УДК 621.316

Реализация тепловой защиты контактной сети на контроллерах присоединения тяговых подстанций электротранспорта в горной промышленности

Д.Ю.ЛАНЦЕВ¹✉, В.Я.ФРОЛОВ¹, С.Г.ЗВЕРЕВ¹, Д.УРЛАНДТ², И.ВАЛЕНТА³

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

² Институт плазменных исследований и технологий Лейбница, Грайфсвальд, Германия

³ Технологический университет Брно, Брно, Чешская республика

Как цитировать эту статью: Реализация тепловой защиты контактной сети на контроллерах присоединения тяговых подстанций электротранспорта в горной промышленности / Д.Ю.Ланцев, В.Я.Фролов, С.Г.Зверев, Д.Урландт, И.Валента // Записки Горного института. 2021. Т. 251. С. 738-744. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.13

Аннотация. В статье представлен принцип тепловой защиты контактной сети и обоснована возможность практической реализации этого принципа для рельсового электротранспорта в горнодобывающей промышленности. Описан алгоритм реализации современной цифровой защиты контактной сети как одной из функций работы контроллера. Предложена математическая модель тепловой защиты, вытекающая из решения уравнения теплового баланса. Модель учитывает коэффициент топологии электрической сети, а также коэффициент расхода токоведущего сердечника кабеля, определяющий снижение проводящего сечения от контактной эрозии и роста оксидных пленок. Вводятся поправки на потоки воздуха при получении данных с внешнего анемометра, через протокол телемеханики. Тестирование математической модели проводилось путем написания программы реальной тепловой защиты на языке программирования C для контроллера присоединения, в основе схемотехники которого микроконтроллер STM32F407IGT6 для микроконтроллерного блока. Проверочные испытания проводились на серийном контроллере присоединения в 2020 г. Приведены графики сравнения расчетных и фактических значений температур, при различном коэффициенте расхода токоведущей жилы кабеля постоянного тока. Для получения данных использовались протоколы телемеханики МЭК 60870-104 и Modbus TCP, ПЛИК Segnetics SMH4.

Ключевые слова: тепловая защита контактной сети; релейная защита; современная телемеханика; защитное оборудование тяговых подстанций; защита кабелей постоянного тока; защита горнодобывающего электрооборудования

Введение. На всех современных тяговых электрических подстанциях используется цифровое электронное оборудование. Наиболее распространенные контроллеры присоединений среднего уровня базируются на микроконтроллерах с ядром ARM Cortex-M4 различных производителей. В нашей стране популярны контроллеры компании ST или Texas Instruments, например, контроллер TMS320F28335. Пример реализации таких контроллеров рассмотрен в работе [23]. Их использование экономически оправдано тем, что они могут уверенно поддерживать операционную систему реального времени, например, FreeRTOS. На контроллеры присоединения возлагаются задачи горизонтальной связи с другими контроллерами и вертикальной связи с контроллером уровня подстанции, а также связи с различными устройствами нижнего уровня. На среднем уровне цифровой системы подстанции необходимо регистрировать аварийные осциллограммы в формате Comtrade для последующей загрузки и анализа развития аварии в соответствии с МЭК 60255-24, например, в публикациях [25, 29] осциллограммы получены в результате моделирования работы реле телемеханики. Как правило, контроллеры присоединения реализуют несколько защит, например токовую и дифференциальную, а в системах на постоянном токе также очень важной является тепловая защита от перегрева контактной сети [4, 9, 13], вызывающая уменьшение сечения проводимости от контактной эрозии и роста оксидных пленок медной жилы проводника. Тепловая защита контактной сети предохраняет от малых токов короткого замыкания и предназначена для отключения питающего фидера при приближении расчетной температуры контактного провода к температуре отжига меди. Особую актуальность проблема борьбы с малыми токами короткого

замыкания имеет в горнодобывающей промышленности, поскольку любые перебои в работе электроснабжения грозят большими финансовыми потерями и человеческими жертвами. Наибольший интерес может представлять внедрение данного алгоритма на железорудных предприятиях, оборудованных тяговым электровозным транспортом с максимальным напряжением постоянного тока до 600 В.

