

Разработка стенда демонстрации поражения человека электрической дугой при проколе кабельной линии 10 кВ

БОРИСОВ Р.К., ЖУЛИКОВ С.С., ХРЕНОВ С.И., ТУРЧАНИНОВА Ю.С., КОШЕЛЕВ М.А., БЕЛОУСОВ С.В., МАКУХА И.С., ТРОФИМОВ О.Ю., ИЛЬИНА Е.В.

В рамках научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы по теме «Проведение теоретических и экспериментальных исследований и разработка стендов демонстрации опасности поражения электрическим током на учебном полигоне» кафедрой ТЭВН НИУ «МЭИ» разработан, изготовлен, испытан и введен в эксплуатацию в Учебном центре «Россети Московский регион» стенд «Короткое замыкание на кабельной линии 10 кВ при проколе под напряжением». При разработке стенда выбраны тип и параметры источника питания, разрядной цепи и коммутирующего устройства. В качестве источника питания используется однофазный повышающий трансформатор 0,4/10 кВ малой мощности с диодом. Разрядная цепь состоит из емкостного накопителя энергии емкостью 5 мФ, промышленного реактора индуктивностью 1,8 мГн и стандартного (порохового) прокалывающего устройства, приводимого в действие дистанционно. При проколе изоляции кабельной линии между заземленным экраном и находящейся под потенциалом накопителя жилой создается дуговое короткое замыкание. Прокалывающее устройство выполняет функцию коммутатора и нагрузки, которой является активное сопротивление дуги. Для выбранных параметров элементов стенда и напряжения накопителя 4 кВ получен колебательный затухающий импульс тока с амплитудой первой полуволны 7 кА, частотой колебаний около 50 Гц. Параметры импульса позволили получить при выбросе дуги ощутимые, но безопасные для обучающихся, световое и звуковое воздействия. Стенд можно многократно использовать при незначительной замене отдельных его элементов на территории действующей подстанции без риска возникновения аварийной ситуации.

К л ю ч е в ы е с л о в а: кабельная линия, короткое замыкание, прокол кабельной линии, электрическая дуга, поражение электрическим током, учебный стенд

При проведении работ на действующих электроустановках персонал электросетевых компаний, к сожалению, не всегда глубоко осознает опасность воздействия напряжения и тока на организм человека. Проверка знаний техники безопасности, воспринимается, порой, как формальная процедура. Это относится и к тем работникам, которые проработали много лет, так как чувство опасности у них со временем может притупляться. По данным Ростехнадзора, за 12 месяцев 2018 г. произошло 39 несчастных случаев со смертельным исходом, в том числе 3 групповых несчастных случая (зафиксирована гибель 40 человек) [1]. Руководством «Россети Московский регион» было принято решение о создании полигона демонстрации опасности поражения электрическим током на базе собственного Учебного центра, расположенного на ПС № 157 «Горенки». Основная цель создания полигона: демонстрация обучающимся в наиболее наглядной форме опасности поражения электрическим током и электрической дугой в максимально приближенных к реальным условиям работы в электрических

сетях. С учетом анализа причин возникновения электротравматизма в электросетевых компаниях были разработаны стенды по охране труда, воспроизводящие наиболее часто встречающиеся в быту и на производстве ситуации, приводящие к несчастным случаям:

поражение от напряжения прикосновения и шага при падении провода ВЛ–10 кВ на автомобиль, на землю и однофазном замыкании на опору ВЛ–10 кВ;

поражение электрической дугой при проколе кабеля 10 кВ под напряжением или при случайном повреждении кабеля при проведении земляных работ, коротком замыкании (КЗ) по одежде (и сгорании ее) при работах на опоре и замыкании в щитке 0,4 кВ;

поражение при приближении человека к токоведущим частям электроустановки высокого напряжения (до 100 кВ).

Данный проект был реализован в 2019 г. кафедрой «Техника и электрофизика высоких напряжений» (ТЭВН) ФГБОУ ВО Национальный исследовательский университет «МЭИ». Одним из самых

сложных по принятым техническим решениям и исполнению является стенд «Короткое замыкание на кабельной линии 10 кВ при проколе под напряжением».

