

**МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ЗАЩИТНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ
СЕТЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Е. А. Мизрах, Н. В. Штабель, Е. А. Копылов

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: shtabnik@gmail.com

Проводится моделирование предложенной авторами схемы устройства защитного отключения сетей постоянного тока, отличающегося использованием датчика тока утечки на основе эффекта Холла, обладающего высокой точностью и позволяющего осуществить гальваническую развязку информационных цепей от силовых.

Рассмотренная схема отличается использованием микроконтроллера, имеющего аналого-цифровой преобразователь, а также встроенную аналоговую часть в виде нескольких компараторов, что позволяет применять различные способы обработки сигналов. Рассматриваются варианты схемы с цифровой и аналоговой обработкой сигналов датчиков тока утечки и тока нагрузки. Моделирование произведено в пакете Simulink путем определения передаточных функций датчиков тока, а также основных звеньев цепи обработки сигналов.

Для определения быстродействия рассмотренных схем обработки сигналов на вход системы подается сигнал, имитирующий скачок тока утечки или нагрузки, превышающий уставку срабатывания устройства. Выходным сигналом системы является сигнал отключения, подаваемый на размыкающий ключ. Измеряя время, прошедшее от момента пересечения током уставки до появления сигнала размыкания цепи, можно определить быстродействие схемы. Рассматривая задержки элементов системы, можно определить вклад каждого из них в общее быстродействие.

Произведен анализ быстродействия каждой из схем и вклад каждого из компонентов в общее быстродействие устройства. Также производится анализ функциональных возможностей обработки сигнала каждой из схем, таких как фильтрация помех и корректировка нелинейности характеристик датчиков тока.

Анализируются достоинства и недостатки рассмотренных схем, их пригодность для защиты людей и оборудования от поражения электрическим током в бытовых условиях и на производстве, в соответствии с общими требованиями, установленными в государственных стандартах для устройств защитного отключения малых и больших токов нагрузки.

Рассмотренное устройство может применяться в цепях постоянного тока электропитания энергосистем космических аппаратов для исключения возникновения аварийных ситуаций.

Приведены рекомендации по дальнейшему улучшению предложенной схемы с целью достижения более высокого быстродействия, что обеспечит универсальность применения предложенного устройства. Определены требования по быстродействию к размыкающему устройству и даны рекомендации по его реализации.

Ключевые слова: устройство защитного отключения, постоянный ток, быстродействие, обработка сигналов, токи утечки.

MODELING OF RESIDUAL-CURRENT DEVICE FOR DIRECT CURRENT CIRCUITS

E. A. Mizrakh, N. V. Shtabel, E. A. Kopylov

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: shtabnik@gmail.com

The authors have reviewed the model of residual-current device for direct current circuits with high precision Hall-effect based residual current sensor which also provides galvanic isolation of logic from power circuits.

The scheme based on microcontroller with built-in analog-to-digital converter and analog peripherals part with comparators, which provides different ways of signal processing is reviewed. The authors have offered the schemes with analog and digital signal processing of leakage current and load current sensors signals. The modeling is done with Simulink software, using transfer functions of current sensors and main scheme elements.

Measurement of reviewed signal processing schemes performance is done by applying linear signal to system input, simulating load or leakage current rise over preset limit. Output signal of the system is the signal to break circuit, connected to the breaking relay. Performance of the scheme can be determined by measuring the delay from current limit crossing point to presence of breaking output signal. Looking at the every element delay it is possible to estimate its contribution to overall performance.

The authors have analyzed and compared the performance of each signal processing scheme and contribution of elements to overall performance. The authors have compared signal processing capabilities of each scheme such as noise filtering and current sensor nonlinearity correction.

The authors have analyzed the pros and cons of reviewed schemes, their ability to protect man and machinery from leakage current damage in home or industrial use, with respect to protection requirements based on government standards for high and low load current residual-current devices.

Considered device can be used in direct current power circuits of a spacecraft to prevent accident situations.

The authors give recommendations for future scheme improvements, aiming on performance improvement, which will provide universal use scenario of reviewed device. The performance requirements for breaking device and given recommendations for its implementation are determined.

Keywords: residual-current device, ground fault circuit interrupter, direct current, performance, signal processing, residual current.

