

## Выводы

1. Национальный стандарт ГОСТ Р 55191–2012 (МЭК 60270:2000) «Методы испытаний высокоим напряжением. Измерения частичных разрядов» [2] необходимо отменить по указанным в статье причинам.

2. Стандарт МЭК 60270:2015 в редакции 3.1 [19] следует опубликовать на русском языке в виде официального перевода, как ранее издавались его первая и вторая редакции.

3. Необходимо провести актуализацию существующего стандарта ГОСТ 20074–83 (СТ СЭВ 3689–82) «Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов» [1] с учётом обновлённой редакции 3.1 стандарта МЭК 60270:2015 [19], уровня развития цифровой измерительной техники, компьютеризации процессов обработки информации и изложенных предложений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 20074–83 (СТ СЭВ 3689–82). Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов. — М.: ГК СССР по стандартам. — 22 с.

2. ГОСТ Р 55191–2012 (МЭК 60270:2000). Методы испытаний высокоим напряжением. Измерения частичных разрядов, 2014.

3. Клейн А. А. Повреждение маслобарьерной изоляции частичными разрядами // Электротехническая промышленность. 1969. Вып. 938. С. 24 – 30.

4. Кучинский Г. С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. — Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1979. — 224 с.

5. Робинзон Д. М. Диэлектрические явления в кабелях высокого напряжения // Пер. с англ. Е. К. Доберер, Н. А. Покровский. — Л. – М.: ГЭИ, 1941. — 199 с.

6. Брагин С. М., Вальтер А. Ф., Семёнов Н. Н. Теория и практика пробоя диэлектриков. — М. – Л.: Государственное изд-во, 1929. — 383 с.

7. Gemant A., Philippoff W. Die Funkenstrecke mit Vorkondensator // Zeitschrift für Techn. Physik. 1932. Vol. 13. No. 9. S. 425 – 430.

8. Austen A. E. W., Hackett W. Internal Discharges in Dielectrics: Their Observation and Analysis // S. Journ. Inst. Electr. Eng. 1944. Vol. 91. Part 1. P. 298 – 312.

9. Guide for Partial Discharge Measurements in compliance to IEC 60270 / Lemke E., Belijn S., Gulski E. et. al. // Technical Brochure 366 of Cigre Working Group D1.33.2008. P. 1 – 55.

10. Кучинский Г. С., Таупере О. О. Регистрация ионизационных характеристик изоляции // Электричество. 1960. № 11. С. 42 – 48.

11. Бумажно-масляная изоляция в высоковольтных конструкциях / М. А. Грейсух, Г. С. Кучинский, Д. А. Каплан, Г. Т. Месерман. — М. – Л.: ГЭИ, 1963. — 299 с.

12. Эпштейн С. Л. Измерение характеристик конденсаторов. 2-е изд. доп. и перераб. — Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1971. — 218 с.

13. ГОСТ 1516.3–96. Электрооборудование переменного тока на напряжение от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности, 1998.

14. IEEE Std 1434–2000 (2014). IEEE Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery, 2014.

15. Рекомендации МЭК. Публикация 270. 1-е изд. — М.: Информэлектро, 1972. — 36 с.

16. Стандарт МЭК. Публикация 270. 2-е изд. 1981. Измерения частичных разрядов. — М.: Изд-во. стандартов, 1985. — 32 с.

17. IEC Standard Publication 270. Second edition. Partial discharge measurements, 1981.

18. International Standard IEC 60270. Third edition. High-voltage test techniques-Partial discharge measurements, 2000.

19. IEC 60270 (2000). Amd. 1 (2015) High-voltage test techniques — Partial discharge measurements. Amendment 1, 2000.

20. ГОСТ 20074–74. Электрооборудование и изоляция на напряжение свыше 1000 В. Методы измерения характе-

ристик частичных разрядов. — М.: ГК Стандартов СМ СССР, 1974.

21. Стандарт СЭВ СТ СЭВ 3689–82. Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов, 1982.

22. ГОСТ Р 1.5–2004. Стандартизация в РФ. Стандарты национальные РФ. Правила построения, изложения, оформления и обозначения, 2004.

23. ГОСТ 1.5–2001. Межгосударственная система стандартизации. Стандарты межгосударственные, правила и рекомендации по межгосударственной стандартизации. Общие требования к построению, изложению, оформлению, содержанию и обозначению, 2001.

24. ГОСТ Р 55193–2012. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Методы измерения при испытаниях высокоим напряжением, 2014.

25. ГОСТ 26656–85. Техническая диагностика. Контролепригодность. Общие требования, 1985.

26. Боков Г. С. Зачем нужна стандартизация? // Энергоэксперт. 2015. № 6(53). С. 22 – 28.

27. IEEE Std 400–2001. IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems, 2002.



## Диагностика изоляции силового кабеля

МАШКАЛЁВ Д. А., ООО «Болд»

630015, г. Новосибирск, Электровзводская ул., д. 2, корп. 6  
efl\_bolid@mail.ru

Рассмотрены основные нарушения при монтаже кабельных линий (КЛ), которые впоследствии могут привести к появлению дефекта и выходу кабеля из строя. Предложены критерии оценки текущего состояния изоляции КЛ на основании многолетнего опыта работы. Рассмотрена перспектива использования метода диагностики КЛ без вывода из эксплуатации и на рабочем напряжении.

Ключевые слова: кабельные линии, сшитый полиэтилен, диагностика, критерии оценки изоляции, средний класс напряжения.