Постановка задачи. Стенд предназначен для демонстрации опасности поражения электрической дугой человека при его нахождении рядом с прокалывающим устройством во время штатного прокола кабельной линии¹ или при случайном ее повреждении при проведении земляных работ. При разработке стенда необходимо было решить следующие задачи:

образование и выброс дуги во время демонстрации стенда должны максимально точно воспроизводить процессы, происходящие при проколе реальной кабельной линии (КЛ) 10 кВ под напряжением;

мощность и длительность дуги должны быть такими, чтобы ее горение было безопасно для обучающихся, но в тоже время оказывало сильное впечатление и могло надолго ими запомниться;

стенд при эксплуатации (в работе и режиме ожидания) должен быть безопасен для обслуживающего персонала (преподавателей) и обучающихся;

исполнение демонстрационной части стенда (участок КЛ, прокалывающее устройство) и порядок действий должны максимально соответствовать реальным условиям и процедуре прокола КЛ;

стенд не должен оказывать влияние на работу расположенного в непосредственной близости технологического оборудования действующей подстанции;

стенд должен быть предназначен для многократного использования, при этом допускается замена некоторых его элементов (например, кабельной вставки, наконечника пробойника прокалывающего устройства и т.д.).

Принятые технические решения. Прокол реальной КЛ 10 кВ под напряжением на территории действующей подстанции небезопасен, так как существует вероятность возникновения аварии при КЗ или пожара из-за выброса продуктов горения дуги при постоянной ее подпитке от источника питания (трансформатора). При проколе изоляции кабеля под напряжением ток КЗ может достигать 10 кА. Получить ток такого значения можно от сети 10 кВ, но многократно устраивать КЗ в сети действующей подстанции нежелательно. В связи с этим было принято решение использовать автономный источник питания (трансформатор с вы-

прямителем) и емкостный накопитель энергии, представляющий собой батарею конденсаторов. Батарея в течение длительного времени накапливает энергию от маломощного источника, а в нужный момент времени подключается к нагрузке и отдает ей запасенную энергию за время, значительно меньшее времени накопления. Тем самым обеспечивается выигрыш в мощности системы питания.

Одной из наиболее важных задач, решаемых при разработке емкостных накопителей, является выбор типа и конструкции коммутирующего устройства – промежуточного элемента между накопителем энергии и нагрузкой. Основное требование к коммутирующим устройствам мощных импульсных генераторов – переход коммутатора из непроводящего состояния в состояние высокой проводимости должен происходить за время, существенно меньшее длительности генерируемого импульса [2, 3]. В накопителях со сравнительно небольшими токами (до 10 кА) обычно применяются двух- или трехэлектродные (тригatronы) воздушные разрядники [4]. Главным их недостатком является нестабильность работы из-за эрозии электродов и влияния условий окружающей среды. В емкостных накопителях часто применяются тиристоры с системой управления. Они просты в использовании, но имеют ограничения по значениям приложенного напряжения и рабочего тока, поэтому не могут быть использованы в качестве коммутатора для стенда.

Отрицательным свойством применяемых коммутаторов является то, что при срабатывании в них выделяется значительная часть запасенной в накопителе энергии, что существенно снижает энергию, которая должна выделиться в нагрузку. В связи с этим было принято решение в качестве коммутатора использовать само устройство для прокола КЛ. Устройство приводится в действие дистанционно и при проколе создает дуговое КЗ между заземленным экраном и находящейся под высоким потенциалом жилой КЛ. По оценочным расчетам время прокола КЛ на порядок меньше длительности проходящего через место КЗ тока. Таким образом, прокалывающее устройство может использоваться одновременно и как коммутирующее устройство, и как нагрузка (в данном случае нагрузкой является активное сопротивление дуги). Предложенные технические решения представлены в виде функциональной схемы стенда на рис. 1.

Выбор параметров накопителя и разрядной цепи. Для выбора параметров элементов стенда использовались следующие исходные данные: длина дуги 1 см (толщина прокалываемой изоляции кабе-

¹ 4-Б-10 Инструкция по эксплуатации устройства дистанционного прокола (порохового) кабеля ДПК/Тодирка С.Н. и др. М.: Распоряжение МКС – филиала ОАО «МОЭСК» от 14.11.14 № 1616.