Введение. В настоящее время в промышленности и быту широко применяются устройства защитного отключения (УЗО) для сетей переменного тока, которые срабатывают при контакте токоведущих шин с корпусом или снижении сопротивления изоляции. Однако для сетей постоянного тока такие устройства практически не встречаются. В сетях постоянного тока также возможно появление токов утечки, что требует применения УЗО для защиты электрооборудования и людей, это особенно актуально при испытаниях электрооборудования спутников, в системах солнечной энергетики и т. д.

Токи утечки появляются при снижении сопротивления изоляции или при контакте человека с токоведущими шинами. Измеряя токи утечки можно обнаружить аварийную ситуацию и отключить сеть от потребителей, что позволит избежать нежелательных последствий и защитить людей и оборудование от поражения электрическим током.

В УЗО сетей переменного тока для измерения токов утечки используется дифференциальный трансформатор тока, однако он неспособен измерять постоянные токи утечки, что делает его применение невозможным в сетях постоянного тока. Поэтому в предложенном УЗО для измерения токов утечки предлагается использовать датчики малых токов на основе эффекта Холла [1]. В отличие от большинства существующих УЗО и устройств измерения токов утечки [2–9], использование датчика на основе эффекта Холла позволяет исключить гальваническую связь УЗО с защищаемой сетью.

Функциональная схема УЗО постоянного тока [10] показана на рис. 1.

На структурной схеме УЗО показаны: ключ размыкания цепи К, дополнительные резисторы R1 и R2 с ключами K1 и K2, микроконтроллер МК (семейство Cypress PsoC4), устройство ввода ВВ, устройство индикации ИНД, датчик токов утечки ДТУ (модель SLD-1), датчик тока нагрузки ДТ (модель LEM LA200-P), сопротивления изоляции $R_{из1}$ и $R_{из2}$, блок питания БП.

В процессе работы УЗО шина заземления с помощью ключей K1 и K2 попеременно подключается к

плюсовой и минусовой шинам сети питания через резисторы R1 и R2. При этом образуется цепь протекания токов утечки через заземляющую шину, сопротивления $R_{из2}$ и $R_{из1}$ соответственно. Протекающий по этой цепи ток измеряется ДТУ, сигнал с которого поступает в микроконтроллер. Если значение тока утечки превышает заданное, микроконтроллер подаёт сигнал на размыкание ключа К и отключает нагрузку от сети питания.

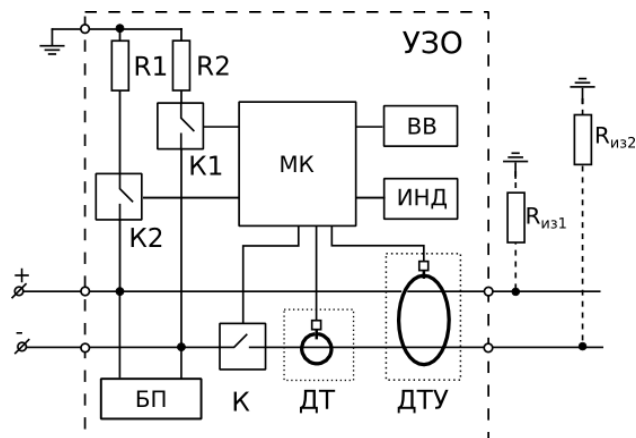


Рис. 1. Структурная схема УЗО

Измерение токов утечки обеспечивается дифференциальным датчиком тока ДТУ с высокой чувствительностью. Дополнительные резисторы R1 и R2 с ключами K1 и K2 позволяют измерять токи утечки с каждой из шин сети питания независимо от полярности и величины напряжения сети. Для обеспечения универсальности применения УЗО в схему было добавлено устройство ввода, которое совместно с устройством индикации позволяет задавать пороги срабатывания на ток утечки и ток нагрузки. Дополнительно с помощью датчика ДТ, выполненного также на основе эффекта Холла, обеспечивается защита по току нагрузки, что позволяет отключить линию при коротких замыканиях и возникновении иных аварийных режимов работы, приводящих к появлению сверхтоков.

