой ток, А;  $\Delta U$  – падение напряжения, В.

Для измерения прямого тока, падения напряжения, температуры корпуса и полупроводниковой структуры в установившемся режиме силовой диод устанавливают на испытательный стенд контроля падения напряжения и класса и включают постоянный ток, величина которого зависит от типа диода.

Ниже представлен график зависимостей температур корпуса и пластины кремния от времени  $\tau_1$ ,  $\tau_2 = f(t)$ , характеризующую выдержку времени до наступления установившегося режима (рис. 1).

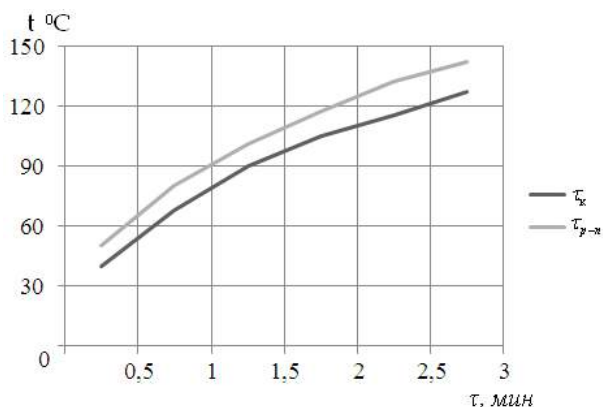


Рис. 1. График зависимостей температуры корпуса и пластины кремния силового диода от времени нагрева

Представлена также блок-схема прибора для реализации предлагаемого способа (рис. 2).

Для определения температур используют термопару, для измерения падения напряжения и тока – вольтметр и амперметр постоянного тока. Для измерения температуры силового диода

устанавливаются датчики электронного термометра (рис. 3).

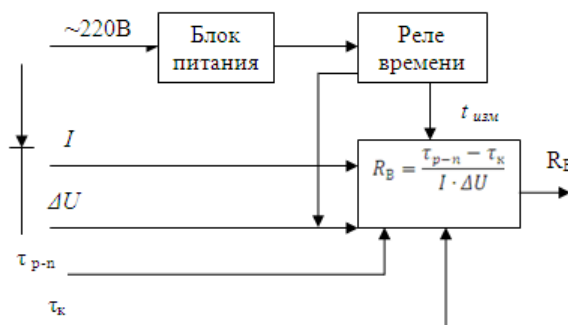


Рис. 2. Блок-схема прибора для определения теплового сопротивления

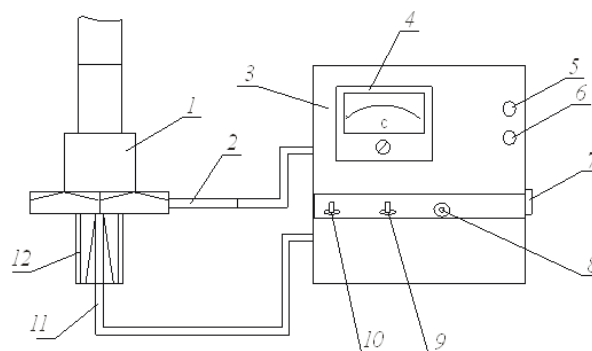


Рис. 3. Установка датчиков электронного термометра для измерения температуры силового диода:

1 – силовой диод ВЛ200; 2 – датчик температуры поверхности; 3 – электронный термометр; 4 – измерительная головка; 5 – регулятор «Установка 100 %»; 6 – регулятор «Установка»; 7 – ввод внешнего питания; 8 – кнопка «Шунт»; 9 – тумблер «Измерения»; 10 – тумблер «Вкл»; 11 – датчик температуры структуры; 12 – головка болта силового диода

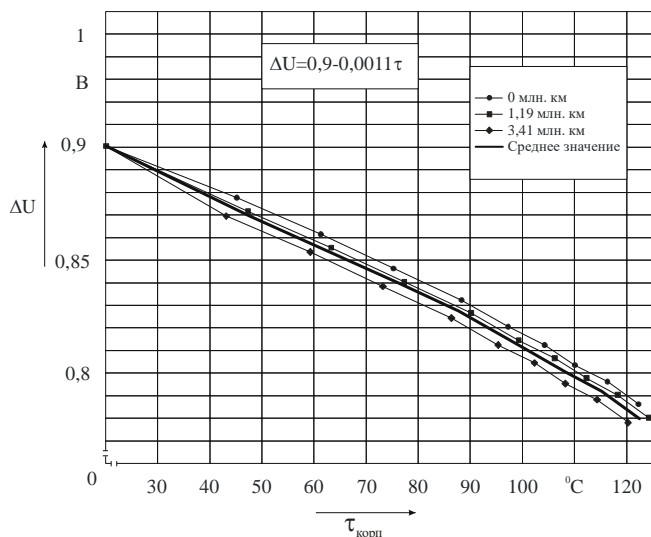
Падение напряжения измерить в установившемся режиме практически невозможно. Это связано с тем, что температура кремниевой пластины достигает 235 °C при ограничении на нагрев 140 °C. С этой целью для определения установившегося теплового сопротивления диода после трех минут работы используем коэффициент  $K_{R_B} = 2,056$ . Исходя из того, что мощность потерь определяется по формуле:

