

УДК 621.315.2.016.2:538.523.5:681.518.5

СПОСОБЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КАБЕЛЕЙ

Н. В. ГРУНТОВИЧ, М. Д. АСТАПЕНКО

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Рассмотрены основные причины возникновения частичных разрядов в кабелях и ухудшения их электрической прочности. Такими причинами являются пустоты и конденсат в изоляции кабелей, условия их прокладки и хранения. Выполнен анализ влияния погодных условий на возникновение конденсата в кабелях, приводящего к образованию частичных разрядов. Для уменьшения частичных разрядов в кабельных линиях предложен метод восстановления изоляции кабелей.

Ключевые слова: кабели, бумажно-масляная изоляция, сшитый полиэтилен, частичные разряды, техническое диагностирование, увлажнение изоляции, точка росы.

METHODS OF RESTORING INSULATION HIGH VOLTAGE CABLES

N. V. GRUNTOVICH, M. D. ASTAPENKO

*Educational institution "Sukhoi State Technical University
of Gomel", the Republic of Belarus*

The article considers the main causes of occurrence of partial discharges in cables and deterioration of their electrical strength. Such causes are voids and condensate in the insulation of cables, the conditions for their laying and storage. Authors performed analysis of influence of weather conditions on formation of condensate in cables leading to formation of partial discharges. Authors also proposed a method of restoring cable insulation to reduce partial discharges in cable lines.

Keywords: cables, paper-oil insulation, cross-linked polyethylene, partial discharges, technical diagnostics, insulation humidification, dew point.

Введение

На сегодняшний день более 50 % кабельных линий (КЛ) эксплуатируется с отработанным нормативным сроком службы. В связи с этим в последнее время электросетевые организации столкнулись с проблемой большого количества отказов КЛ.

В табл. 1 представлены статистические данные по количеству отключений линий в Гомельских распределительных сетях по годам. Анализ полученных данных показывает, что в общем числе отключений составляющая «отказы кабельных линий» составляет 95–98 %.

Таблица 1

Количество отключений линий в Гомельских распределительных сетях

Показатель	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г. (до июля)
Общее количество отключений, ед.	236	149	177	176	142	113
В том числе отказы кабельных линий	233	143	171	166	135	108

Возросшее число отказов КЛ обычно связывают с износом изоляции (рис. 1) и сезонными особенностями, такими как движение грунта и подтопление почвы весной и осенью, высокие температуры в трансформаторной подстанции (что приводит к пробоям концевых муфт) зимой. Пробои концевых муфт могут происходить под воздействием солнечного электромагнитного излучения.

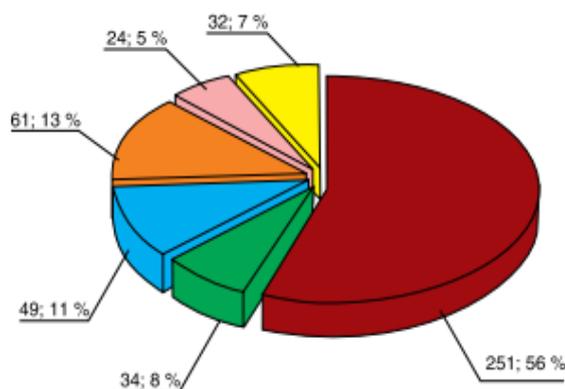


Рис. 1. Количество аварийных отключений КЛ 6–10 кВ в зависимости от срока эксплуатации: ■ – износ 100 % и более; ■ – износ 90–100 %; ■ – износ 75–90 %; ■ – износ 50–75 %; ■ – износ 25–50 %; ■ – износ менее 25 %

Чаще всего отключения КЛ происходят из-за пробоя изоляции кабеля (рис. 2), что обусловлено ее старением и условиями хранения кабелей.