Постановка задачи. Контроллер непрерывно осуществляет измерение тока нагрузки фидера с частотой опроса 100 кГц и на его основе рассчитывает температуру контактного провода. При достижении предельной температуры провода контроллер производит безусловное отключение выключателя, что происходит независимо от выбранного режима управления телемеханикой присоединения как в местном, так и дистанционном режиме. Объектом исследования в данной работе является тепловая защита контактной сети (ТЗКС), где уставкой срабатывания служит расчет критической температуры токоведущего провода.

Предложенный метод должен быть реализован с использованием микроконтроллера и иметь приемлемые для этого ограничения. Кроме того, для эффективной работы в современной системе цифровой подстанции контроллер присоединения должен поддерживать протоколы МЭК 60870-104 и МЭК 61850, поскольку работать без возможности интеграции по этим протоколам запрещается ведомственными приказами эксплуатирующих подстанции организаций. Применение протокола МЭК 61850 требует наличия файла формата ICD, который с помощью формата описывает возможности устройства. При интеграции нового оборудования в сеть подстанции происходит автоматическое добавление новых устройств в общую структуру обмена данными, что уменьшает издержки пусконаладочных работ.

В работе [28] описана абстрактная модель системы, реализованная в соответствии с протоколом МЭК 61850, а также рассматривается использование в системе связи подстанции подмножество протоколов GOOSE и MMS. Для реализации данных функций необходимо иметь надежную файловую систему на внешнем для микроконтроллера носителе NOR Flash. Методы программирования для увеличения надежности файловых систем на встраиваемых системах были рассмотрены в статье [27]. Оборудование выполняет также функции неразрушающего контроля. В работе [8] рассмотрены особенности актуальных методов неразрушающего контроля. В публикации [7] описаны методы управления процессом контроля твердости токоприемников в неразрушающем контроле, допустимые дефекты при неразрушающем контроле рассмотрены в статье [18]. Задача реагирования на нештатные ситуации, выявленные неразрушающим контролем, описаны в статье [6]. Питание выпрямительных агрегатов подстанции постоянного тока должно соответствовать нормам [2, 10, 12], либо требуется применять установки для компенсации реактивной мощности [20, 32, 33]. В работе [35] описан способ подключения фильтрующего устройства к подстанции. Фидер должен быть оборудован устройством дугогашения, принципы работы данных устройств описаны в статьях [22, 30, 31]. Шахтная сеть требует дополнительной защиты от искрения [5]. Моделирование устройств релейной защиты для контактной сети рассмотрено в публикациях [1, 11, 14]. Вопрос синтеза измерительного пускового органа РЗА рассмотрен в статье [17]. Устройство должно соответствовать требованиям быстродействия и селективности [3, 16].

Методы исследования. Ранее реализация тепловой защиты контактной сети рассматривались разными авторами [21, 24, 34]. Были предложены оригинальные математические модели, однако некоторые из них излишне сложны для реализации на практике и организации расчетов на небольшом встраиваемом устройстве. Целью принимаемых в данной работе расчетов при принятых допущениях является реализованный на практике метод защиты во встраиваемой системе. Это означает, что результатом работы является готовый математический алгоритм быстрого расчета температуры контактной сети от протекающего через фидер тока. Задача исследования состоит, во-первых, в выведении теоретической формулы, которая в принятом доверительном интервале будет достаточной для применения в расчетах при ограниченных вычислительных ресурсах; во-вторых, в использовании эмпирических соотношений, полученных при экспериментальных исследованиях.

Для получения практических результатов использована аппаратная часть реального контроллера присоединения с модифицированной прошивкой специально для проведения испытаний. Контроллер измеряет ток фидера через преобразователь уровня тока –1000-1000 А в –5-5 мА. На основной плате контроллера присоединения расположен 32-битный микроконтроллер фирмы

ST STM32F407IGT6. Для создания программы на языке C в качестве интегрированной среды разработки были использованы QT Creator и компилятор языка C arm-none-eabi-gcc, где в качестве отладчика применялся arm-none-eabi-gdb с программой OpenOCD.

Большинство современных методов расчета температуры [15, 19, 26] провода контактной сети и допустимой токовой нагрузки основаны на решении уравнения теплового баланса, записанного в дифференциальной форме на единицу длины оголенного провода (1 м) при фиксированном значении тока в проводе,

$$I^2 R_0 (1 + \alpha v_t) dt = C dv_t + k v_t dt, \quad (1)$$

где C – теплоемкость провода, Вт · с/(°С · м) (принимается независимой от температуры); v_t – температура перегрева провода относительно температуры окружающей среды, °С; I – значение тока в проводе, А; R_0 – сопротивление 1 м провода по постоянному току при температуре 20 °С, Ом/м; α – температурный коэффициент сопротивления провода, °С⁻¹; t – текущее время, с; k – коэффициент, учитывающий теплоотдачу от провода в окружающую среду, Вт/(°С·м).

