

## МЕТОД И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРОБОЯ ИЗОЛЯЦИИ НА КОРПУС В СИЛОВЫХ ЦЕПЯХ ТЕПЛОВОЗОВ

Одной из значимых проблем современных тепловозов является обеспечение их электробезопасности и пожаробезопасности. Описан метод, позволяющий оперативно определять номер тягового электродвигателя в силовой цепи, состояние изоляции которого является аварийным. Недостатком существующего метода защиты является то, что он лишь предоставляет информацию о потере целостности изоляции в плюсовой или минусовой цепи. Предложенный метод основан на использовании изменения электрической емкости и сопротивления изоляции в цепи. Полученные результаты математического моделирования и экспериментального исследования подтверждают возможность практического применения устройства обнаружения пробоя, построенного на основе данного метода. В ходе экспериментов были успешно локализованы пробои изоляции в силовой цепи и обнаружены аварийные устройства, подлежащие замене.

**Ключевые слова:** силовая цепь тепловоза, контроль замыканий на корпус в цепи, изменение емкости изоляции обмоток тяговых электродвигателей, устройство обнаружения пробоя.

**Введение.** Основными элементами силовой двухпроводной электрической схемы современных тепловозов являются тяговые электродвигатели (ТЭД), получающие питание в виде напряжения постоянного тока от тягового генератора. Надежность и безопасность тепловозов зависит от качества изоляции ТЭД относительно корпуса. Вибрации при эксплуатации, резкие перепады температур, неблагоприятные условия окружающей среды негативно влияют на качество изоляции, увеличивая риск ее повреждения [1, 2].

Самый традиционный метод определения аварийного состояния изоляции, получивший наибольшее распространение вследствие своей простоты, основан на измерении напряжения в любой точке плюсовых или минусовых цепей высокого напряжения относительно корпуса [3, 4]. Однако такой метод позволяет установить факт наличия аварии, но не обнаружить, в каком из устройств схемы она произошла [5–8]. Предложен метод, повышающий эффективность существующего путем сокращения времени выявления и позволяющий вместе с обнаружением наличия пробоя также установить, какой именно тяговый электродвигатель является аварийным. Он реализован при испытании опытного образца и успешно применен на реальной схеме тепловоза.

**Постановка проблемы.** В настоящее время защита и сигнализация при пробое на корпус высоковольтных цепей современного маги-

стрального тепловоза 2ТЭ25КМ осуществляется устройством искусственного «заземления» [9]. В устройство входят двухкатушечное реле заземления РЗ, резисторы СР31-СР34, рубильники ВР31,2, кнопка реле заземления КРЗ, блок выпрямителей БВЗ и блок диодов UZ1. Цепь заземления подключена к выводам «+» и «-» выпрямителей через блок диодов UZ1 (от каждого ТЭД) (рис. 1).

В случае пробоя в любой точке плюсовых или минусовых цепей высокого напряжения, потенциал которых относительно корпуса достаточен для срабатывания по управляющей катушке реле, замыкаются блок-контакты реле РЗ и удерживающая катушка фиксирует их в замкнутом положении. Сигнал с блок-контактов реле РЗ поступает в устройство обработки информации (УОИ). Если тепловоз находился в режиме тяги или электродинамического торможения, то УОИ разбирает тяговую либо тормозную схему и отключает подачу импульсов управления на тиристоры тягового выпрямителя. При этом на дисплее машиниста появляется соответствующее тревожное сообщение. Возврат реле заземления после его срабатывания производится нажатием кнопки КРЗ.

Недостатком существующего метода защиты является то, что он лишь предоставляет информацию о потере целостности изоляции в плюсовой или минусовой цепи тепловоза. Для того чтобы продолжить движения после