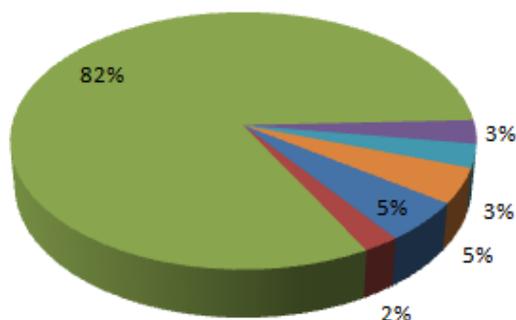


Рис. 2. Причины отключения кабелей в Гомельских электрических сетях за 2020 г.: ■ – механические повреждения КЛ; ■ – повреждение на КТП; ■ – повреждения изоляции кабеля; ■ – повреждения концевой муфты; ■ – причина не установлена; ■ – действия посторонних лиц, прочие, гроза

В новых кабелях содержится воздух между жилами и изоляцией (рис. 3), со временем в прослойках кабеля образуется конденсат, сильно влияющий на электрическую прочность кабеля и способствующий развитию водных триингов.



Рис. 3. Примеры кабелей в разрезе

Как считает автор работы [1], образование в изоляции водных триингов связано с проникновением в изоляцию кабеля влаги. Этот процесс можно представить следующим образом: наличие влаги в изоляции приводит к ее конденсации в местах неоднородностей, образованию и росту водных триингов с последующим ухудшением электрических характеристик изоляции, в частности, снижению электрической прочности, что может привести к пробое кабеля. Влага проникает в изоляцию как в результате процесса диффузии через пластмассовую оболочку, так и через дефекты в оболочке и изоляции под действием электрического поля. Авторы считают, что в целом проникновение воды в полимер зависит от температуры, электрического поля, типа и количества ионов, содержащихся в воде. Изменение температуры приводит к конденсации воды в микропустотах изоляции кабеля, загрязнениях или неровностях экранов. Дальнейший рост триинга связан с образованием дополнительных микропустот, располагающихся рядом с местом зарождения триинга. Считается, что расширение зоны триингообразования обуславливается проникновением молекул в микротрещины материала в результате таких явлений (рис. 4), как электрофорез, диэлектрофорез и силы Максвелла, связанные с наличием электрического поля. На скорость возникновения и роста триингов электрохимического происхождения влияют удельное сопротивление изоляции, молекулярная и микрофизическая структура материала и наличие наполнителей.

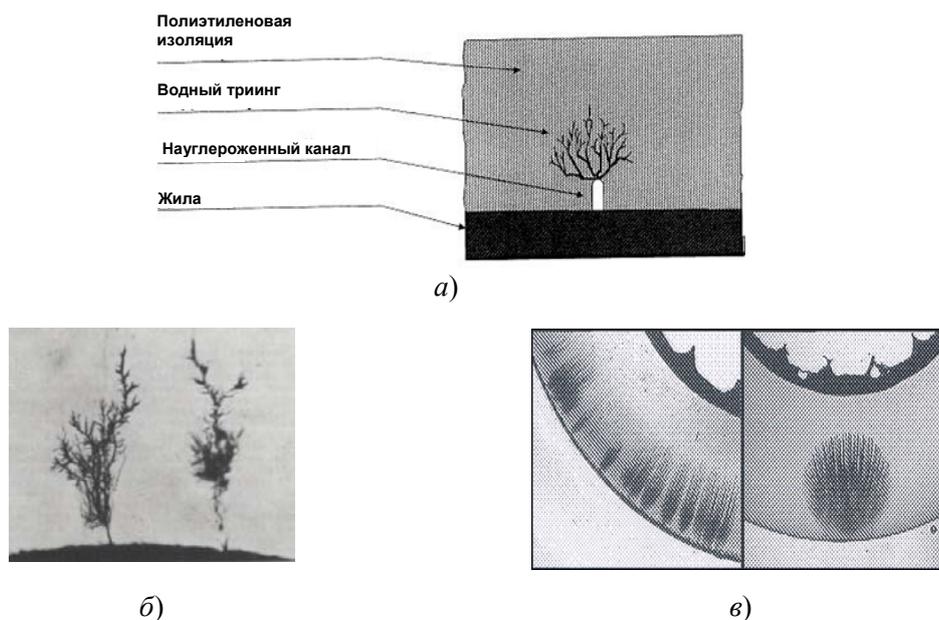


Рис. 4. «Электрические древовидные структуры» (водные триинги)

Однако, как показал анализ хранения и эксплуатации кабелей, бухты хранятся круглый год под открытым небом. Под воздействием переменной температуры окружающей среды из воздуха, находящегося в кабеле, постепенно образуются микроскопические капельки влаги (росы). Эти капли и являются причиной частичных разрядов (ЧР). Кабели закладываются в землю уже с увлажненной изоляцией и при их диагностировании фиксируются ЧР.