$$\Delta P = \Delta U \cdot I,$$

то для расчета теплового сопротивления необходимо знать четыре величины:  $\tau_{p-n}$ ,  $\tau_k$ ,  $\Delta U$ ,  $I$ . Измерение температуры корпуса, падения напряжения и тока не вызывает затруднений, а изменение температуры структуры прямым путем невозможно. Для ее определения прямым путем необходимо



найти параметр, который может быть измерен. Этим параметром может быть падение напряжения, имеющее предположительно линейную зависимость от температуры структуры (рис. 4).



**Рис. 4. Зависимость падения напряжения  $\Delta U$  от температуры нагрева  $\tau_{корн}$  структуры диода ВЛ200 с различной нагрузкой**

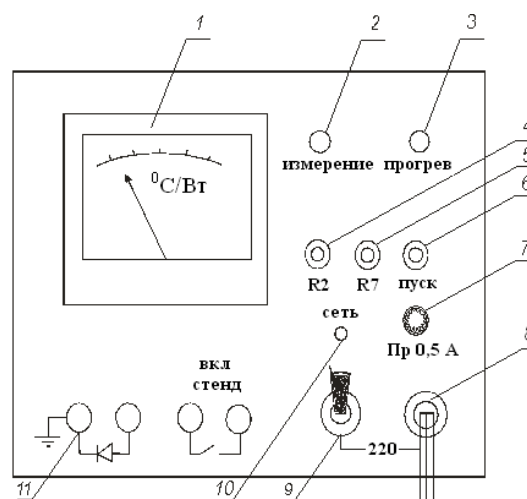
Рассматриваемый способ [12] реализуется в условиях эксплуатационных депо и на заводах. Внедрение способа определения остаточного ресурса силового диода позволяет обеспечить следующие преимущества по сравнению с существующими способами:

1. На основе рассматриваемого способа возможно создание экспресс-метода определения остаточного ресурса силового диода.

2. Определение остаточного ресурса силового диода в условиях эксплуатационного локомотивного депо.

На основе данного способа изготовлен прибор для определения остаточного ресурса силовых диодов выпрямительных установок тягового подвижного состава. Таким образом, нами выбран способ и прибор для определения теплового сопротивления лавинных диодов по известной разработке и патенту кафедры ТПС Ростовского государственного университета путей сообщения и РЭРЗ Ростовского электровагоноремонтного завода 2121153 РФ (рис. 5). Технические характеристики прибора приведены в табл.

Прибор предназначен для определения теплового сопротивления системы «полупроводниковая структура – корпус стержневых диодов ВЛ200 и тиристоры ТЛ–200» и др. Прибор используется совместно со стендом по проверке силовых приборов.



**Рис. 5. Внешний вид прибора измерения теплового сопротивления силовых полупроводниковых приборов:**

1 – измерительная головка, отградуированная в единицах теплового сопротивления; 2, 3 – светодиоды, сигнализирующие соответственно режимы «Измерение» и «Прогрев»; 4 – переменный резистор выдержки времени в режиме «Прогрев»; 5 – переключатель выдержки в режиме «Прогрев»; 6 – кнопка «Пуск»; 7 – предохранитель; 8 – гнездо подключения сетевого шнура; 9 – выключатель питания; 10 – светодиод, сигнализирующий подключение прибора к сети; 11 – зажимы для подключения испытываемых диодов и тиристоров

**Технические данные прибора**

| № | Параметр   | Единица измерения |
|---|--|-------------------|
| 1 | Напряжение питания прибора                               | 220 В             |
| 2 | Частота  | 50 Гц             |
| 3 | Род тока   | Переменный        |
| 4 | Время определения теплового сопротивления одного прибора | 3 мин.            |
| 5 | Класс защиты от поражения электрическим током            | 2                 |
| 6 | Исполнение по степени защиты от влаги                    | Незащищенное      |

Нормальными условиями применения прибора являются:

– температура окружающей среды  $293 \pm 5$  ( $20 \pm 5$ ) К ( $^{\circ}\text{C}$ );

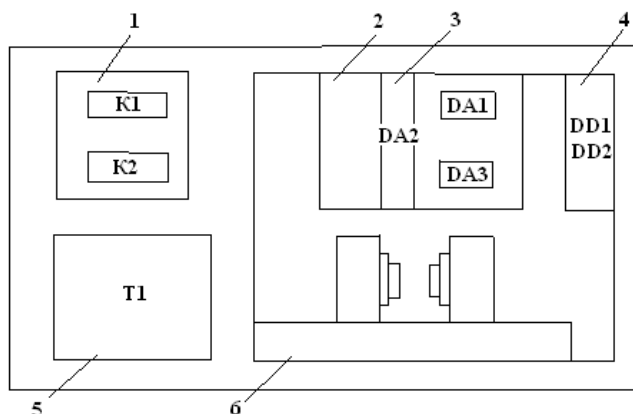
– относительная влажность воздуха 60 %;

– атмосферное давление 760 мм. рт. ст.

Все блоки прибора расположены в металлическом корпусе. Каждый выполнен на отдельной плате с применением печатного монтажа. Платы закрепляются в корпусе с помощью металлических уголков. Соединяются между платами и элементами управления, расположенными на передней панели, осуществляется медным многожильным проводом. В корпусе прибора также распола-



гается силовой трансформатор блока питания, закрепленный четырьмя винтами (рис. 6).



**Рис. 6. Расположение блоков и плат в корпусе прибора (вид сверху):**

- 1 – плата коммутации; 2 – блок согласователя-усилителя; 3 – арифметический блок;
- 4 – блок таймеров; 5 – силовой трансформатор;
- 6 – блок питания

Внутри корпуса прибора расположены блок питания; блок таймеров; арифметический блок; блок согласователя-усилителя.

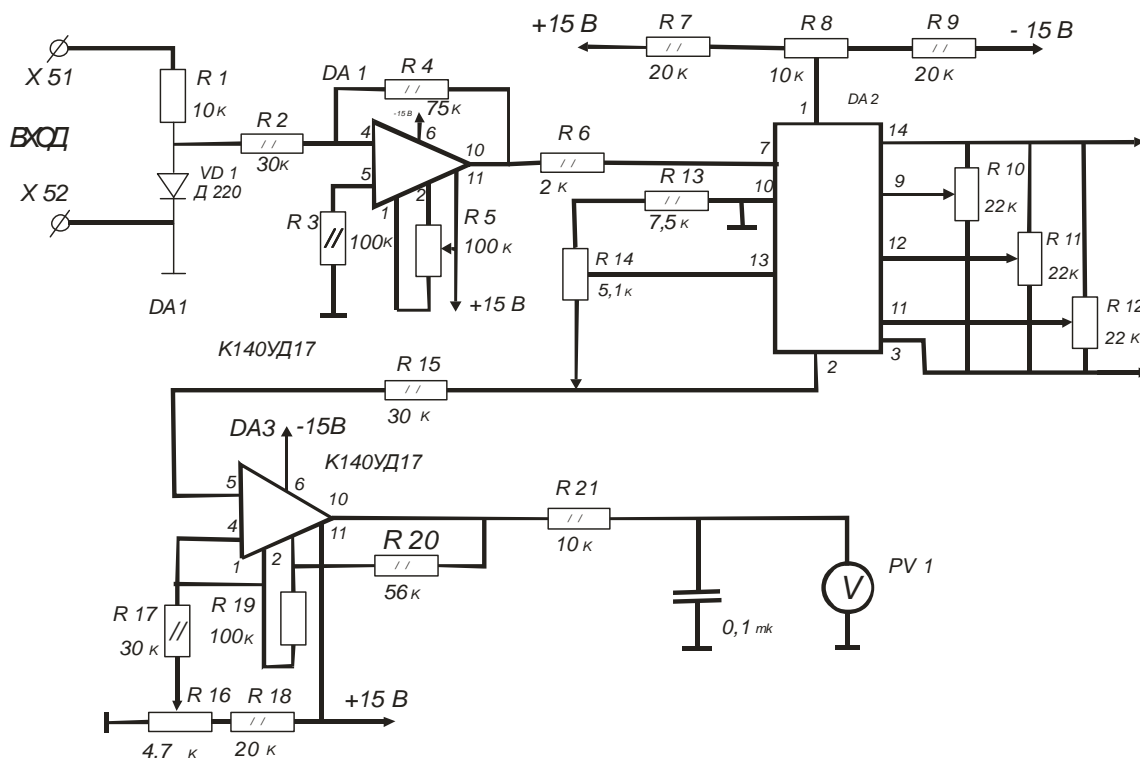
**Принцип действия прибора для измерения теплового сопротивления**

При включении тумблера «Сеть» напряжение с блока питания поступает к блокам прибора, таймеры устанавливаются в исходное состояние. При нажатии кнопки «Пуск» запускается первый таймер, при этом срабатывает реле и включает стэнд.