Рис. 1. Функциональная схема стенда

ля); импульс тока – периодические затухающие колебания с частотой, близкой к промышленной частоте 50 Гц (соответствует реальной форме тока КЗ); амплитуда тока КЗ – несколько килоампер, длительность – десятки (сотни) миллисекунд.

Оценочные расчеты параметров разрядного контура $C, L, R_{\text{дуги}}$ проводились для тока КЗ $I_M = 7$ кА следующим образом. Значение напряженности поля в открытом дуговом столбе рассчитывалось по формуле [5]:

$$E = 12,5 + 34I_m^{-0,4} = 12,5 + 34 \cdot 7000^{-0,4} \approx 13,5 \text{ В/см.}$$

Падение напряжения на дуге длиной $l = 1$ см с учетом того, что приэлектродное падение напряжения (на двух электродах) принято равным 10 В, составляет [5]:

$$\Delta U = El + 10 = (13,5 \cdot 1) + 10 = 23,5 \text{ В,}$$

тогда активное сопротивление дуги

$$R_{\text{дуги}} = \Delta U / I_m = 23,5 / 7000 = 3,4 \text{ мОм.}$$

В качестве катушки индуктивности L разрядного контура предполагается использовать промышленный реактор с индуктивным сопротивлением $X_L = 0,56$ Ом (паспортные данные) и индуктивностью на частоте 50 Гц $L = 1,8$ мГн, в качестве емкостного накопителя – сборку из импульсных конденсаторов суммарной емкостью 5 мФ.

Для получения колебательного импульса при разряде емкостного накопителя на RL -цепочку (рис. 2) (где R – активное сопротивление дуги) необходимо выполнение условия:

$$R_{\text{дуги}} < R_{\text{кр}} = 2(L/C)^{1/2} = 2(1,8 \cdot 10^{-3} / 5 \cdot 10^{-3})^{1/2} = 1,2 \text{ Ом.}$$

Данное условие выполняется, так как $R_{\text{дуги}} = 3,4$ мОм.

Зависимость $i = f(t)$ в разрядном контуре будет иметь вид периодических затухающих колебаний (рис. 3):

$$i(t) = U(C/L)^{1/2} e^{-Rt/2L} \sin \omega t,$$

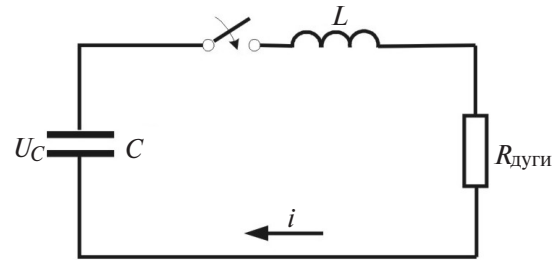


Рис. 2. Схема замещения емкостного накопителя с разрядной RL -цепочкой

где $I_m = U(C/L)^{1/2} e^{-Rt/2L}$ – амплитудное значение тока первой полуволны; $\tau = 2L/R$ – постоянная времени затухания; $T = 2\pi(LC)^{1/2}$ – период колебаний.

Для выбранных параметров разрядной цепи и напряжении накопителя 4 кВ получены следующие параметры импульса тока: амплитудное значение первой полуволны разрядного тока около 7 кА; период колебаний 19 мс, что близко к периоду колебаний промышленной частоты 50 Гц; число периодов колебаний до снижения амплитуды тока в «е» раз ($\sim 2,6$ кА) $n = \tau/T = 1,07 / 19 \cdot 10^{-3} \approx 56$.

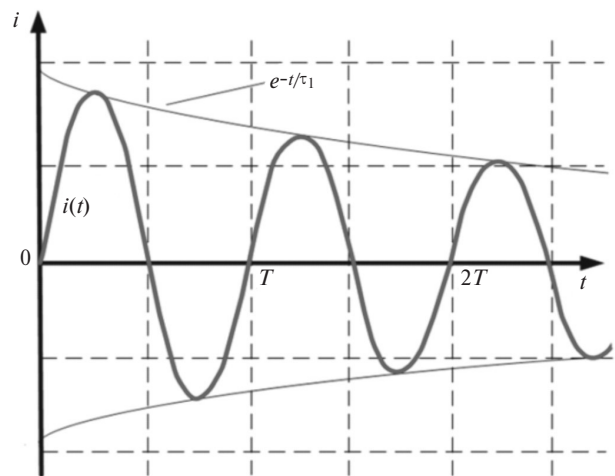


Рис. 3. Осциллограмма затухающего колебательного импульса тока в разрядном контуре емкостного накопителя