Точка росы – температура, до которой должен охладиться воздух, чтобы достичь состояния насыщения при данном влагосодержании и неизменном давлении.

При достижении точки росы в воздухе или на предметах, с которыми он соприкасается, при температуре воздуха 15 °С [2] начинается конденсация водяных паров. Зависимость относительной влажности воздуха от температуры приведена в табл. 2.

Таблица 2

Зависимость относительной влажности воздуха от точки росы

Относительная влажность, %	100	90	80	70	60	50	40
Точка росы, °С	15	13,4	11,6	9,5	7,3	4,6	1,5

Экспериментальные данные также свидетельствуют о том, что электрическая прочность кабеля при переменном напряжении зависит от распределения полостей в изоляции без наличия микроскопических частиц влаги, в том числе и малых по размеру, в которых ЧР не возникают даже при рабочих напряжениях.

При рассмотрении отказов кабелей в связи с перебоем муфты, составляющих 29 %, можно отметить, что довольно часто при диагностировании КЛ после ремонта наблюдается высокий уровень ЧР в местах установки муфт, что свидетельствует об ошибках при монтаже, так как очень сложно установить термоусаживаемую муфту так, чтобы между деталями муфты не было воздуха.

Наиболее распространенными ошибками при монтаже муфт являются:

- нарушение требований по организации места монтажа может повлечь за собой загрязнение внутренних участков муфты, а также попадание влаги;

- некачественный монтаж соединителей. Так, при выступающих частях срывной головки из гильзы (в случае, если они не зашлифованы) во время монтажа термоусаживаемой трубки образуются пустоты;

- разностенность толщины изоляции на соединительных манжетах, а также неправильный монтаж экранной ленты могут повлечь за собой неравномерную напряженность на данном участке и вызвать интенсивный рост ЧР и водных триингов.

Исходя из представленных выше данных, является актуальной разработка способа сушки и восстановления изоляции КЛ для увеличения их срока эксплуатации.

Постановка задачи

На данный момент в электрических сетях получила распространение OWTS система для диагностирования КЛ путем измерения ЧР [3]. Она позволяет выявить участки изоляции СПЭ-кабелей с развивающимися «водяными деревьями» до момента выхода КЛ из строя и определить полости в СПЭ-изоляции или отслаивания в токопроводящем слое. Как раз в полостях изоляции под воздействием переменного напряжения возникают ЧР, которые приводят к постепенному развитию дефекта и разрушению изоляции.

Цели данной работы:

- 1) по результатам натурных исследований в Гомельских электрических сетях оценить интенсивность ЧР в кабеле;

- 2) предложить способ сушки (восстановления) изоляции кабелей.

Предлагаемые решения проблем

Как было изложено выше, уровень ЧР в кабеле зависит от степени увлажнения. Данное предположение было подтверждено в ходе диагностирования КЛ OWTS системой в Гомельских городских распределительных сетях. При этом диагностирование проводилось как для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, так и с бумажно-масляной изоляцией. Приведем несколько примеров диагностирования.

Для наглядности рассмотрим в качестве примера трехжильный кабель (номер 663-1077) с бумажно-масляной изоляцией.

Из плана прокладки кабеля было установлено, что кабель проложен между ТП-663 и ТП-1077 и на всем его протяжении используется однотипная изоляция (нет

вставок с СПЭ-изоляцией). На концах кабеля установлены термоусаживаемые муфты. Длина данного кабеля 600 м, фазное напряжение составляет 6 кВ.