Происходит нагрев силового диода. На передней панели прибора загорается светодиод «Нагрев». По истечении времени нагрева на выходе первого таймера формируется импульс, запускающий второй таймер, срабатывает реле K2, подключающее измерительную головку к выходу арифметического блока. Напряжение с диода поступает на блок согласователя-усилителя, с выхода сигнал поступает на арифметический блок, где происходит вычисление теплового сопротивления силового диода. С выхода арифметического блока напряжение, эквивалентное тепловому сопротивлению, подается, после предварительного определения, на измерительную головку, которая градуирована в единицах теплового сопротивления. По истечении времени измерения прибор переходит в исходное состояние.

Блок питания состоит из трансформатора и схемы выпрямления и стабилизации. Блок питания обеспечивает постоянное стабилизированное напряжение +15 В, -15 В, для питания микросхем прибора и постоянное нестабилизированное напряжение +9 В для питания обмоток реле. Блок согласователя-усилителя предназначен для усиления входного сигнала до уровня, необходимого для нормальной работы арифметического блока. В блоке используется операционный усилитель КР140Д17, включенный по стандартной схеме (рис. 7).

Коэффициент усиления регулируется резистором R3. Операционный усилитель питается двуполярным стабилизированным напряжением ±15 В. Арифметический блок выполнен на



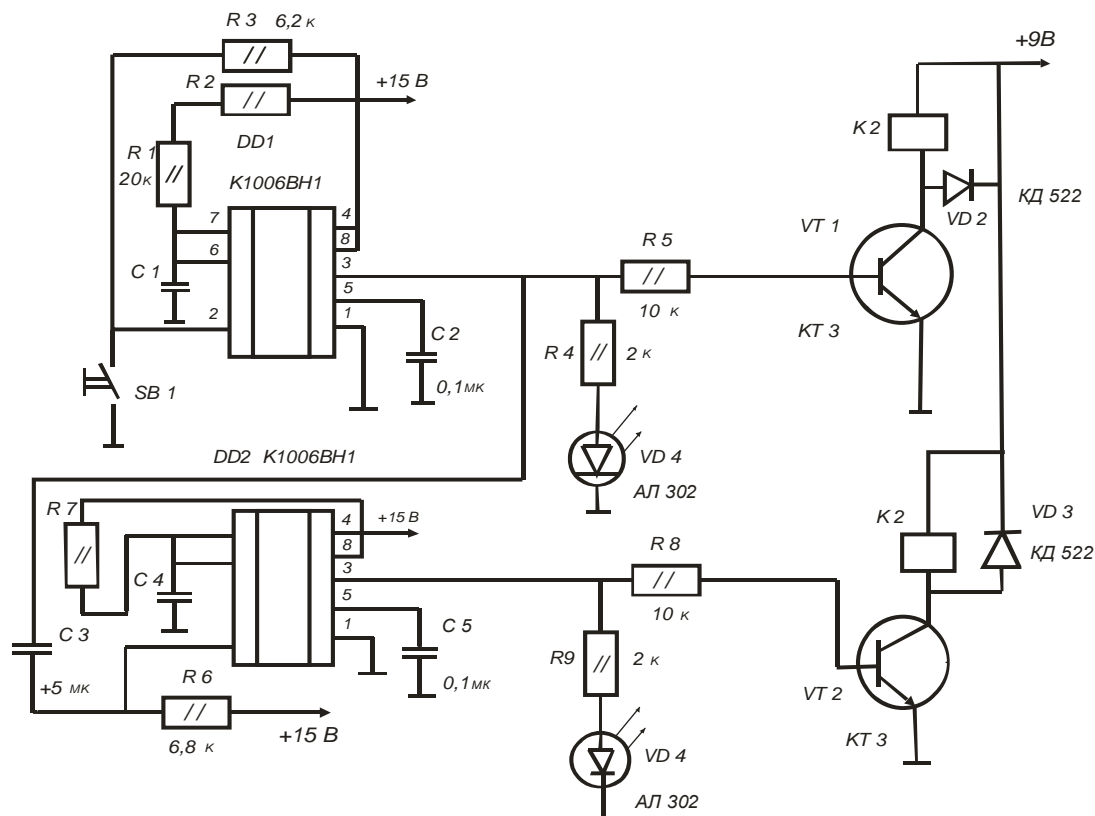


Рис. 7. Принципиальная схема прибора для измерения теплового сопротивления силового полупроводникового прибора