После интегрирования левой и правой частей уравнения можно взять неопределенные интегралы, а затем добавить к решению постоянный член, который можно определить из начальных условий. Если значения температурных уставок тепловой защиты не превышают 100 °С, то влияние изменения величины сопротивления от температуры провода на погрешность расчета можно считать незначительным. Исходя из этого, будем считать $\alpha = 0$.

Несмотря на то, что ток в проводе контактной сети изменяется непрерывно, при расчете цифровым методом, основанным на изложенной математической модели, в течение расчетного периода времени в контроллере ток будет пониматься как постоянная эффективная величина. Она будет эквивалентна выделению тепла в проводе. Предполагается, что погрешность температурного расчета не повлияет на эффективность защиты контактной сети от воздействия высоких температур. Ключевым параметром в данном упрощении является значение длительности расчетного периода. При выборе этого значения необходимо учитывать скорость вычислений контроллера, загруженность процессора смежными задачами, с одной стороны, и инерционность тепловых процессов в материале провода контактной сети – с другой, этим обеспечивается требование к быстрейшему действию защиты:

$$v_{t+1} = v_t + \left(\frac{(I_{rms} k_c)^2 R}{k_i k} - v_t \right) \left(1 - e^{-\frac{1}{\tau}} \right), \quad (2)$$

где I_{rms} – действующее значение тока фидера в текущем цикле вычислений; v_t, v_{t+1} – расчетная температура нагрева провода в предыдущем и текущем циклах вычислений соответственно; R – омическое сопротивление 1 м провода; k_c – коэффициент топологии сети; k_i – коэффициент износа провода; k – коэффициент тепловых потерь (табл.1); τ – постоянная времени переходного процесса (табл.2).

Из выражения (1) в результате математических преобразований и описанных ранее упрощений выводится формула (2), которая может быть использована в цифровых расчетах на микроконтроллере, установленного на контроллере присоединения.

Величина тока в фидере имеет очень неустойчивый характер главным образом из-за того, что соединение электрического транспорта производится путем скольжения токоприемников по контактным проводам контактной сети.

Как упоминалось, для выполнения расчетов температуры проволоки необходимо определить эффективное значение тока фидера за одну секунду. Хорошо известно,

Таблица 1

Коэффициент потерь для различных скоростей ветра	
$V, \text{ м/с}$	k
$V = 0$	3,4
$0 < V < 2$	4,9
$2 < V < 4$	5,7
$4 < V < 10$	7,3
$10 < V$	8,3

Таблица 2

Постоянная времени переходного процесса
для основных марок кабеля

$V, \text{ м/с}$	$\tau \text{ МФ85}$	$\tau \text{ МФ100}$
$V = 0$	86	102
$0 < V < 2$	60	70,8
$2 < V < 4$	52	61,3
$4 < V < 10$	40,3	47,5
$10 < V$	35,4	41,8

что эффективное значение вычисляется как действующее значение выходного тока за данную выборку. Это значение определяется как квадратный корень из суммы квадратов входных значений, деленный на значение размера выборки. Получение следующего значения тока может быть условием начала цикла расчета для определения новой величины тока температуры провода.

Уравнение теплового баланса учитывает отвод тепловой энергии от провода в виде величины коэффициента потерь k . Потери состоят из двух основных составляющих: конвективных и потерь излучения. Конвективные потери образуются за счет передачи тепла контактным способом от поверхности проволоки воздуху окружающей среды. Определяющими факторами теплообмена в этом случае являются скорость и направление движения воздуха, обтекающего проволоку. В связи с тем, что с минимальной погрешностью технически сложно получить эти значения для конкретных участков контактной сети, учет конвективных тепловых потерь приходится рассчитывать усредненным эмпирическим методом, разработанным на основе экспериментальных данных [15]: $k = 2,81v^{0,59} + 3,4$, где первое слагаемое образуется вкладом конвективных потерь, выводится из критериальных уравнений и подстановкой усредненного значения радиуса рассматриваемых в табл.2 проводов; второе слагаемое образуется вкладом потерь на излучение без учета температуры окружающего воздуха и провода ввиду их небольшого числа. Если принять коэффициент черноты поверхности провода $\varepsilon = 0,78$ (окисленная медь), то $k_\varepsilon = 3,4$, по формуле из работы [15], где она приведена как расчетная для определения потерь на излучение:

$$k_\varepsilon = 4,44\varepsilon(1 + 0,008t_{\text{пров}})(1 + 0,0045t_{\text{возд}}).$$