Карта ЧР для $0.0 U_0 \leq U \leq 2.0 U_0$ Максимальное напряжение (Все фазы)

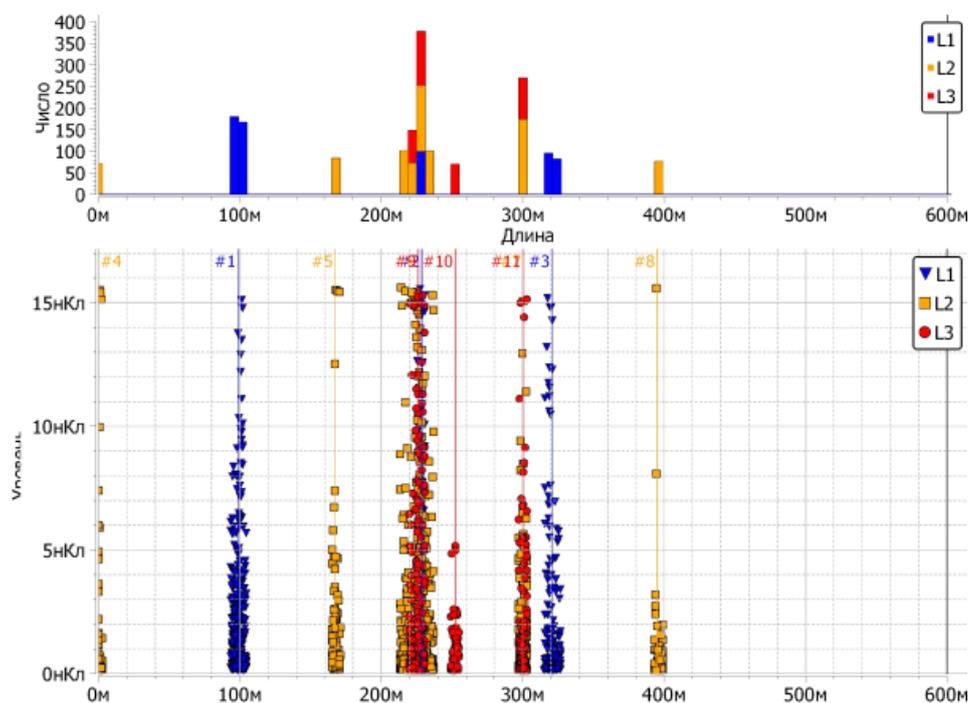


Рис. 5. Карта частичных разрядов (испытания 31.01.2019 г.)

Так, на рис. 5 видно, что на данном кабеле имеется сразу несколько зон ЧР (протокол от 31.01.2019 г.):

- Фаза L1: #1 : 99m, #2 : 227m, #3 : 321m.
- Фаза L2: #4 : 0m, #5 : 167m, #6 : 226m, #7 : 300m, #8 : 395m.
- Фаза L3: #9 : 226m, #10 : 252m, #11 : 300m.

Как правило, увеличение уровня ЧР происходит при развитии дефектов или при неправильном монтаже соединительных и концевых муфт. Из карты видно, что на данном участке несколько источников ЧР, однако только участок на 226 метре не проходит по нормам [4] и требует ремонта в течение года с последующим диагностированием. Так как ЧР на данном отрезке превышены по двум фазам, то ожидается междуфазное замыкание.

При повторном диагностировании этого кабеля 05.11.2019 г. (рис. 6) уровень ЧР уменьшился. Возможно, на наличие микрочастиц влаги повлияла мощность ЧР, однако места возникновения ЧР не изменились, что свидетельствует о дефекте в данном месте. Такое явление наблюдалось и в Могилевских электрических сетях. По всей вероятности, под воздействием ЧР идет разрушение микрочастиц влаги. На основании этих наблюдений можем предложить сушку изоляции кабеля током высокой частоты.