микросхеме К525ПС2. На входы микросхемы подаются два сигнала: один, формируемый усилителем на резисторы R7, R8, R9 на контакт 1, и другой с блока согласователя-усилителя на контакт 7. Постоянные коэффициенты устанавливаются резисторами R10, R11. Питание блока осуществляется двухполярным стабилизированным напряжением 15 В. С выхода DA2 сигнал поступает на усилитель, выполненный на операционном усилителе DA3 КР140УД17, коэффициент усиления контролируется резисторами R16–R19. С выхода усилителя через фильтр C1 сигнал поступает на измерительную головку PVI.

Блок таймеров обеспечивает необходимые выдержки времени для работы прибора (см. рис. 7). Блок состоит из двух реле времени, устанавливающих время прогрева и время измерения. Оба реле времени выполнены по одной схеме на таймерах К1006 ВИ1 (DD1, DD2). Время выдержки определяется по формуле:

$$t_1 = 1,1 \cdot R_2 \cdot C_1,$$

где R2 – сопротивление, МОм; C1 – емкость, мкФ; t1 – время, с.

Аналогично для второго реле времени

$$t_2 = 1,1 \cdot R_7 \cdot C_4.$$

С выхода реле времени сигнал поступает на электронный ключ VT1, в коллекторную цепь ко-

торого включена обмотка реле K1.

При нажатии кнопки «Пуск» на выходе DD1, K8 формируется положительный потенциал, открывающий транзистор VT1, что приводит к срабатыванию реле K1 и включению диода VD1 (режим «Прогрев»). По истечении выдержки времени на выходе DD1 формируется нулевой логический уровень (VT1 закрывается, K1 отключается, VD1 гаснет), который запускает второе реле времени на DD2. На выходе DD2 формируется единичный логический уровень, открывается транзистор VT2, срабатывает реле K2, подключая измерительную головку к выходу арифметического блока, загорается светодиод VD4 (режим «Измерение»). По истечении выдержки времени на входе DD2 формируется нулевой логический уровень, VT2 закрывается, отключая измерительную головку от арифметического блока, светодиод VD4 гаснет и прибор переходит в исходное состояние. Выдержку времени в режиме «Нагрев» устанавливают резистором R2, а в режиме «Измерение» резистором R7.

Питается блок таймеров постоянным стабилизированным напряжением +15 В, в обмотке реле времени постоянным напряжением +9 В.

В приборе использована измерительная головка от вольтметра ВЗ–2А класса точности 2,5.

Подготовку прибора к работе осуществляют в следующем порядке:





- подключают соединительные провода к зажимам прибора;
- подключают соединительные провода к испытываемому диоду или тиристор;
- подключают сетевой шнур к прибору;
- подключают прибор к сети 220 В;
- переменным резисторам на лицевой панели устанавливают выдержку времени 3 мин.

Включить прибор тумблером «Сеть». Включить, питание стенда для испытания силовых диодов. Установить ток 100 А регулятором стенда. Нажать кнопку «Пуск» на лицевой панели прибора. До истечения выдержки времени записать показания прибора. Сделать заключение об остаточном ресурсе силового полупроводникового диода. Отключить питание стенда. Установить следующий полупроводниковый диод. По окончании испытаний отключить прибор от сети.

Для исследования влияния срока службы диода на его тепловое сопротивление на испытательном стенде Ростовского электровозоремонтного завода проведены испытания диодов, снятых с пришедших на капитальный ремонт электровозов с пробегами до 3,5 млн. км, что в два раза превышает пробег электровозов по ранним аналогичным исследованиям Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта на электропоездах. Восемнадцать диодов (замер на 3-х диодах) подготовлены таким образом, что контроль температуры полупроводниковой структуры и корпуса диода осуществлялся контактным способом с помощью электронного термометра с использованием термопар.