Предложенная схема по сравнению с известными УЗО постоянного тока имеет следующие преимущества перед известными [2–9]:

- измерение токов утечки при любой полярности и величине напряжения сети;
- универсальность применения независимо от рода тока.

В настоящее время общие требования к УЗО определяются несколькими стандартами [11–15].

Исходя из требований по безопасности электроустановок, были выбраны следующие требования по времени срабатывания УЗО для защиты человека: 30 мс при токах нагрузки менее 16 А, 150 мс при токах нагрузки свыше 16 А.

Значения токов срабатывания УЗО: 6–30 мА при величине тока нагрузки I_n менее 16 А, до 500 мА при величине тока нагрузки свыше 16 А. Указанные требования достаточны при напряжении питающей сети менее 100 В.

Целью моделирования УЗО была проверка соответствия предложенной схемы установленным требованиям, а также определение требований к быстродействию и типу размыкающего ключа.

В предложенной схеме УЗО в качестве устройства управления и обработки сигналов используется микроконтроллер со встроенным АЦП, который позволяет производить преобразование сигналов с ДТ и ДТУ в цифровой вид и затем, осуществляя сравнение полученных значений с заданными уставками, принять решение о размыкании цепи.

Также в используемом микроконтроллере имеется аналоговая подсистема обработки сигналов, состоящая из интегрированного компаратора, на один из входов которого можно подавать сигнал со встроенного ЦАП, а на второй вход – аналоговый сигнал с датчика тока утечки или тока нагрузки. В случае превышения значением сигнала установленной величины, на выходе компаратора появится сигнал, который может быть напрямую подан на устройство размыкания цепи (ключ К).

Моделирование УЗО производилось в пакете Simulink, динамика звеньев цепи обработки сигналов описывалась соответствующими передаточными функциями, параметры передаточных функций были

получены из документации на датчики токов, микроконтроллер.

Структурная схема цифровой цепи обработки сигналов показана на рис. 2.

Передаточные функции ДТ и ДТУ W_{dt} и W_{dtu} представляют собой звенья первого порядка. Постоянные времени были выбраны исходя из динамики датчиков:

$$W_{dt} = \frac{1}{(1/3)s + 1};$$

$$W_{dtu} = \frac{1}{10^{-6}s + 1}.$$

Звенья цифровой обработки сигналов представлены в виде звеньев чистого запаздывания.

Задержка на аналого-цифровое преобразование вычисляется, исходя из следующих данных: $n = 10^6$ – частота выборок АЦП; $z = 256$ – количество усреднений сигнала; $f_T = 48 \cdot 10^6$ – тактовая частота МК; $N = 18$ – количество тактов на одно измерение АЦП.

Полученная задержка на АЦП и усреднение равна 214 мкс. Задержки на сравнение значения с уставкой и выдачу выходного сигнала равняются 10 и 2 мкс соответственно.

Структурная схема аналоговой цепи обработки сигналов показана на рис. 3.

Для устранения помех в схему аналоговой обработки сигналов дополнительно введены входной фильтр первого порядка с частотой фильтрации, на 3 декады превышающей частоту среза датчика тока: для ДТ 10 МГц, для ДТУ 3 кГц. Передаточная характеристика компаратора также представляет собой звено первого порядка с частотой среза 150 МГц.

Для проверки правильности нахождения передаточных функций аналоговой части в программе MicroCap была построена SPICE модель УЗО, которая позволила проверить правильность полученных передаточных функций модели с точки зрения имитации электронных компонентов. Сравнение результатов моделирования аналоговой части в Simulink и MicroCap показало, что передаточные функции модели Simulink найдены верно.