Карта ЧР для $0.0 U_0 \leq U \leq 2.0 U_0$ Максимальное напряжение (Все фазы)

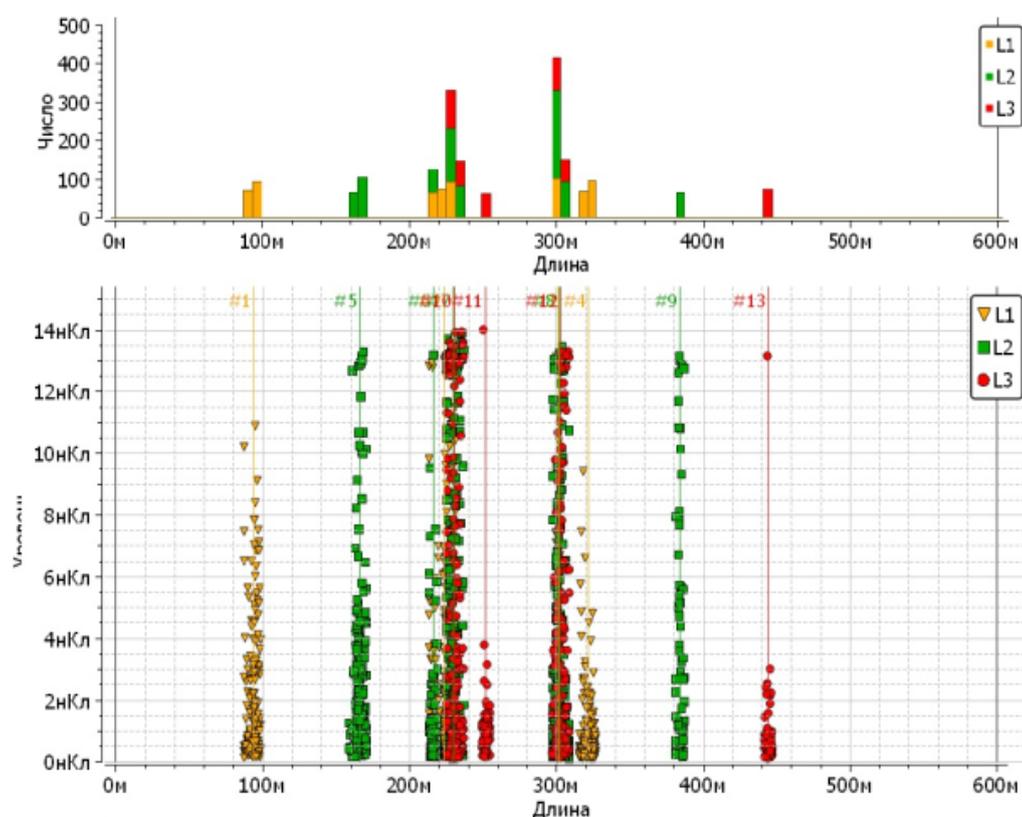


Рис. 6. Карта частичных разрядов (испытания 05.11.2019 г.)

Зоны ЧР:

- L1: #1 : 94m, #2 : 223m, #3 : 301m, #4 : 322m.
- L2: #5 : 166m, #6 : 216m, #7 : 230m, #8 : 302m, #9 : 384m.
- L3: #10 : 230m, #11 : 252m, #12 : 303m, #13 : 444m.

Данные по предполагаемым дефектам совпадают с точностью ± 5 м, что свидетельствует о развитии дефекта в данном месте. В случае если источник ЧР перемещается на 40 м и более, то это значит, что в данном кабеле «плавающий» дефект. Чаще всего это связано с перемещающимися пузырьками газа или микрочастицами влаги.

Проанализируем результаты диагностирования кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена (рис. 7).

Из рис. 7 видно, что только на фазе L1 на расстоянии 1156 имеется развивающийся дефект. Исходя из предельных значений ЧР для кабеля 10 кВт (5 нКл), рекомендуется эксплуатация в течение года с последующим ремонтом [4]. В связи с этим было проведено повторное диагностирование 21.09.2020 г., результаты которого представлены на рис. 8.