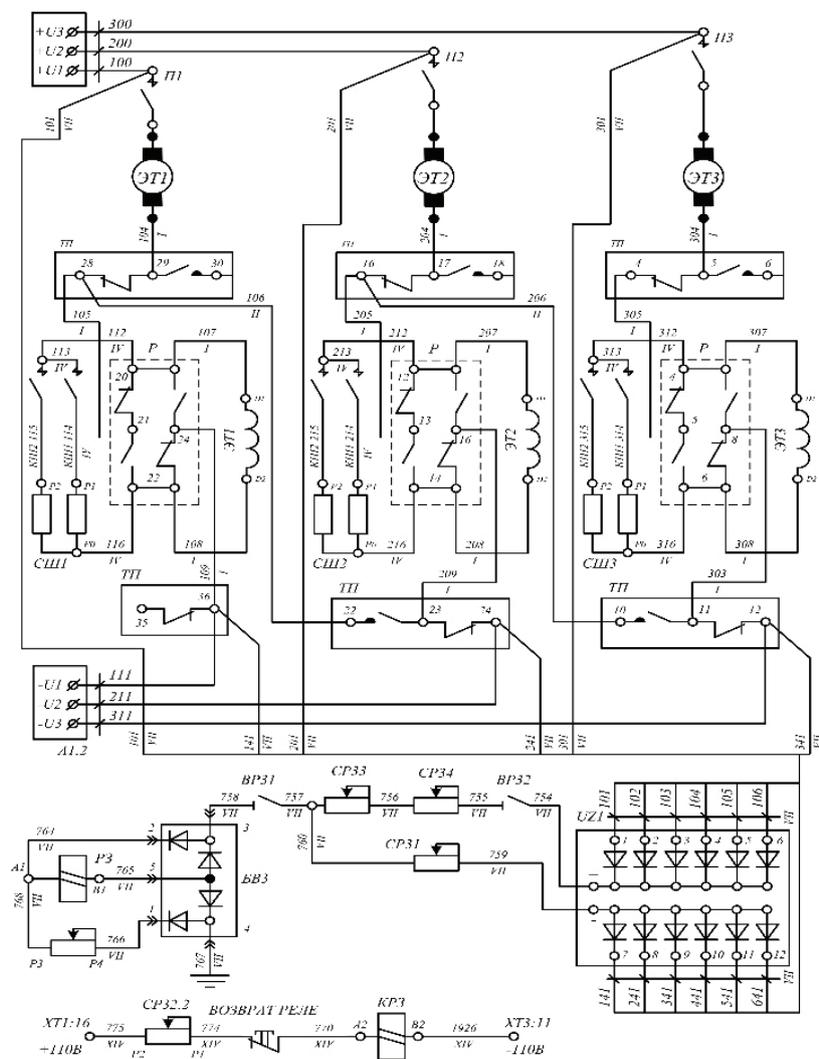


Рис. 1. Упрощенная принципиальная схема силовой цепи тепловоза 2ТЭ25КМ (для одной тележки)

обнаружения аварийного режима, необходимо выявить неисправный ТЭД и отключить его путем последовательного перебора, который заключается в том, что все двигатели отключаются от источника постоянного тока, а затем по очереди подключаются обратно. При этом тратится значительное время. Если тепловоз двигается в режиме выбега за счет сил инерции поезда на уклонах, перебор можно выполнить на ходу, но во всех остальных случаях необходима остановка поезда, что в конечном итоге приведет к большим экономическим потерям, связанным с задержкой грузовых и пассажирских поездов. Следует отметить, что работа тяговых электродвигателей с пробоем изоляции на корпус под высоким напряжением может привести к таким последствиям, как пожар, поэтому скорость обнаружения имеет важное значение для пожаробезопасности силовых цепей и тепловозов в целом [10, 11].

Как показал проведенный анализ схем включения реле защиты от заземления в тяговых цепях современных тепловозов, еще одним недостатком существующей системы является то, что в качестве реле устанавливается двухкатушечное реле РМ-1110, обладающее большой инерцион-

ностью и, как следствие, большим временем срабатывания, равным  $10^{-3}$  секунд [12].