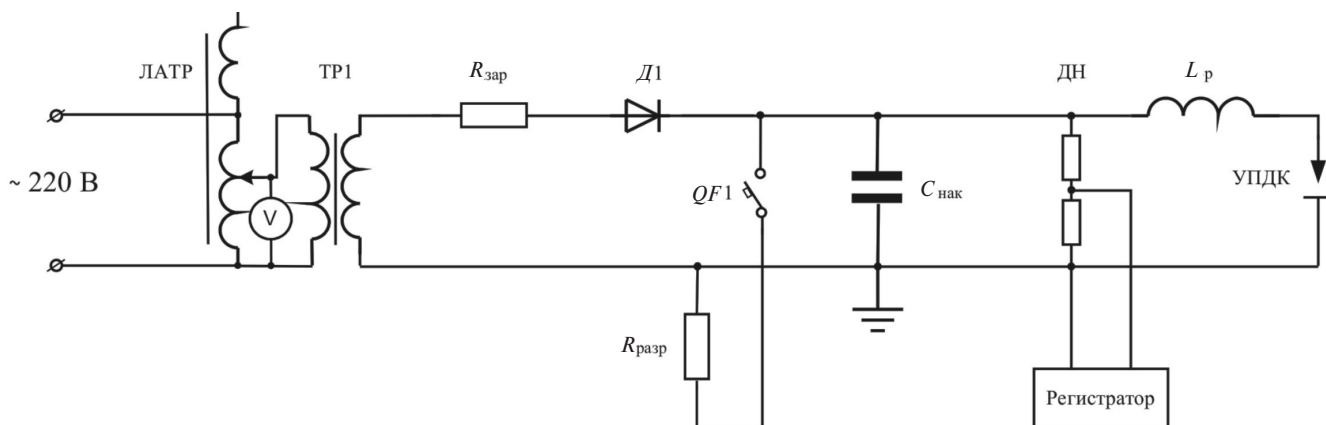


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема стенда

На практике параметры импульса тока будут отличаться от теоретических, так как при проведении расчетов было принято $R_{\text{ду́ги}} = \text{const}$. По мере затухания импульса тока и уменьшения его амплитудного значения активное сопротивление дуги будет увеличиваться. При расчетах не учитывалось также дополнительное активное сопротивление разрядной цепи (соединительных проводов и контактов). По этим причинам колебательный импульс тока будет затухать намного быстрее, чем по расчету.

Элементная база и конструктивное исполнение. Зарядное устройство (ЗУ) состоит из однофазного источника питания переменного тока промышленной частоты напряжением 10 кВ, диода и зарядного резистора (рис. 4).

В схеме ЗУ использован однофазный трансформатор наружной установки номинальной мощностью 1,25 кВА VI степени загрязнения (очень сильная).

Для выпрямления высокого напряжения на выходе трансформатора установлен высоковольтный диод со средним значением прямого тока 400 мА. Для ограничения зарядного тока и защиты трансформатора от КЗ используется резистор 20 кОм. При выбранных параметрах зарядного устройства минимальное время зарядки накопителя (при подаче напряжения «толчком») составляет $t_{\text{зар}} \approx 3\tau = 3RC = 3 \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 300$ с (или 5 мин). Во избежание повреждения обмотки зарядного трансформатора из-за перегрева (номинальный ток на высокой стороне 125 мА) в его первичной цепи установлен лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) для плавного подъема напряжения. При использовании ЛАТР время зарядки накопителя увеличивается до 20 мин.

Для контроля напряжения накопителя применяется омический делитель напряжения (ДН) с регистратором. Для исключения пробоя конденсаторов используется электронное устройство, автома-

тически прекращающее зарядку при достижении напряжением предельно допустимого значения. Максимальное напряжение конденсаторов накопителя в соответствии с паспортными данными составляет 6 кВ, в качестве предельно допустимого значения зарядного напряжения принято 4 кВ.