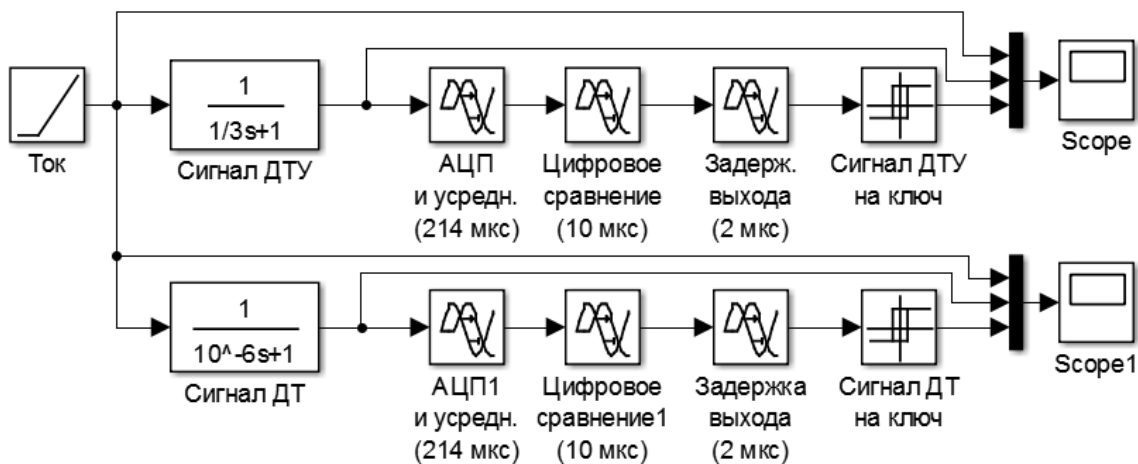


Рис. 2. Структурная схема цифровой цепи обработки сигналов в Simulink

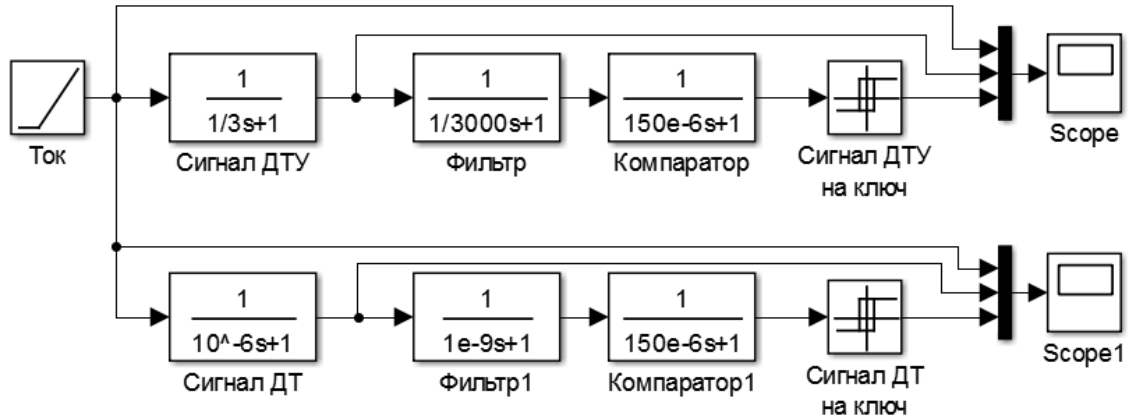


Рис. 3. Структурная схема аналоговой цепи обработки сигналов в Simulink

Результаты моделирования в Simulink показали, что срабатывание УЗО происходит через 150,1 мс (150,4 мс для цифровой схемы) после превышения током утечки заданной величины. Время обработки сигналов составило 330 мкс для цифровой схемы и менее 10 мкс для аналоговой схемы обработки сигнала. Время переходного процесса на датчике тока утечки составило 150 мс.

Срабатывание УЗО на превышение тока нагрузки происходит гораздо быстрее: менее 10 мкс для аналоговой схемы и 330 мкс – для цифровой. При этом время переходного процесса на ДТ не превышает 5 мкс.

Переходные процессы в цифровой схеме обработки сигналов для ДТ и ДТУ показаны на рис. 4 и 5 соответственно, в аналоговой схеме обработки сигналов – на рис. 6 и 7.