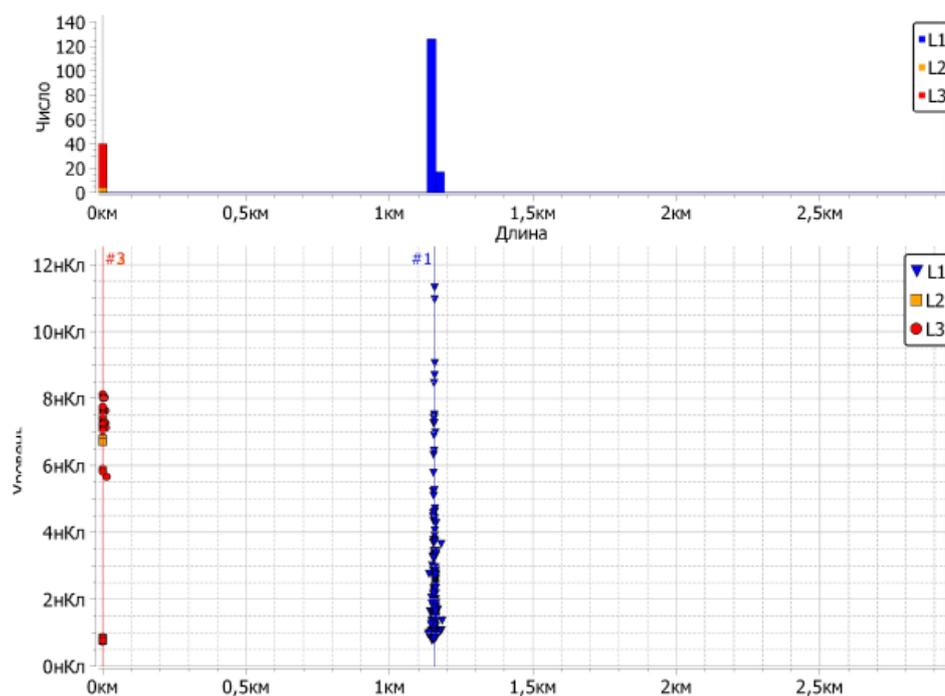
Карта ЧР для $0.0 U_0 \leq U \leq 1.0 U_0$ (Все фазы)

Рис. 7. Карта частичных разрядов (испытания 06.05.2020 г.)

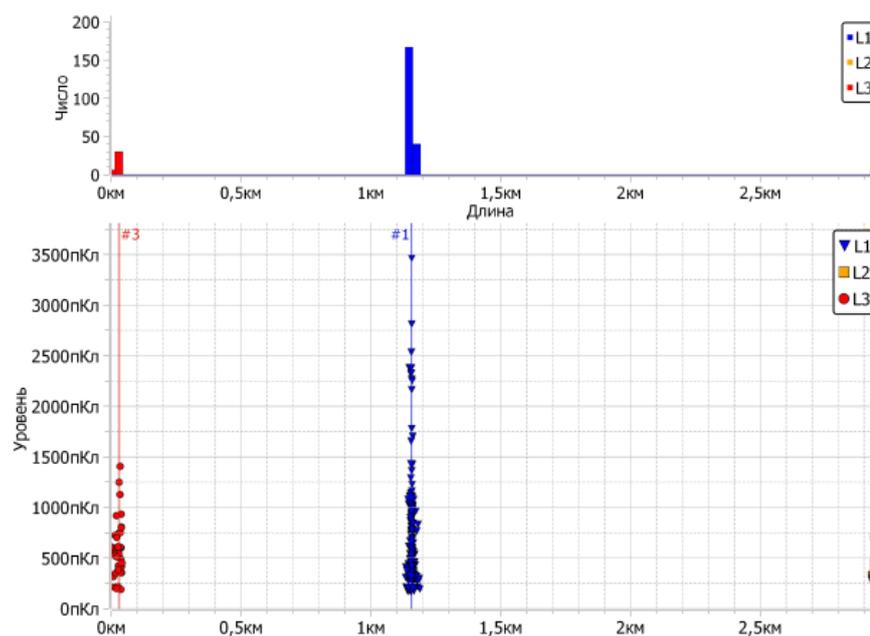
Карта ЧР для $0.0 U_0 \leq U \leq 2.0 U_0$ Максимальное напряжение (Все фазы)

Рис. 8. Карта частичных разрядов (испытания 21.09.2020 г.)