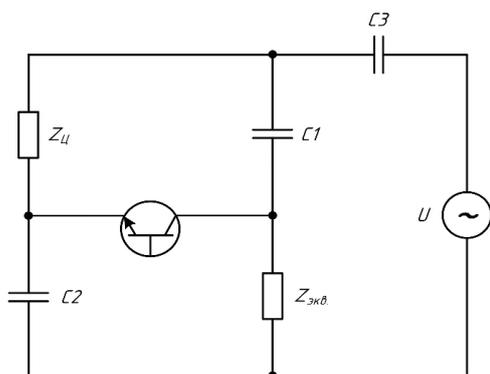
С помощью устройства обнаружения пробоев (УОП), построенного на основе предлагаемого метода, можно оперативно и за малое время определить номер аварийного двигателя в силовой цепи тепловоза. Преимущество метода позволяет сделать это в автоматическом режиме, без остановки подвижного состава и последующего перебора.

#### Способы решения поставленной проблемы.

Известно много способов построения систем, контролирующих возникновение замыкания на землю. Среди таких способов можно выделить четыре группы, в зависимости от заложенного в них алгоритма контроля и защиты:

1. Контроль падения напряжения относительно корпуса.
2. Мостовые схемы без дополнительного источника.
3. Использование дополнительного источника переменного напряжения.
4. Использование дополнительного источника постоянного напряжения.

Преимущества и недостатки первого способа были описаны выше. Способ контроля состоя-



а



б

Рис. 2. Принципиальная схема (а) и общий вид (б) устройства обнаружения пробоя (УОП)

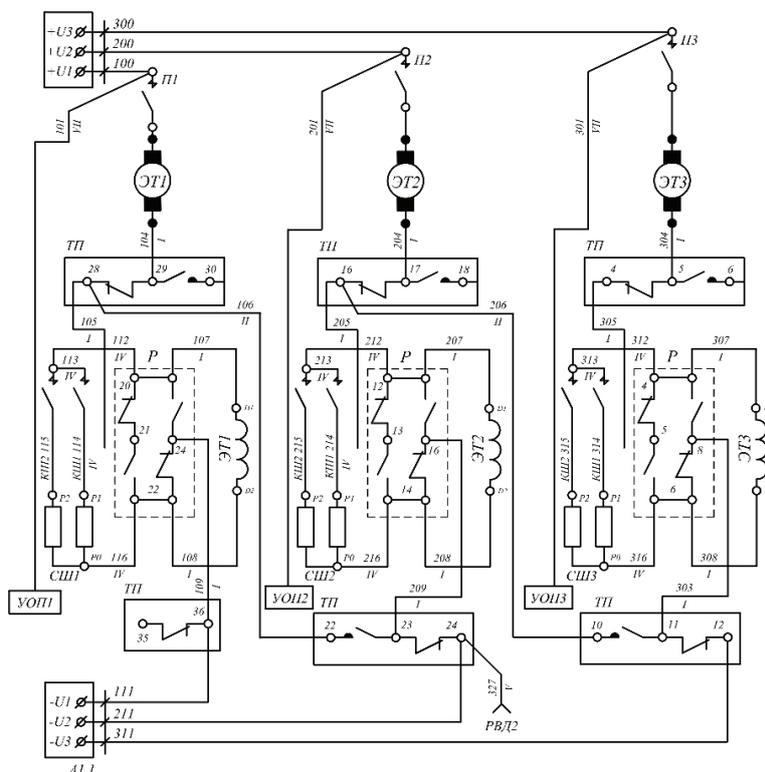


Рис. 3. Упрощенная принципиальная схема силовой цепи тепловоза 2ТЭ25КМ после модернизации (для одной тележки)

ния изоляции и защиты цепей постоянного тока от заземлений на корпус на основе мостовой схемы заключается в том, что к защищаемой цепи через одинаковые добавочные сопротивления подключают реагирующий орган, образующий измерительным прибором и токовым сигнальным реле, через который в случае неравенства сопротивлений изоляции в «плюсовой» и «минусовой» цепях относительно «земли» протекает ток. При использовании этого способа осуществляется непрерывный текущий контроль состояния изоляции, однако имеется мёртвая зона при симметричном снижении сопротивления изоляции, таким образом не обеспечивается необходимая чувствительность метода и невозможна высокая точность контроля.