Для облегчения расчетов температуры для нового провода целесообразно вычислить значения коэффициента потерь для нескольких диапазонов значений скорости ветра и разместить их в расчетной таблице (табл.1), которую можно будет использовать для упрощения расчетов на микроконтроллере. Погрешность расчетов при таком упрощении можно считать незначительной. Таким образом, при расчете температуры необходимо учитывать скорость ветра и теплоемкость, которая зависит от массы, т.е. от марки провода. Если под расходом провода понимать изменение формы ее поперечного сечения вследствие эрозионного воздействия токоприемников подвижного состава и появления оксидной пленки, то изменяются два параметра провода, существенно влияющих на его температуру в процессе эксплуатации. Уменьшение площади поперечного сечения приводит к увеличению сопротивления току, а уменьшение массы – к уменьшению теплоемкости провода.

Теплоемкость провода повышается с увеличением веса (изменением марки провода) и уменьшается с увеличением расхода провода; соответственно, увеличивается или уменьшается постоянная времени переходного процесса. Провод с большим сечением нагревается медленнее, а изношенный – быстрее. Постоянная времени переходного процесса зависит от теплоемкости провода и коэффициента потерь тепла. В табл.2 приведены расчетные значения постоянной времени переходного процесса для основных марок кабеля при изменении температуры провода. Данная таблица будет занесена в память микроконтроллера для упрощения расчетов, в ней принято допущение, что сопротивление провода не зависит от температуры.

Величина тока, измеряемая контроллером ячейки фидера, представляет собой сумму токов, протекающих по проводам контактной сети. Фактическое распределение токов в каждом проводе зависит от многих факторов, которые технически невозможно учесть. На практике на большинстве участков проводов контактной сети значение тока может быть значительно меньше, чем значение тока, измеренное на преобразователе контроллера. Поэтому фактический нагрев этих проводов может быть меньше расчетного значения. В этом случае тепловая защита может срабатывать преждевременно. Однако, задав коэффициент топологии сети, можно приблизительно учесть конструктивные особенности данного участка сети для снижения вероятности ложных срабатываний тепловой защиты, тем самым обеспечив необходимое требование селективности. В части расчета данного коэффициента возможно дальнейшее совершенствование методов расчета для тепловой защиты контактной сети.

Обсуждения. Для проверки приведенной теоретической формулы были проведены экспериментальные исследования на тяговой подстанции городского электротранспорта. Параметры напряжения на шинах постоянного тока тяговой подстанции городского электротранспорта

полностью соответствуют параметрам напряжения на железорудной шахте (600 В постоянного тока), характеристика используемого подвижного состава примерно эквивалентна.

Значения температуры воздуха, скорости воздушного потока, марки проволоки, расхода проводника и топологии контактной сети, а также настройки температуры сигнализации и защиты должны подаваться на контроллер из протокола телемеханики от соответствующих измерительных преобразователей величин.

Тестовая программа для контроллера написана на языке программирования C, в качестве метода расчета температуры путем измерения тока используется формула (2). Для контроля результатов эксперимента использовался провод типа МФ100, было подключено два контактных термодатчика Pt100 в разных частях кабеля МФ100.

Рис.1. Схема эксперимента

Рис.2. Зависимости действующего значения тока (а), расчетных и фактических температур (б) кабеля от отсчетов (1 отсчет – 100 мс)
1 – Тмсу; 2 – Трт100(1); 3 – Трт100(2)

Схема эксперимента представлена на рис.1. Один контактный датчик устанавливался на новом участке кабеля, второй – на участке кабеля с расходом. Эти датчики типа Pt100 были подключены к ПЛК Segnetics SMH4 для получения данных от них по протоколу Modbus TCP, далее через OPC Server в программу для анализа на компьютере MATLAB Simulink.