Параметром, характеризующим тепловые свойства прибора, являясь его установившееся тепловое сопротивление

$$R_B = \frac{\tau_{p-n} - \tau_k}{\Delta P},$$

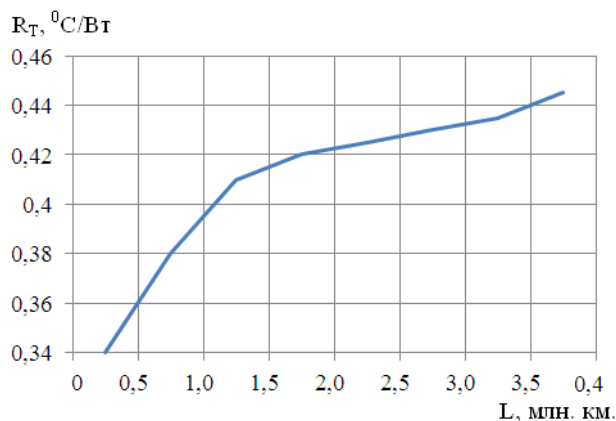
где  $\tau_{p-n}$  – температура  $p-n$  перехода;  $\tau_k$  – температура корпуса;  $\Delta P$  – мощность потерь, вызывающая нагрев.

Тепловое сопротивление определяется площадью полупроводниковой структуры, качеством полных соединений и конструкцией корпуса. В процессе эксплуатации силового диода проходит процесс постепенного «старения» припоя, завершающийся его разрушением и обрывом внутренней цепи прибора.

При условии однотипности диодов значение их теплового сопротивления определяется качеством паяных соединений. Следовательно, остаточный ресурс полупроводникового преобразователя напрямую зависит от значения внутреннего

установившегося теплового сопротивления.

По опытным результатам определения теплового сопротивления диодов, снятых с электровозов с различным пробегом, построена зависимость величины теплового сопротивления силовых диодов от их наработки на тяговом подвижном составе (рис. 8).



**Рис. 8.** Зависимость значений теплового сопротивления от наработки силового полупроводникового прибора  $L$ , млн. км.  $R_T$ , °C/Вт

Анализ работы показывает, что с увеличением пробега электровоза тепловое сопротивление диодов возрастает, но в пределах наблюдаемых пробегов оно не достигает опасных значений.

Результаты измерений теплового сопротивления диодов, полученных с помощью описанного прибора, подтверждают приведенную зависимость при погрешности, не превышающей 10 %.

#### Заключение

Для исследования температурных режимов силового диода разработан и изготовлен измеритель температуры нагрева с контактным датчиком, проведены точные замеры температуры нагретых диодов.

Наиболее объективным методом определения остаточного ресурса силовых диодов является оценка их теплового сопротивления.

Для снижения отказов выпрямительных установок в эксплуатации разработана усовершенствованная методика определения остаточного ресурса силовых диодов при использовании прибора для определения теплового сопротивления. Разработанная методика определения остаточного ресурса диодов при капитальном и деповском ремонтах электровозов может существенно повысить надежность их работу и обеспечить значительный экономический эффект от своевременной смены диодов.

Предложена зависимость теплового сопротивления силовых диодов выпрямительной уста-



новки электровоза от наработки.

Данная методика может быть применена и к управляемым силовым тиристорам преобразовате-

лей на всех типах и современного тягового подвижного состава.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Степанов, С.И., Буянов, А.Б. Методика расчета теплового состояния силового полупроводникового прибора с охладителем // Совершенствование систем охлаждения мощных полупроводниковых преобразователей железнодорожного транспорта : сб. науч. тр. ЛИИЖТа. Л. : 1988. С. 105–116.
2. Алексеев А.Е., Гришуков, Л.С., Ситченко, Л.С. Статистическое исследование тепловых параметров силовых полупроводниковых вентелей // Сб. трудов ЛИИЖТ. 1972. Вып. 336. С. 68–76.
3. Бардин М. Надежность силовых полупроводниковых приборов. М. : Энергия, 1978. 96 с.
4. Алексеев А.Е., Гришуков, Л.С., Ситченко, Л.С. Исследование перегрузочных характеристик силовых полупроводниковых вентелей // Сб. трудов ЛИИЖТа. 1972. Вып. 336. С. 84–90.
5. Хазен М.М., Красова, Н.П. Исследование теплового сопротивления охладителей полупроводниковых приборов в книге: развитие систем теплового энергоснабжения. М. : Транспорт, 1991. 119 с.
6. Выбор параметров преобразователей по нагрузкам в рабочих и аварийных режимах / М.М Хазен, В.В. Руденский, Б.Б. Новик и др. // Развитие систем тягового энергоснабжения. М. : Транспорт, 1991. 119с.
7. Хазен М.М. Допустимая нагрузочная способность полупроводниковых преобразовательных агрегатов тяговых подстанций постоянного тока при естественном воздушном охлаждении // Повышение надежности и эффективности системы тягового электроснабжения. М. : Транспорт, 1979. С. 36–48.
8. Математические методы принятия решений в системах диагностики и управления на тяговом подвижном составе / Н.Р. Тептиков и др. // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2018. № 1. С. 13–15.
9. Губарев П.В., Тептиков Н.Р., Глазунов Д.В. Методика расчета ресурса силовых диодов выпрямительных установок электроподвижного состава // Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщ. 2017. № 4 (36). С. 33–38.
10. Оценка безотказности и готовности локомотивов в период нормальной эксплуатации / А.А. Резниченко, Е.А. Чеботарев, Н.Р. Тептиков // Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщ. 2018. № 3 (39). С. 15–22.
11. Чебовский, О. Г., Моисеев, Л. Г.. Испытания силовых полупроводниковых преобразователей. М. : Энергоиздат, 1986. 201 с.
12. Пат. 2121153 РФ. Способ определения остаточного ресурса силового диода / Е.А. Чеботарев и др. № 96121814/09 ; заявл. 10.11.1996 ; опубл. 27.10.1998.