а)



б)

Рис. 5. Емкостный накопитель энергии в высоковольтном зале кафедры ТЭВН (а) и на площадке полигона рядом с реактором (б)

Для снятия остаточного заряда с конденсаторов накопителя и предотвращения возникновения возвратного напряжения предусмотрена разрядная цепь, состоящая из разрядного резистора сопротивлением 60 кОм и коммутирующего устройства. Коммутирующее устройство представляет собой автоматический выключатель с двигателем приводом, позволяющим дистанционно коммутировать разрядную цепь.

Емкостный накопитель собран на импульсных конденсаторах с рабочим диапазоном температуры от 60 до 70 °С, что позволяет эксплуатировать его на открытой площадке полигона. Батарея конденсаторов установлена на сварной металлоконструкции типа «этажерки», защищенной от погодных воздействий стенами и крышей (рис. 5,а и б). На верхнем этаже размещены зарядное устройство и разрядная цепь.

В качестве катушки индуктивности используется сухой токоограничивающий реактор для наружной установки (рис. 5,б).

Стол для прокола КЛ представляет собой заглубленный в землю бетонный бокс прямоугольной формы, внутри которого установлена разделанная специальным образом вставка КЛ в одножильном исполнении длиной 1 м. Такая конструкция демонстрационной части стенда наиболее приближена к реальным условиям при проколе КЛ. С одного конца вставки выведен экран КЛ, к которому с помощью струбины присоединен гибкий заземляющий проводник. На противоположном конце вставки выведена жила КЛ, к которой аналогичным способом присоединен проводник от реактора (рис. 6). Сверху бокс закрыт металлической крышкой для защиты от внешних воздействий.

Для прокола КЛ используется дистанционное пороховое устройство типа УДПК, в котором применяются монтажные патроны с энергией порохового заряда не менее 700-800 Дж. Устройство рас-

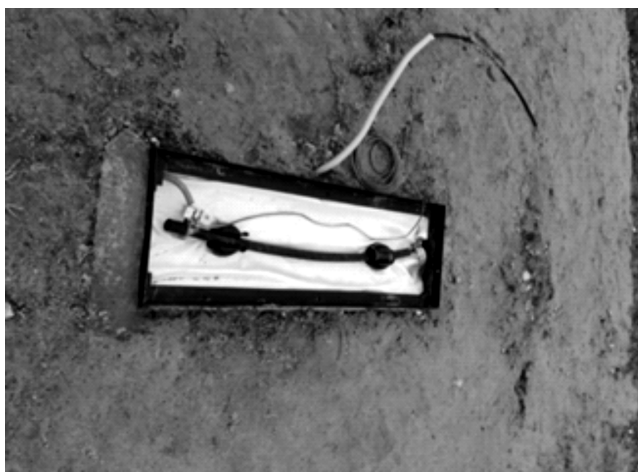


Рис. 6. Стол для прокола кабельной линии 10 кВ

считано на многократное использование (до 500 раз) после замены патрона и пробойника (по мере необходимости). Конструкция стола позволяет многократно проводить демонстрацию стенда после замены кабельной вставки.

Система управления стендами полигона. Система управления организована по принципу многоуровневой структуры. Основными структурными элементами являются автоматизированный пульт управления полигоном, контроллер управления и блокировки (КУИБ), шкаф распределительный 0,4 кВ и планшетный компьютер.

Автоматизированный пульт управления полигоном отвечает за взаимодействие между обслуживающим персоналом и стендами. На пульте есть панель управления для запуска полигона и дистанционного управления стендами. После включения пульт устанавливает связь с планшетным компьютером, на котором установлена программа испытаний. Стенды полигона могут управляться как с планшета, так и с панели управления в ручном режиме. Панель дублирует команды управления и используется в случае отсутствия или невозможности управления стендами с планшетного компьютера.

Контроллер пульта осуществляет непрерывный анализ логической схемы переключений с учетом информации о действительном текущем положении коммутационных аппаратов и соответствии их положения логике выбранного стенда. В случае, если положения совпадают, система дает разрешение на запуск, если не совпадают, то выдается сообщение об ошибке.