Большое распространение получили различные системы с дополнительным источником. Схема такой защиты содержит вторичную обмотку трансформатора, один конец которой через конденсатор подключен к защищаемой цепи, другой конец обмотки через токовое реле соединен с «землей». При замыкании на землю в цепи постоянного тока создается контур для прохождения переменного тока через реле, которое срабатывает при превышении током установленного значения. Принципиальным недостатком такой системы является недостаточная чувствительность при большом значении емкости цепи по отношению к земле, который устраняется применением схемы с компенсацией указанной емкости либо с выделением активной

составляющей наложенного тока. Общим недостатком таких систем являются сложность их технической реализации, а также плохие массогабаритные показатели.

Принцип действия систем, использующих дополнительный источник постоянного напряжения, основан на согласованном по полярности наложении выпрямленного напряжения постороннего источника переменного тока на напряжение цепи. При нормальном состоянии изоляции относительно земли ток в реле защиты не протекает. При замыкании на землю образуется контур для прохождения тока через токовое реле, величина которого зависит от напряжения дополнительного источника и напряжения в цепи. Поэтому защита будет иметь минимальную чувствительность при повреждении изоляции в «минусовой цепи» и максимальная в «плюсовой цепи».

**Изменение емкости при ухудшении состояния изоляции.** Как видно из анализа, не один из способов не лишен недостатков. Для обнаружения пробоев изоляции на корпус предлагается мостовая схема с дополнительным источником переменного напряжения. Особенностью измерительного моста является то, что его разбалансировка происходит при изменении емкости изоляции обмоток тяговых электродвигателей [13]. Схема замещения электродвигателя постоянного тока представляет собой  $RLC$  контур, где  $C$  — емкость изоляции обмоток якоря и полюсов. Изоляцию электродвигателя можно представить в виде модели плоского конденсатора, следовательно, при пробое которой емкость конденсатора резко возрастает. Принципиальная электрическая схема, описывающая метод, показана на рис. 2а.

Емкость изоляции тяговых электродвигателей, входящая в комплексное сопротивление цепи двигателя  $Z_{\text{д}}$  включена на электрической схеме устройства обнаружения пробоя (УОП) последовательно с первой эквивалентной емкостью  $C_1$ , образуя одно плечо измерительного моста. Второе плечо измерительного моста образовано последовательно включенными второй эквивалентной емкостью  $C_2$  и комплексным сопротивлением  $Z_{\text{экв}}$ . Плечи измерительного моста питаются переменным током от источника через разделительный конденсатор  $C_3$ . В диагональ полученного измерительного моста включен транзистор — пороговый элемент.

В штатном режиме силовой цепи, при отсутствии в ней корпусных замыканий плечи измерительного моста уравновешены, транзистор обесточен. При возникновении пробоя на корпус в любом режиме силовой цепи и в любой ее части емкость изоляции резко возрастает, что приводит к неравенству напряжений в точках подключения транзистора, и через него будет протекать ток; сигнал об этом поступит в устройство обработки информации (УОИ), что приведет к отключению подачи импульсов управления на тиристоры тягового выпрямителя тепловоза.

Внешний вид опытного образца устройства показан на рис. 2б. В качестве блока питания устройства обнаружения пробоя используется аккумуляторная батарея тепловоза, подключенная к автономному инвертору, который является преобразователем напряжения. С выхода преоб-