Данные, измеренные тестируемым устройством, были получены программой, реализованной в MATLAB, от OPC-сервера протокола IEC 60870-104, реализованного на контроллере присоединения. Клиент MATLAB Simulink OPC принимал данные по протоколам Modbus TCP и МЭК 60870-104 для получения данных в формате CSV. По полученным данным были построены графики, представленные на рис.2.

На рис.2, а действующее значение тока изменяется неравномерно из-за особенностей работы оборудования, установленного на электротранспорте. Скачки тока объясняются тем, что трамваи стартуют с места, в момент их равномерного движения потребление тока значительно ниже представленных на графике пиковых значений. При торможении электротранспорта может наблюдаться рекуперация, в этом случае ток будет отрицательный. Для ограничения влияния резких колебаний значений постоянного тока при реализации на микроконтроллере в модуле аналого-цифрового преобразования с измерительного канала после считывания значений по шине SPI был применен медианный фильтр. Далее применялся рекурсивный фильтр Калмана. Таким образом, переходные процессы, вызванные разгонными режимами тягового транспорта корректно учитывались предложенным алгоритмом.

На рис.2, б представлены значения расчетной температуры провода, полученные от контроллера присоединения, и два значения

температуры провода, измеренные ПЛК Segnetics SMN4 при помощи датчиков Pt100, которые были установлены на проводе в точках с различными значениями k_i .

Заключение. Анализ графиков (рис.2) показал, что в первой половине эксперимента расчетная температура $T_{\text{тси}}$ соответствовала значениям датчика Pt100, во второй половине отмечаются некоторые расхождения расчетной и фактических температур, однако для оценки адекватности работы защиты достаточно, чтобы она точно воспроизводила тенденции, а абсолютные значения не очень важны. Данные расхождения объясняются линейностью температурного датчика Pt100, а также различными коэффициентами износа провода и топологии сети.

В конце эксперимента термочувствительный датчик 2 принудительно охлаждался вентилятором, в связи с этим его показания стали ниже вычисленной температуры, тем самым было воспроизведено действие воздушных потоков на кабель.

В результате эксперимента было установлено, что основные закономерности расхода жилы проводника от атмосферного воздействия (рост оксидной пленки) и электрической контактной эрозии, приводящие к перегреву проводника, адаптированы с системой защиты, основанной на контроллере присоединения, применяемом на цифровой подстанции. Полученные абсолютные погрешности косвенных измерений не превышают 10 % при правильной настройке коэффициентов для выражения (2). Предложенная авторами модель имеет некоторые допущения, а именно: во время каждого цикла температурных расчетов значения тока и температуры провода считаются постоянными. Также сопротивление провода в период измерительного цикла не зависит от изменения ее температуры.