Контроллеры управления и блокировки всех стендов обладают беспроводным интерфейсом и связаны с пультом управления полигоном посредством WiFi модема фирмы Mikrotic. Дальность работы модема без потери сигнала до 100 метров.

Испытание стенда. После завершения монтажных и наладочных работ проведено испытание стенда. В соответствии с инструкцией по эксплуатации [2] прокалывающее устройство было предварительно присоединено к заземляющему устройству и установлено на вставку КЛ 10 кВ. После зарядки конденсаторной батареи до напряжения 4 кВ (зафиксировано регистратором) прокалывающее устройство дистанционно приведено в действие. В момент прокола возникло дуговое КЗ между заземленным экраном и находящейся под напряжением жилой вставки КЛ (рис. 7,а). Процесс продолжился выбросом продуктов горения дуги за пределы стола (рис. 7,б и в) и завершился постепенным ее погасанием (рис. 7,г). Суммарная продолжительность процесса, определенная с помощью видеосъемки, составила около 300 мс.

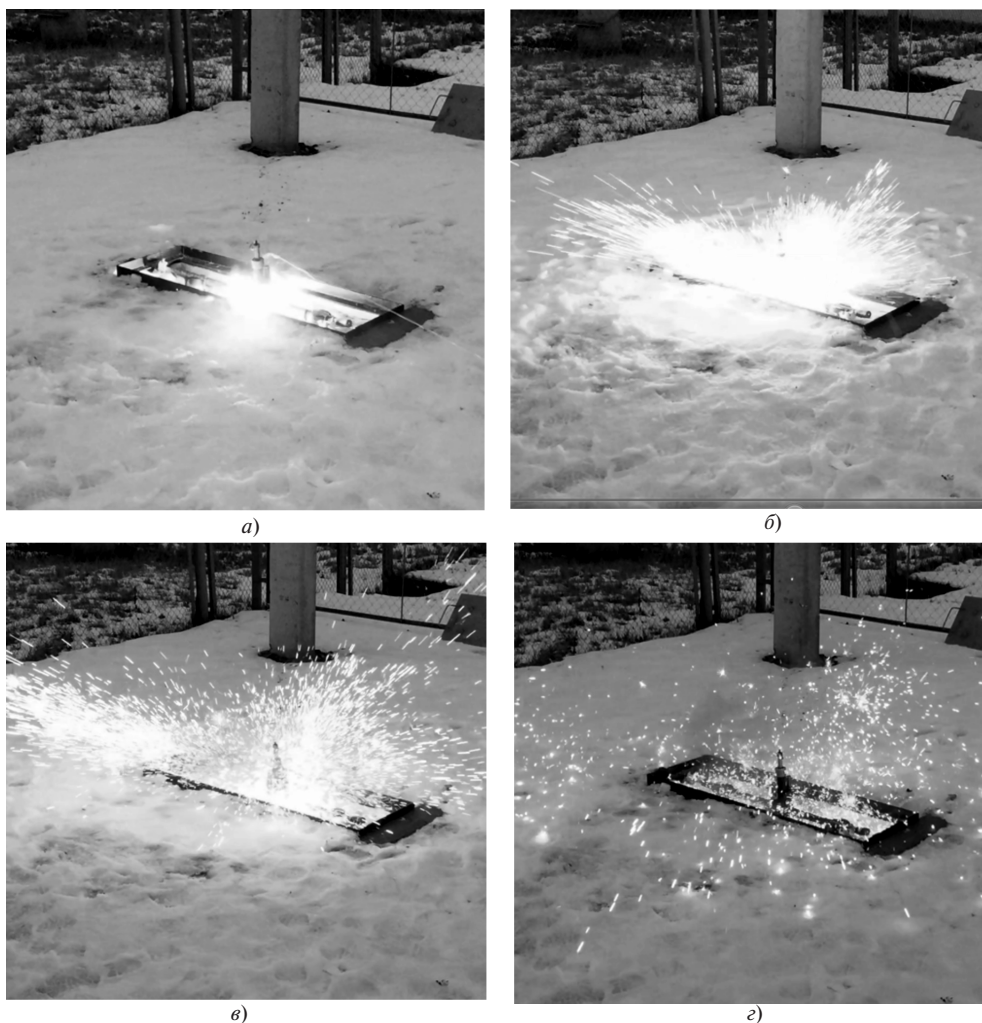


Рис. 7. Стадии процесса образования и выброса дуги во временной развертке при проколе КЛ 10 кВ под напряжением