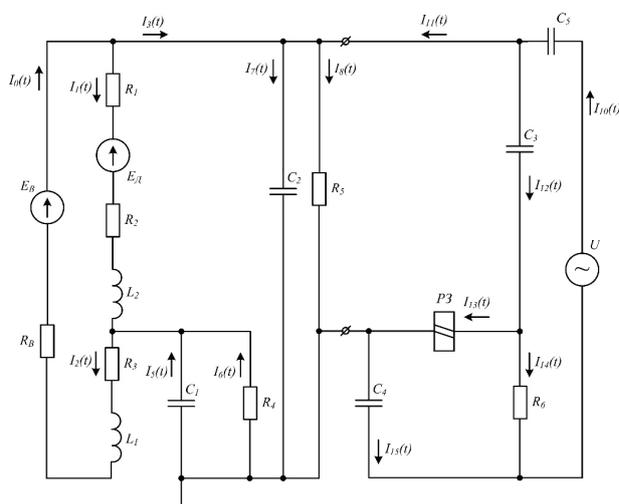


Рис. 4. Схема замещения предложенной силовой цепи тепловоза

разователя напряжение (220 В, 50 Гц) поступает на типовой многообмоточный трансформатор типа ТПП 259-127/220-50. С обмоток этого трансформатора напряжение (98 В, 50 Гц) поступает на электрическую схему устройства. В опытном образце устройства приняты следующие упрощения: транзистор на электрической схеме заменен на однообмоточное реле фирмы TIANBO HJQ-22F-4Z с напряжением срабатывания 48 В, а комплексное сопротивление  $Z_{\text{экв}}$  заменено активным. Для обнаружения пробоев в силовой цепи тепловоза 2ТЭ25КМ потребуется шесть устройств УОП1...УОП6, расположение трех из них показано на упрощенной принципиальной электрической схеме (для одной тележки тепловоза) на рис. 3.

**Математическое моделирование.** Для определения токов срабатывания порогового элемента разработана схема замещения силовой цепи тепловоза с включенным в нее устройством обнаружения пробоя. Так как регулирование тяговых электродвигателей на тепловозе 2ТЭ25КМ индивидуальное, для упрощения расчетов на схеме выбран один двигатель, а в качестве порогового элемента выбрано реле РЗ. Выделим на схеме устройства три контура (рис. 4). Первый контур содержит резистор  $R_5$  — сопротивление изоляции якорной цепи ТЭД, регистрирующее реле устройства и эквивалентную ёмкость  $C_3$ . Второй контур включает в себя разделительную ёмкость  $C_3$ , эквивалентную ёмкость  $C_3$ , активное сопротивление  $R_6$  и источник переменного тока  $U$ . Третий контур, в свою очередь, состоит из эквивалентной ёмкости  $C_4$ , активного сопротивления  $R_6$  и регистрирующего реле устройства.

Уравнения для узлов и контуров, обозначенных на схеме, представлены системой уравнений:

$$\begin{cases} I_{10}(t) - I_{11}(t) - I_{12}(t) = 0 \\ I_{12}(t) - I_{13}(t) - I_{14}(t) = 0 \\ I_{11}(t) + I_{13}(t) - I_{15}(t) = 0 \\ I_{10}(t) \frac{1}{i\omega C_5} + I_{12}(t) \frac{1}{i\omega C_3} + I_{14}(t) R_6 = U \\ I_{11}(t) Z_6 - I_{12}(t) \frac{1}{i\omega C_3} - I_{13}(t) R_{P3} = 0 \\ I_{13}(t) R_{P3} - I_{14}(t) R_6 + I_{15}(t) \frac{1}{i\omega C_4} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Моделирование токов и напряжений в элементах предложенной силовой цепи тепловоза в штатном режиме и в момент пробоя на корпус изоляции обмотки якоря, в соответствии с системой уравнений (1), производилось в программе Open Modelica Editor.

В момент короткого замыкания ток в реле устройства скачком увеличивается до 60,487 мА.

**Эксперимент.** Проверка адекватности математической модели проведена в сервисном локомотивном депо Ершовское филиала «Южный» ООО «ТМХ-сервис» (тепловоз 2ТЭ25КМ № 0058). Ток при срабатывании регистрирующего реле в устройстве обнаружения (УОП) при возникновении пробоя на корпус (устанавливалась перемычка на контактах поездного контактора) составил 65 А. Сходимость теоретического и экспериментального исследований составила 6,94 %.

**Закключение.** При внедрении предлагаемого устройства обнаружения будут решены задачи: точность обнаружения, быстродействие, простота алгоритма работы. Дополнительно решается задача контроля контактных соединений и повышения их надежности.

В ходе экспериментов были успешно локализованы пробоем изоляции в силовой цепи и обнаружены аварийные устройства, подлежащие замене. Результаты опытов позволяют утверждать, что на основе метода создана система оперативной диагностики и защиты, которая будет успешно использоваться при эксплуатации отечественных тепловозов.

Будущие исследования необходимо направить на обеспечение взаимодействия устройства с микропроцессорной системой управления тепловоза (МСУ-ТП) с целью передачи сигнала на монитор в виде текстового сообщения.