Предложен алгоритм расчета температуры контактной сети по измерению тока, а также доказана корректность полученной формулы ее определения на основе практической реализации на тяговой подстанции. Разработанный метод может быть рекомендован, для применения на контроллерах присоединения тяговой подстанции в железорудных шахтах на горнодобывающих предприятиях с контактными электровозами на постоянном токе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ возможности использования программного продукта «ELPLEK» для моделирования работы релейной защиты / А.В.Кухарчук, Д.И.Жданова, Я.И.Квитко и др. // Фундаментальные исследования. 2016. № 11-3. С. 543-547.
2. Вагин Г.Я. Комментарий к новому стандарту на качество электрической энергии ГОСТ Р 54149-2010 и сопровождающим его стандартам // Промышленная энергетика. 2013. № 1. С. 39-43.
3. Вдовин С.А. Повышение чувствительности и быстродействия поперечной дифференциальной токовой защиты шунтирующего реактора с использованием динамической коррекции установок при холодном пуске / С.А.Вдовин, А.С.Шалимов // Релейная защита и автоматизация. 2011. № 3 (4). С. 58-61.
4. Гаранин М.А. Апробирование технологии снятия данных с устройств ЦЗАФ и ТЗКС / М.А.Гаранин, С.А.Блинкова // Вестник транспорта Поволжья. 2015. № 5 (53). С. 31-36.
5. Защита электрической шахтной сети напряжением до 1000 В от искрения в силовых контактных соединениях / А.П.Ковалев, М.А.Нагорный, С.В.Соленый, Г.В.Демченко // Взрывозащищенное электрооборудование. 2010. № 1. С. 109-115.
6. Звонков И.В. Обеспечение неразрушающего контроля железнодорожного пути при ограниченности ресурсов // Транспортная инфраструктура сибирского региона, 10-13 апреля 2018, Иркутск, Россия. Иркутский государственный университет путей сообщения, 2018. Т. 1. С. 413-417.
7. Кирков И.С. Разработка методов управления процессом контроля твердости в условиях лаборатории неразрушающего контроля / И.С.Кирков, Ю.Г.Сильвестров // Современный стиль управления, 28 октября 2016, Чебоксары, Россия. Чувашский государственный педагогический университет им. И.Я.Яковлева, 2016. С. 590-594.
8. Лошкарев И.Ю. Неразрушающий контроль. Особенности методов неразрушающего контроля / И.Ю.Лошкарев, А.С.Чернышов // Актуальные проблемы энергетики АПК, 1-30 апреля 2013, Саратов, Россия. Ижевск: Буква, 2013. С. 184-186.
9. Паранин А.В. Совершенствование аэродинамических и тепловых расчетов проводов контактной сети: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург: Уральский государственный университет путей сообщения, 2011. 24 с.
10. Попов О.Ю. Определение допустимых отклонений напряжения сети при различных подходах к нормам качества электроэнергии / О.Ю.Попов, Е.Ю.Логинова // Образовательная среда сегодня и завтра: Сборник научных трудов IX Международной научно-практической конференции, 30-31 октября 2014, Москва, Россия. Московский технологический институт, 2014. С. 331-334.
11. Пупынин В.Н. Частично-неселективная защита контактной сети / В.Н.Пупынин, К.С.Субханвердиев, М.В.Николаев // Локомотив. 2015. № 9 (705). С. 40-41.
12. Соснина Е.Н. К анализу норм качества электроэнергии для локальных систем электроснабжения / Е.Н.Соснина, А.В.Шалуха // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2013. № 3. С. 50-54.
13. Толстикова А.Н. Тепловая защита контактной сети электротранспорта / А.Н.Толстикова, Н.Г.Толстиков // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2010. Т. 2. № 7. С. 30-32. DOI: 10.15587/1729-4061.2010.2698
14. Умаров У. Моделирование действия релейной защиты в фидерах контактной сети с использованием программных комплексов MATLAB и SimPowerSystems / У.Умаров, И.М.Бедрицкий // Молодежь в науке: новые аргументы, 27 марта 2015, Липецк, Россия. Липецк: Аргумент, 2015. С. 96-98.