Выводы. 1. При разработке демонстрационного стенда были приняты теоретически обоснованные технические решения, которые позволили:

получить ощутимые, но безопасные для обучающихся, световое и звуковое воздействие при возникновении и выбросе дуги;

многokrатно использовать стенд при незначительной замене отдельных его элементов (расходных материалов);

использовать стенд на территории действующей подстанции без риска возникновения аварийной ситуации.

2. Эксплуатация стенда демонстрации опасности поражения электрической дугой наряду с другими стендами полигона позволит:

сформировать у персонала четкое представление об опасности поражения электрическим током и дугой, возникающей при различных нештатных ситуациях;

выработать понимание того, что при напряжении выше 1 кВ поражение может произойти не только при непосредственном касании токоведущих частей, но и на определенном расстоянии от

них, иногда достаточно безопасном, с точки зрения персонала;

сконцентрировать внимание персонала на том, что последствия от воздействия напряжения и тока могут быть весьма тяжелыми;

существенно снизить электротравматизм персонала электросетевых предприятий и сторонних организаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ причин аварий на электроустановках, подконтрольных органам Ростехнадзора за 2018 год [Электрон. ресурс] http://szap.gosnadzor.ru/activity/nesc_sluch/ (дата обращения 18.12.2018).
2. Пичугина М.Т. Мощная импульсная техника. Томск: Изд. Томского политехнического университета, 2005, 98 с.
3. Авруцкий В.А., Будович В.Л., Киселев В.Я., Кужекин И.П. Учебное пос. по курсу «Испытательные и электрофизические установки, техника эксперимента: Накопители энергии и их применение»/Под ред. И.П. Кужекина. М.: МЭИ, 1982, 77 с.
4. Кужекин И.П. Испытательные установки и измерения на высоком напряжении. М: Энергия, 1980, 136 с.
5. Буткевич Г.В. Дуговые процессы при коммутации электрических цепей. М.: Высшая школа, 1967, 195 с.

[27.01.2020]

А в т о р ы: **Борисов Руслан Константинович** – кандидат техн. наук, ведущий научный сотрудник кафедры «Техника и электрофизика высоких напряжений» (ТЭВН) «НИУ «Московский энергетический институт», диссертацию защитил в 1981 г.

Жуликов Сергей Сергеевич – кандидат техн. наук, доцент кафедры ТЭВН НИУ «МЭИ», диссертацию защитил в 2003 г.

Хренов Сергей Иванович – кандидат техн. наук, заведующий кафедрой ТЭВН НИУ «МЭИ», диссертацию защитил в 1997 г.

Турчанинова Юлия Сергеевна – ассистент кафедры ТЭВН НИУ «МЭИ».

Кошелев Михаил Алексеевич – кандидат техн. наук, доцент кафедры ТЭВН НИУ «МЭИ», диссертацию защитил в 1991 г.

Белоусов Сергей Викторович – кандидат техн. наук, доцент кафедры ТЭВН НИУ «МЭИ», диссертацию защитил в 2003 г.

Макуха Игорь Станиславович – директор Департамента производственной безопасности ПАО «Россети Московский регион» (ПАО «МОЭСК»).

Трофимов Олег Юрьевич – кандидат психологических наук, директор Учебного центра ПАО «МОЭСК», диссертацию защитил в 2010 г.

Ильина Елена Валентиновна – начальник управления внутреннего обучения ПАО «МОЭСК».

Electrichestvo, 2020, No. 5, pp. 26–33

DOI:10.24160/0013-5380-2020-5-26-33

Development of a Stand to Demonstrate Human Injury by Electric Arc Caused by Puncturing a 10 kV Cable Line

BORISOV Ruslan K. (*National Research University «Moscow Power Engineering Institute» – NRU «MPEI», Moscow, Russia*) – Senior Researcher of High Voltage Engineering and Electrophysics (HVEE) Dept., Cand. Sci. (Eng.)