#### Библиографический список

1. Xuezhe W., Lu B., Zechang S. A Method of Insulation Failure Detection on Electric Vehicle Based on FPGA // 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conf., Sept. 3–5, 2008. Harbin, 2008. P. 1–5. DOI: 10.1109/VPPC.2008.4677526.
2. Wu Z.-J., Wang L.-F. A Novel Insulation Resistance Monitoring Device for Hybrid Electric Vehicle // 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conf., Sept. 3–5, 2008. Harbin, 2008. P. 1–4. DOI: 10.1109/VPPC.2008.4677682.
3. Марковская О. А. Разработка системы контроля состояния изоляции и защиты генераторов от повреждений в цепях ротора: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2000. 164 с.
4. Potdevin H. Insulation Monitoring in High Voltage Systems for Hybrid and Electric Vehicles // ATZelektronik worldwide. 2009. Vol. 4, Issue 6. P. 28–31. DOI: 10.1007/BF03242246.

5. Анучин А. С., Беляков Ю. О., Прудникова Ю. И. [и др.]. Метод определения и локализации пробоя изоляции для гибридного и электрического транспорта // Вестник МЭИ. 2017. № 5. С. 57–62. DOI: 10.24160/1993-6982-2017-5-57-62.

6. Liu Y.-Ch., Lin Ch.-Y. Insulation Fault Detection Circuit for Ungrounded DC Power Supply Systems // SENSORS. 2012. IEEE, Oct. 28–31, 2012. Taipei. 2012. P. 1–4. DOI: 10.1109/ICSENS.2012.6411550.

7. Yan G., Rong Z., Guibin L., Kinoshita N. Research of Measurement Method about Electric Vehicle High Voltage System Isolation Resistance // 2014 IEEE Conf. and Expo on Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), Aug. 31–Sept. 3, 2014. Beijing, 2014. P. 1–5. DOI: 10.1109/ITEC-AP.2014.6940657.

8. Zhao C., Jia X., Hao Z. The New Method of Monitoring DC System Insulation On-line // IECON'01. 27th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society, Nov. 29–Dec. 2, 2001. Denver, 2001. P. 688–691. DOI: 10.1109/IECON.2001.976600.

9. Тимофеев С. В. Тепловоз 2ТЭ25КМ: цепи сигнализации и защиты // Локомотив. 2018. № 2 (734). С. 14–18.

10. Дягтерёв А. П. Тяговому подвижному составу – надёжную противопожарную защиту // Локомотив. 2007. № 7. 33–34.

11. Чикиркин О. В. Приоритеты пожарной безопасности локомотивов // Локомотив. 2015. № 5 (701). С. 15–17.

12. Калякулин А. Н., Тьчков А. С., Анахова М. В. Анализ схем включения реле защиты от заземления в силовых цепях тепловозов // Вестник транспорта Поволжья. 2018. № 1 (67). С. 11–16.

13. Пат. 76513 Российская Федерация, МПК Н 02 Н 3/14. Устройство защиты электрических цепей от короткого замыкания на корпус и перегревов / Гордеев И. П., Гордеев А. И., Абросимов А. В., Калякулин А. Н. № 2008118184/22; заявл. 07.05.08; опубл. 20.09.08, Бюл. № 26.

**КАЛЯКУЛИН Алексей Николаевич**, старший преподаватель кафедры «Электрический транспорт».

AuthorID (РИНЦ): 700551

Адрес для переписки: Alexeiruz@yandex.ru

#### Для цитирования

Калякулин А. Н. Метод и устройство для обнаружения пробоя изоляции на корпус в силовых цепях тепловозов // Омский научный вестник. 2019. № 1 (163). С. 38–42. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-163-38-42.

Статья поступила в редакцию 14.01.2019 г.

© А. Н. Калякулин

#### Поправка

В статье «Критерий определения числа гармоник рядов Фурье, аппроксимирующих напряжения и токи трансформатора», автор В. Л. Федоров, опубликованной в журнале «Омский научный вестник», 2018, № 5 (161) формулу в последнем нижнем абзаце правой колонки следует читать  $\hat{\delta}_{i_{FV}} = \frac{\Lambda \Delta i_{FV}}{\Lambda i}$ .