15. Уточнения к основам теории нагревания проводов воздушных линий электропередачи / Е.П.Фигурнов, Ю.И.Жарков, Т.Е.Петрова, А.Б.Кууск // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2013. № 1. Р. 36-40.
16. Формализация процедуры распознавания аварийных режимов электрических сетей / И.В.Нагай, В.И.Нагай, С.В.Сарры и др. // Кибернетика энергетических систем, 25-26 сентября 2018, Новочеркасск, Россия. Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И.Платова, 2018. С. 359-364.
17. Шарыгин М.В. Синтез универсального многомерного измерительно-пускового органа релейной защиты / М.В.Шарыгин, А.Л.Куликов, А.А.Петров // Электричество. 2020. № 1. С. 4-11. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-1-4-11
18. Штефан Ю. Нормы допустимости дефектов при неразрушающем и статическом контроле // Управление качеством. 2018. № 5. С. 55-58.
19. Assessment of thermal reliability of thermal protection systems by importance sampling method / Deng Shiyuan, Xin Jianqiang, Zhang Kun et al. // Journal of Chongqing University 2019. Vol. 42. Iss. 2. P. 62-70. DOI: 10.11835/j.issn.1000-582X.2019.02.007 (in Chinese).
20. Bystrov A. Pulse generator of a polygonal design with a high rate of voltage / A.Bystrov, D.Lantsev // International Scientific Electric Power Conference, 23-24 May 2019, Saint Petersburg, Russian Federation. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019. Vol. 643. № 012073. DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012073
21. Development of Testing Environment for Thermal Protective Clothing at Critical Conditions / Sungwook Kang, Minjae Kwon, J.Yoon Choi, Sengkwan Choi // The Proceedings of 11th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, 22-24 October 2020, Taipei, Taiwan. Springer, 2020. P. 435-449. DOI: 10.1007/978-981-32-9139-3_32
22. Ehrhardt A. Arc Fault Protection System in Low-Voltage Installations for Protecting Installations and Persons // Plasma Physics and Technology. 2015. Vol. 2. P. 120-123.
23. Frolov V. Imitating model of a microprocessor trip unit of a circuit Breaker / V.Frolov, A.Bystrov, A.Neelov // Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (ElConRus), 1-3 February 2017, St. Petersburg and Moscow, Russia. IEEE, 2017. P. 838-840. DOI: 10.1109/ElConRus.2017.7910686
24. Huang Jie. Damage Tolerance Analysis on Thermal Protection System / Huang Jie, Yao Weixing // Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. 2018. Vol. 50. Iss. 4. P. 509-515. DOI: 10.16356/j.1005-2615.2018.04.012 (in Chinese).
25. Identification of the protection parameters of the local electrical network taking into account the detuning of the inrush current / V.Frolov, A.Neelov, R.Zhiligotov, A.Bystrov // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 29 January – 1 February 2018, Moscow and Saint Petersburg, Russia. IEEE, 2018. P. 626-628. DOI: 10.1109/ElConRus.2018.8317174
26. Jupe S. De-risking the implementation of real-time thermal ratings / S.Jupe, G.Murphy, A.Kazerooni // 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013), 10-13 June 2013, Stockholm, Sweden. CIRED, 2013. DOI: 10.1049/cp.2013.1075
27. Lantsev D. Methods of increasing the reliability of external memory of digital substation bay controllers / D.Lantsev, V.Frolov // International Scientific Electric Power Conference, 23-24 May 2019, Saint Petersburg, Russian Federation. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019. Vol. 643. № 012117. DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012117
28. Matousek P. Description of IEC61850 // Faculty of Information Technology Brno University of Technology 2018. Technical Report no. FIT-TR-2018-01.
29. Othman M. Modeling and simulation of the industrial numerical distance relay aimed at knowledge discovery in resident event reporting / M.Othman, A.Ishak, N.Wahab // Malaysia Journal Citation Reports. 2014. Vol. 90. Iss. 6. P. 660-686. DOI: 10.1177/0037549714532961
30. Schau H. Proving tripping safety and immunity against malfunctions of the optical arc detection components of a novel electric arc protective system / H.Schau, A.Ehrhardt // International Conference on Live Maintenance (10th ICOLIM), 31 May – 2 June 2011, Zagreb, Croatia. Technische Universität Ilmenau, 2011. № 2012200106.
31. Schau H. The Influence of fuses on arcing fault energy and personal protective clothing required / H.Schau, H.Bessei // 9th International Conference on Electrical Fuses and their Applications (ICEFA), 12-14 September 2011, Maribor, Slovenia. ICEFA, 2011. 9 p.
32. Shklyarskiy Ya.E. Compensation of the reactive power in the presence of higher voltage harmonics at coke plants / Ya.E.Shklyarskiy, A.N.Skamyin // Coke and Chemistry. 2016. Vol. 59. P. 163-168. DOI: 10.3103/S1068364X16040062
33. Skamyin A. Reactive power compensation considering high harmonics generation from internal and external nonlinear load / A.N.Skamyin, A.A.Belsky // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 87. Iss. 3. № 032043. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032043
34. Wojtkowski W. LED Power Supply with Thermal Protection for Automotive Application // VII Lighting Conference of the Visegrad Countries (Lumen V4), 18-20 September 2018, Trebic, Czech Republic. IEEE, 2018. DOI: 10.1109/LUMENV.2018.8521069
35. Zamyatin E. Filter compensating devices connection technique / E.Zamyatin, I.Voytyuk, E.Zamyatina // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 28-31 January 2019, Saint Petersburg and Moscow, Russia. IEEE, 2019. № 18505271. DOI: 10.1109/ElConRus.2019.8657107

Авторы: Д.Ю.Ланцев, инженер-исследователь, mank-qwe-9874@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5481-2886> (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия), В.Я.Фролов, д-р техн. наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-1744-4375> (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия), С.Г.Зверев, канд. техн. наук, директор Института энергетики, <https://orcid.org/0000-0003-1309-6024> (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия), Д.Урландт, Ph.D, член правления, <https://orcid.org/0000-0001-6534-147X> (Институт плазменных исследований и технологий Лейбница, Грайфсвальд, Германия), И.Валента, Ph.D, доцент, <https://orcid.org/0000-0001-7359-3511> (Технологический университет Брно, Брно, Чешская республика).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья принята к публикации 18.10.2021.

Выход в свет 16.12.2021.