ZHULIKOV Sergey S. (*NRU «MPEI» Moscow, Russia*) – Associate Professor of HVEE Dept., Cand. Sci. (Eng.)

KHRENOV Sergey I. (*NRU «MPEI», Moscow, Russia*) – Head of HVEE Dept, Cand. Sci. (Eng.)

TURCHANINOVA Yuliya S. (*NRU «MPEI», Moscow, Russia*) – Assistant lecturer of HVEE Dep.

KOSHELEV Mikhail A. (*NRU «MPEI», Moscow, Russia*) – Associate Professor of HVEE Dept, Cand. Sci. (Eng.)

BELOUSOV Sergey V. (*NRU «MPEI», Moscow, Russia*) – Associate Professor of HVEE Dept., Cand. Sci. (Eng.)

MAKUKHA Igor' S. (*PJSC «Rosseti Moscow Region», Moscow, Russia*) – Director of HSE Department

TROFIMOV Oleg Yu. (*PJSC «Rosseti Moscow Region», Moscow, Russia*) – Director of the Educational Centre, Cand. Sci. (Psychology)

IL'INA Yelena V. (*PJSC «Rosseti Moscow Region», Moscow, Russia*) – Head of Internal Education Office

A stand called «A Short-Circuit Fault Caused by Puncturing an Energized 10 kV Cable Line» has been developed, constructed, tested, and put in operation at the Rosseti (Russian Networks) Moscow Region Training Center by specialists of the NRU MPEI Chair for High Voltage Engineering and Electrophysics as part of the R&D work «Carrying out theoretical and experimental investigations and development of stands for demonstrating the danger of being injured by electric shock at a training ground». In developing the stand, the type and parameters of the power supply source, discharge circuit and switching device were selected. A single-phase step-up small-capacity 0,4/10 kV transformer with a diode is used as a power supply source. The discharge circuit consists of capacitive energy storage with a capacitance of 5 mF, an industry-grade reactor with an inductance of 1,8 mH, and a standard (gunpowder) remotely operated puncturing device. When cable line insulation is punctured, an arc short circuit fault occurs between the grounded shield and the cable core to which the energy storage potential is applied. The puncturing device serves as a switching device and the load jointly with the arc resistance. For the selected parameters of the stand elements and the energy storage voltage equal to 4 kV, a decaying oscillatory current pulse with the first half-wave amplitude equal to 7 kA and oscillation frequency of about 50 Hz has been obtained. With

these pulse parameters, it became possible to obtain tangible, but safe for students, light and sound effects during arc ejection. The stand can be repeatedly used with minor replacement of its individual elements on the territory of the operating substation without the risk of an emergency to occur.

Key words: *cable line, short-circuit, cable line puncture, electric arc, electric shock, training stand*

REFERENCES

1. **Analiz prichin avariyy na elektroustanovkakh, podkontrol'nykh organam Rostekhnadzora za 2018 god** (Analysis of the causes of accidents in electrical installations controlled by the Rostekhnadzor authorities for 2018. [Elektron. resoures] http://szap.gosnadzor.ru/activity/nesc_sluch/ (Data of apple 18.12.20180).

2. **Pichugina M.T. Moshchnaya impul'snaya tekhnika** (Powerful pulse technology). Tomsk: Publ, of Tomsk Politekhnichesk University, 2005, 98 p.

3. **Avrutskiy V.A., Budovich V.L., Kiselev V.YA., Kuzhekin I.P.** *Uchebnoye pos. po kursu «Ispytatel'nyye i elektrofizicheskiye ustanovki,*

tekhnika eksperimenta: Nakopiteli energii i ikh primeneniye» (Educational village. on the course «Testing and electrophysical installations, experimental technique: Energy storage and their use»/Pod red. I.P. Kuzhekina. Moscow, Publ. of MEI, 1982, 77 p.

4. **Kuzhekin I.P.** *Ispytatel'nyye ustanovki i izmereniya na vysokom napryazhenii* (Test installations and measurements at high voltage). Moscow, Energiya, 1980, 136 p.

5. **Butkevich G.V.** *Dugovyye protsessy pri kommutatsii elektricheskikh tsepey* (Arc processes when switching electrical circuits.). Moscow, Vysshaya shkola, 1967, 195 p.

[27.01.2020]