### REFERENCES

1. Stepanov S.I., Buyanov A.B. Metodika rascheta teplovogo sostoyaniya silovogo poluprovodnikovogo pribora s okhladitelem [Method for calculating the thermal state of a power semiconductor device with a cooler]. Sb. nauchnykh trudov LIIZhTa «Sovershenstvovanie sistem okhlazhdeniya moshchnykh poluprovodnikovykh preobrazovatelei zheleznodorozhnogo transporta» [Proceedings of LIIZhT "Improving the cooling systems of powerful semiconductor converters of railway transport"]. Leningrad, 1988. Pp. 105–116.
2. Alekseev A.E., Grishukov L.S., Sitchenko L.S. Statisticheskoe issledovanie teplovykh parametrov silovykh poluprovodnikovykh ventelei [A statistical study of the thermal parameters of power semiconductor fans]. Sb. trudov LIIZhTa [Proceedings of LIIZhT], iss. 336, 1972. Pp. 68–76.
3. Bardin M. Nadezhnost' silovykh poluprovodnikovykh priborov [Reliability of power semiconductor devices]. Moscow: Energiya Publ., 1978. 96 p.
4. Alekseev A.E., Grishukov L.S., Sitchenko L.S. Issledovanie peregruzochnykh kharakteristik silovykh poluprovodnikovykh ventelei [Study of the overload characteristics of power semiconductor valves]. Sb. trudov LIIZhTa [Proceedings of LIIZhT], iss. 336, 1972. Pp. 84–90.
5. Khazen M.M., Krasova N.P. Issledovanie teplovogo soprotivleniya okhladitelei poluprovodnikovykh priborov v knige: razvitie sistem teplovogo energosnabzheniya [A study of the thermal resistance of semiconductor device coolers in the book: Razvitie sistem tyagovogo energosnabzheniya]. In Dobrovolskii T. P. (ed.). Moscow: Transport Publ., 1991. 119 p.
6. Khazen M.M., Rudenskii V.V., Novik B.B. et al. Vybora parametrov preobrazovatelei po nagruzkam v rabochikh i aviariynykh rezhimakh [Choice of converter parameters for loads in operating and emergency modes]. Moscow: Transport Publ., 1991. 119 p.
7. Khazen, M.M. Dopustimaya nagruzochnaya sposobnost' poluprovodnikovykh preobrazovatel'nykh agregatov tyagovykh podstantsii postoyannogo toka pri estestvennom vozdushnom okhlazhdenii [Permissible load capacity of semiconductor converting units of DC traction substations with natural air cooling]. Povyshenie nadezhnosti i effektivnosti sistem tyagovogo elektrosnabzheniya [Improving the reliability and efficiency of traction power supply systems]. Moscow: Transport Publ., 1979. Pp. 36–48.
8. Teptikov N.R., Reznichenko A.A., Gubarev P.V., Glazunov D.V. Matematicheskie metody prinyatiya reshenii v sistemakh diagnostiki i upravleniya na tyagovom podvizhnom sostave [Mathematical decision-making methods in diagnostic and control systems on traction rolling stock]. Sbornik v mashinostroenii, priborostroenii [Assembly in mechanical engineering and instrument making], 2018. No. 1. Pp. 13–15.
9. Gubarev P.V., Teptikov N.R., Glazunov D.V. Metodika rascheta resursa silovykh diodov vypryamitel'nykh ustanovok elektropodvizhnogo sostava [The method of calculating the resource of power diodes of rectifier installations of electric rolling stock]. Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya [Herald of the Ural State University of Railway Transport], 2017. No. 4 (36). Pp. 33–38.
10. Reznichenko A.A., Chebotarev E.A., Teptikov N.R., Glazunov D.V. Otsenka bezotkaznosti i gotovnosti lokomotivov v period normal'noi ekspluatatsii [Evaluation of the reliability and availability of locomotives during normal operation]. Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya [Herald of the Ural State University of Railway Transport], 2018. No. 3 (39). Pp. 15–22.
11. Chebovskii O. G., Moiseev L. G. Ispytaniya silovykh poluprovodnikovykh preobrazovatelei [Tests of power semiconductor converters]. Moscow: Energoizdat Publ., 1986. 201 p.
12. Chebotarev E.A., Zakharov A.P., Gubarev P.V., Reznichenko A.A. et al. Spособ opredeleniya ostatochnogo resursa silovogo dioda [A method for determining the residual life of a power diode]. Pat. 2121153 RF. Priority 10.11.96.