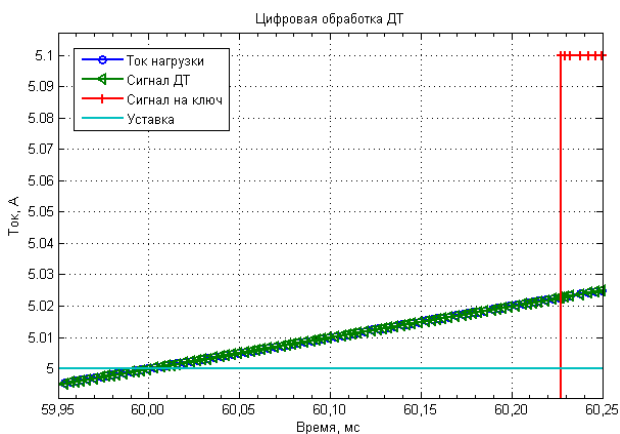


Рис. 4. Переходные процессы для ДТ в цифровой схеме обработки сигналов

Из рис. 4–7 видно, что на результат в основном оказывает влияние динамика датчика тока. Сигнал на выходе датчика тока нагрузки ДТ практически не имеет отставания от реального значения тока, в то время как сигнал ДТУ имеет значительное запаздывание. Время переходного процесса на ДТ гораздо меньше времени переходного процесса на ДТУ, что сокращает до минимума время отключения $t_{откл}$

от момента пересечения током уставки до подачи сигнала на ключ. Влияние способа обработки сигналов также заметно, но по сравнению с быстродействием датчиков тока оно незначительно, особенно в случае ДТУ.

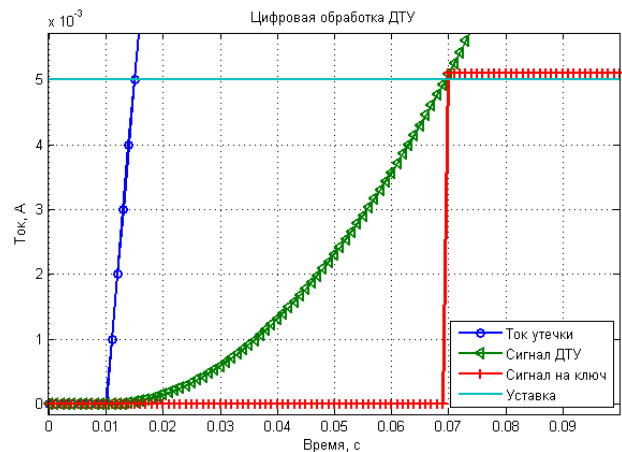


Рис. 5. Переходные процессы для ДТУ в цифровой схеме обработки сигналов

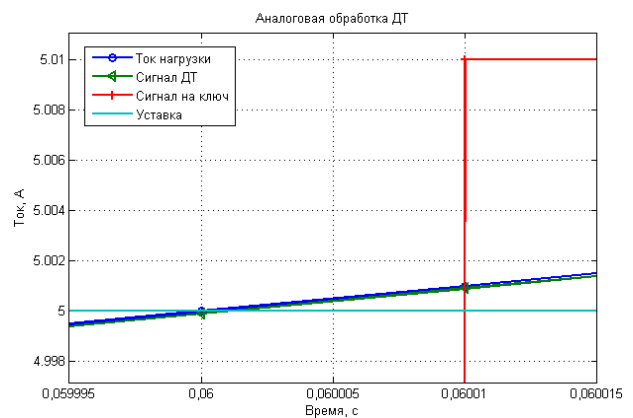


Рис. 6. Переходные процессы для ДТ в аналоговой схеме обработки сигналов

Исходя из полученных результатов, можно определить требования, предъявляемые к быстродействию

размыкающего ключа. Так как быстродействие большинства электромеханических реле составляет сотни миллисекунд, то более целесообразно использовать твердотельные реле на основе полупроводниковых транзисторов, для того чтобы общее время размыкания цепи находилось в пределах нормы [4].