Из анализа рис. 8 следует, что уровень ЧР уменьшился в данном месте до значения 1200 пКл (1,2 нКл). Это позволяет сделать вывод, что мощность ЧР уменьшилась и данный кабель может эксплуатироваться в течение пяти лет с последующим диагностированием [4]. Уменьшение уровня ЧР было вызвано более сухой погодой, так как влажность сильно влияет на точность измерений. На 1157 метре ожидается развитие дефекта.

В результате проведенного анализа установлено, что интенсивность ЧР зависит от сезонного фактора.

Для сушки изоляции и уменьшения ЧР в КЛ предлагается прокачивать через кабель азот, т. е. удалять влагу из данного кабеля.

В лаборатории ГГТУ им. П. О. Сухого были проведены опыты, позволяющие оценить возможность использования этого метода.

В первую очередь было предложено прокачать через одножильный кабель АПвПг, на котором установлен соединитель термоусаживаемой муфты, воздух от ручного насоса. Для фиксации прохождения воздуха через участок кабеля на конце был установлен шарик. Для прохождения воздуха через соединитель в нем было проделано отверстие 6 мм в перегородке для лучшего его прохождения. Экспериментальная установка представлена на рис. 9.

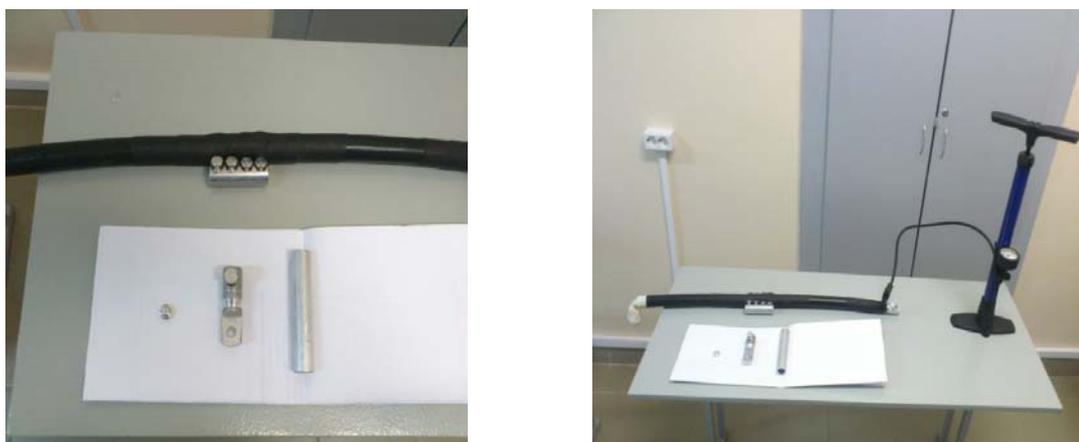


Рис. 9. Экспериментальная установка

В результате эксперимента воздух был прокачен через кабель с соединителем. Для более длинных кабелей с целью увеличения давления предлагается прокачивать азот и создать следующую установку:

- 1) баллон с азотом (давление – 10 кг);
- 2) редуктор;
- 3) вакуумный насос на другом конце кабеля.

Данная простейшая установка была сделана для того, чтобы убедиться самим и убедить специалистов Гомельских электрических сетей, что через кабели возможна прокачка азота при минимальном давлении.

Заключение

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Исследованы основные причины возникновения ЧР в кабелях, а также причины ухудшения электрической прочности кабеля, которыми являются пустоты и конденсат в изоляции, а также условия прокладки и хранения данных кабелей.
2. Для сушки изоляции кабеля и уменьшения ЧР в КЛ предложен метод восстановления изоляции на основе заполнения пустот диэлектриком (азотом).

Литература

1. Ларина, Э. Т. Силовые кабели и кабельные линии / Э. Т. Ларина. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 368 с.

2. Физический энциклопедический словарь. – М. : Совет. энцикл., 1978. – Т. 4. – 451 с.
3. Грунтович, Н. В. Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования / Н. В. Грунтович. – Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА-М, 2013. – 271 с.
4. Нормы и объем испытаний электрооборудования белорусской энергосистемы : СТП 33243.20.366–16. – Минск : Белэнерго, 2016. – 283 с.

Дата получения 03.11.2021 г.