**Информация об авторах**

Губарев Павел Валентинович – к. т. н., доцент кафедры тягового подвижного состава, Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, e-mail: pavel.gybarev@yandex.ru

Глазунов Дмитрий Владимирович – к. т. н., доцент кафедры тягового подвижного состава, Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, e-mail: glazunovdm@yandex.ru

Шапшал Александр Сергеевич – к. т. н., доцент кафедры тягового подвижного состава, Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, e-mail: llh@rgups.ru

**Authors**

Pavel Valentinovich Gubarev – Ph.D. in Engineering Science, the Subdepartment of Traction Rolling Stock, Rostov State Transport University, Rostov-on-don, e-mail: pavel.gybarev@yandex.ru

Dmitrii Vladimirovich Glazunov – Ph.D. in Engineering Science, the Subdepartment of Traction Rolling Stock, Rostov State Transport University, Rostov-on-don, e-mail: glazunovdm@yandex.ru

Aleksandr Sergeevich Shapshal – Ph.D. in Engineering Science, the Subdepartment of Traction Rolling Stock, Rostov State Transport University, Rostov-on-don, e-mail: llh@rgups.ru

**Для цитирования**

Губарев П.В. Исследование ресурса полупроводниковых приборов преобразователей электровозов / П.В. Губарев, Д.В. Глазунов, А.С. Шапшал // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 112–119. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).112–119

**For citation**

Gubarev P. V., Glazunov D. V., Shapshal A. S. Issledovanie resursa poluprovodnikovyykh priborov preobrazovatelei elektrovozov [Research on the resource of semiconductor converters of electric locomotives]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2019. Vol. 63, No. 3, pp. 112–119. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).112–119

УДК 621.33

DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).119–126

**И. О. Лобыцин, Е. Ю. Дульский, Е. А. Милованова, А. А. Пыхалов***Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация**Дата поступления: 18 мая 2019 г.***ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОЖУХОВ ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОВОЗА СЕРИИ «ЕРМАК»**

**Аннотация.** В статье рассмотрены проблемы надежности механической части при эксплуатации электровозов серии «Ермак». Предметом исследования стал узел механической части электровоза серии «Ермак» – кожух зубчатой передачи в металлическом исполнении. Расположение кожуха зубчатой передачи на электровозе определяет условия его эксплуатации, при которых высокий уровень внешних нагрузок неизбежен. Одним из основных параметров, определяющих техническое состояние кожуха, является целостность поверхности кожуха зубчатой передачи. Анализ поврежденных элементов конструкции кожуха зубчатой передачи показал, что их максимальное число приходится на образование трещин в узлах крепления кожуха к кронштейнам остова тягового электродвигателя, которые могут привести к частичному или полному разрушению кожуха зубчатой передачи, а также повреждению колесно-моторного блока в целом. В случае образования трещин на поверхности кожуха происходит его отправка на неплановый ремонт. В ходе исследований получены картины распределения напряжений на поверхности кожуха в районе узла крепления. Для предотвращения образования трещин на кожухе зубчатой передачи предложены различные варианты исполнения модифицированных узлов крепления, которые подвергались оценке напряженного состояния. По результатам оценки напряженного состояния кожуха зубчатой передачи был выбран оптимальный вариант исполнения узла крепления кожуха, который позволит снизить количество неплановых ремонтов и повысить надежность подвижного состава в целом. Статья представляет интерес для специалистов в области ремонта и технического обслуживания механической части электроподвижного состава железных дорог.

**Ключевые слова:** анализ надежности, механическая часть электровоза, напряженно-деформированное состояние, кожух зубчатой передачи.

**I. O. Lobytsin, E. Y. Dulskiy, E. A. Milovanova, A. A. Pykhalov***Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation**Received: May 18, 2019***ASSESSMENT OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE GEAR TRANSMISSION CASINGS OF AN ELECTRIC LOCOMOTIVE OF THE ERMAK SERIES**