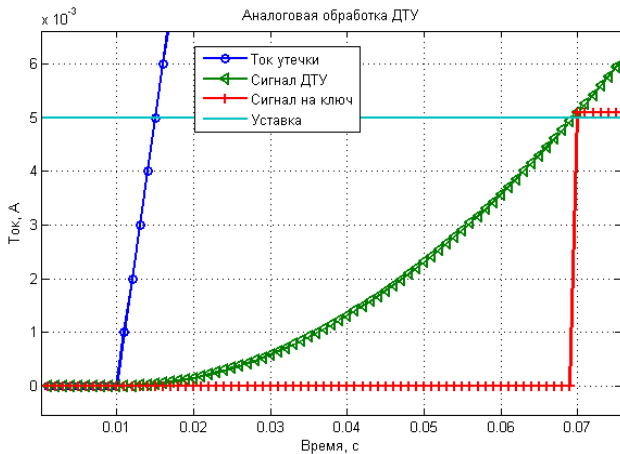


Рис. 7. Переходные процессы для ДТУ в аналоговой схеме обработки сигналов

Заключение. На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что быстродействия предложенной схемы УЗО достаточно для защиты электрооборудования, но недостаточно для защиты человека при контакте с токоведущими шинами. При этом могут использоваться как цифровой, так и аналоговый метод обработки сигналов с датчиков. Цифровой метод обработки сигналов является более гибким и позволяет проводить фильтрацию, корректировать нелинейность и осуществлять иные преобразования сигнала, а также накладывать ограничения на условия срабатывания и применять произвольные алгоритмы обработки сигналов. Аналоговый метод обработки сигналов является более быстродействующим, но менее гибким. Моделирование УЗО показало, что требуются дальнейшие улучшения для обеспечения более высокого быстродействия. Рассмотренный вариант УЗО представляет интерес для защиты электрооборудования и предотвращения появления аварийных ситуаций при снижении сопротивления изоляции при работе с сетями постоянного тока.

Благодарности. Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Соглашение № 14.577.21.0082).

Acknowledgements. The work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (agreement № 14.577.21.0082).

Библиографические ссылки

1. Штабель Н. В., Копылов Е. А., Мизрах Е. А. Устройство защитного отключения сетей постоянного тока // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : тезисы IX Всерос. науч.-практ. конф. творческой молодежи (8–12 апреля 2013, г. Красноярск). В 2 т.

Т. 1. Технические науки. Информационные технологии. Сообщения школьников / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2013. 524 с.

2. Hewitson L. G., Brown M., Balakrishnan R. Practical Power System Protection / Edited by L. G. Hewitson. Oxford : Newnes, 2005.

3. Atabekov G. I. The Relay Protection of High Voltage Networks. Pergamon, 1960.

4. Штепан Ф. Устройства защитного отключения, управляемые дифференциальным током. Прага, 2000. 90 с. : ил.

5. Устройство для измерения токов утечки на троллейбусе и защитного отключения троллейбуса от питающей сети при превышении заданных значений токов утечки : пат. 2017300 Рос. Федерация. № 5047406/07 ; заявл. 15.06.92 ; опубл. 30.07.94.

6. Устройство для измерения сопротивления изоляции сетей постоянного тока : пат. 2026561 Рос. Федерация. № 5005490/21 ; заявл. 16.07.91 ; опубл. 09.01.95.

7. Способ определения сопротивления изоляции электрических сетей : пат. 2044324 Рос. Федерация. № 5049551/10 ; заявл. 24.06.92 ; опубл. 20.09.95.

8. Устройство для контроля тока утечки : пат. 2214612 Рос. Федерация. № 2001116475/09 ; заявл. 13.06.2001 ; опубл. 20.10.2003.

9. Устройство защитного отключения : свидетельство 31688 Рос. Федерация. № 2003107196/20 ; заявл. 19.03.2003 ; опубл. 20.08.2003.

10. Устройство защитного отключения сетей постоянного тока : свидетельство 134707 Рос. Федерация. № 2007400033 ; заявл. 05.06.2013 ; опубл. 20.11.2013.

11. ГОСТ 12.2.007.0–75 ССБТ. Изделия электротехнические. Требования безопасности. М. : Изд-во стандартов, 2003.

12. ГОСТ Р 51328–99 (МЭК 61540–97). Устройства защитного отключения переносные бытового и аналогового назначения, управляемые дифференциальным током, без встроенной защиты от сверхтоков (УЗО-ДП). Общие требования и методы испытаний. М. : Изд-во стандартов, 2000.

13. ГОСТ Р 53312–2009. Устройства защитного отключения. Требования пожарной безопасности. Методы испытаний. М. : Стандартинформ, 2009.

14. ГОСТ Р 50807–95 (МЭК 755–83). Устройства защитные, управляемые дифференциальным (остаточным) током. Общие требования и методы испытаний. М. : Стандартинформ, 2003.

15. ГОСТ 12.4.155–85. ССБТ. Устройства защитного отключения. Классификация. Общие технические требования. М. : Изд-во стандартов, 2003.

References

1. Shtabel' N. V., Kopylov E. A., Mizrakh E. A. [Residual current device for direct current circuits]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики* [Actual Problems of Aviation and Astronautics]. Krasnoyarsk, 2013, p. 122–123. (In Russ.).

2. Hewitson L. G. Mark Brown and Ramesh Balakrishnan, Practical Power System Protection, edited by L. G. Hewitson and Mark Brown, Ramesh Balakrishnan, Newnes, Oxford, 2005, ISBN 9780750663977.
3. Atabekov G. I. The relay protection of high voltage networks, London: Pergamon Press., 1960, ISBN 9781483201054.
4. Shtepan F. *Ustroystva zashchitnogo otklyucheniya, upravlyayemye differentsial'nym tokom* [Residual current operated protective devices.], Prague, 2000.
5. Motuzko F. Ya., Salopaev V. A. *Ustroystvo dlya izmereniya tokov utechki na trolleybuse i zashchitnogo otklyucheniya trolleybusa ot pitayushchey seti pri prevyshenii zadannykh znacheniy tokov utechki*. [A device for measuring leakage currents and trip trolley trolley from the mains supply in excess of the specified values of leakage currents]. Patent RF, no. 2017300, 1994.
6. Bانشchikov V. I., Naumov V. A. *Ustroystvo dlya izmereniya soprotivleniya izolyatsii setey postoyannogo toka*. [An apparatus for measuring the insulation DC networks.]. Patent RF, no. 2026561, 1995.
7. Osetrov V. S., Pikulin G. E. *Sposob opredeleniya soprotivleniya izolyatsii elektricheskikh setey*. [A method for determining the insulation resistance of electric networks]. Patent RF, no. 2044324, 1995.
8. Luchkin S. L. *Ustroystvo dlya kontrolya toka utechki*. [An apparatus for controlling leakage current]. Patent RF, no. 2214612, 2003.
9. Shvarts G. K., Grunskiy G. I. *Ustroystvo zashchitnogo otklyucheniya*. [The circuit breaker]. Utility model RF, no. 31688, 2003.
10. Mizrakh E. A., Shtabel' N. V., Kopylov E. A. *Ustroystvo zashchitnogo otklyucheniya elektricheskoy seti postoyannogo toka* [Residual current device for direct current circuit]. Utility model RF, no. 134707, 2013.
11. *GOST 12.2.007.0-75. SSBT. Izdeliya jelectrotekhnicheskije. Obshchie trebovaniya bezopasnosti*. [State Standard 12.2.007.0-75. Occupation safety standards system. Electrical equipment. General safety requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2003.
12. *GOST R 51328-99 (MEK 61540-97). Ustroystva zashchitnogo otklyucheniya perenosnye bytovogo i analogichnogo naznacheniya, upravlyayemye differentsial'nym tokom, bez vstroennoy zashchity ot sverkh tokov (UZO DP). Obshchie trebovaniya i metody ispytaniy*. [Portable residual current devices without integral overcurrent protection for household and similar use (PRCDs). General requirements and test methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2001.
13. *GOST R 513312-2009. Ustroystva zashchitnogo otklyucheniya. Trebovaniya pozhar noy bezopasnosti. Metody ispytaniy*. [Protective devices. Requirements of fire safety. Test methods.]. Moscow, Standartinform Publ., 2009.
14. *GOST R 50807-95 (MEK 755-83). Ustroystva zashchitnye, upravlyayemye differentsial'nym (ostatochnym) tokom. Obshchie trebovaniya i metody ispytaniy*. [Residual current operated protective devices. General requirements and test methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2003.
15. *GOST 12.4.155-85. SSBT Ustroystva zashchitnogo otklyucheniya. Klassifikatsiya. Obshchie tekhnicheskije trebovaniya*. [State Standard 12.4.155-85. Occupational safety standards system. Earth leakage circuit breakers. Classification. General technical requirements.]. Moscow, Standartinform Publ., 2003.