Переход на кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) в России при проектировании новых КЛ и реконструкции уже существующих объектов в настоящее время приостановлен. Сейчас можно констатировать, что потребность в кабеле с пропитанной бумажной изоляцией (ПБИ) снизилась всего на 7 – 8 %. Это связано с тем, что 15 % кабелей со СПЭ-изоляцией приходится ремонтировать уже через один-два года.

Известно, технические характеристики СПЭ-изоляции имеют неоспоримые преимущества перед характеристиками ПБИ. Так почему же эксплуатирую-

щие организации вынуждены принимать порой экстренные меры по ремонту относительно недавно введённого в эксплуатацию кабеля?

В ООО «Болд» уже пять лет успешно функционирует кабельная диагностическая лаборатория австрийской компании Вауг. За это время в лаборатории исследовано более 610 кабелей со СПЭ-изоляцией и более 330 кабелей с ПБИ среднего класса напряжения. При этом использовались методы измерения тангенса угла диэлектрических потерь  $\tan \delta$  и локализации частичных разрядов (ЧР), которые реализованы с помощью аппаратуры лаборатории.

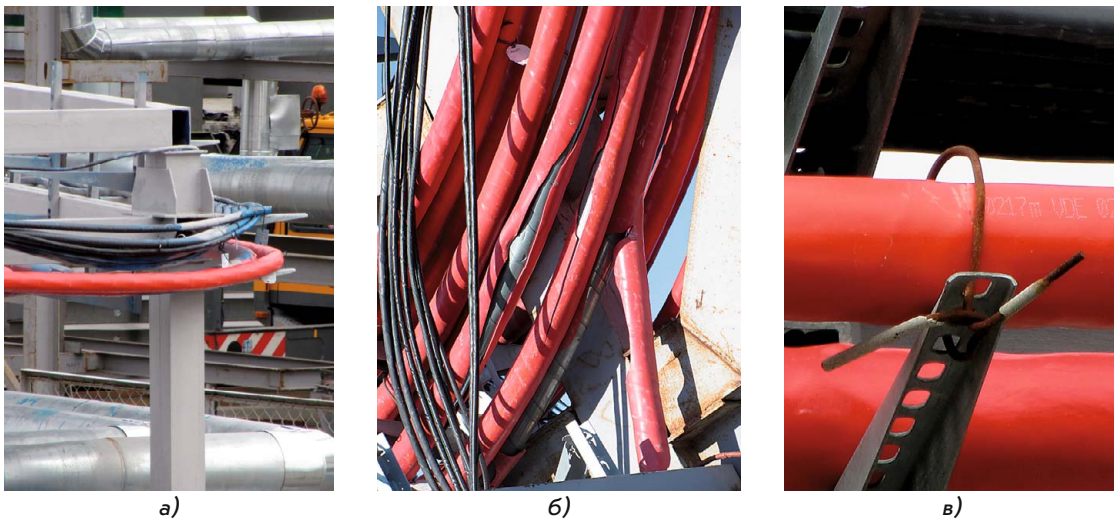


Рис. 1. Некоторые нарушения при прокладке кабеля:  
 а — недопустимый радиус изгиба; б — повреждение оболочки; в — подручные средства крепления кабеля

Проводилась как разовая, так и периодическая диагностика. Исследованию подвергались кабели сетевых организаций и отдельных хозяйств. В результате накоплен и обобщён определённый опыт, выработаны критерии оценки состояния изоляции кабелей. На каждую КЛ оформлен диагностический паспорт, где указаны все измеренные параметры и даны рекомендации по дальнейшей эксплуатации.

Персоналом диагностической лаборатории установлено, что каждый 11-й кабель со СПЭ-изоляцией в течение двух лет с момента проведения приёмо-сдаточных испытаний подлежит ремонту. Причины тому приведены далее.

1. Нарушение норм прокладки кабеля, установленных в технических условиях заводов, производящих кабельную продукцию (а теперь и в ГОСТ Р 55025–2012 [1]). К наиболее распространённым относятся: несоблюдение

минимально возможных радиусов изгиба кабеля, отсутствие специальных элементов крепления и прокладка кабеля при температурах ниже предлагаемых по ТУ и ГОСТ [1] без предварительного разогрева. Повреждение оболочки кабеля следует выделить отдельно, так как может приводить к быстрой деградации изоляции. Примеры допущенных ошибок представлены на рис. 1

2. Нарушение норм монтажа концевых и соединительных муфт, установленных в инструкциях заводов, выпускающих кабельную арматуру. К этой группе относятся: низкая профессиональная подготовка специалистов, применение ненадлежащего или низкого качества инструмента, использование несовместимых между собой материалов (рис. 2).

3. Нарушение норм приёмо-сдаточных (периодических) испытаний. До 2013 г. высоковольтные испытания в

80 % случаев проводились в соответствии с Правилами устройства электроустановок (изд. 7, гл. 1.8, п. 1.8.40), т. е. постоянным напряжением, превосходящим номинальное напряжение КЛ в четыре – шесть раз. Согласно стандарту IEEE Std 400™–2001 [2] скорость выявления дефектов при использовании синусоидального напряжения сверхнизкой частоты примерно в 1,5 раза выше, чем в случае применения косинусно-прямоугольного, и более чем в семь раз больше, чем при напряжении промышленной частоты. Развитие канала пробоя при разных частотах происходит со скоростями, мм/ч: 1,7 (50 Гц); 7,8 (0,1 Гц напряжение косинусно-прямоугольной формы); 12,3 (0,1 Гц напряжение синусоидальной формы).

В 2011 г. специалистами лаборатории проведена диагностика 43 кабелей со СПЭ-изоляцией напряжением 10 кВ одного из хозяйств. Впоследствии диагно-

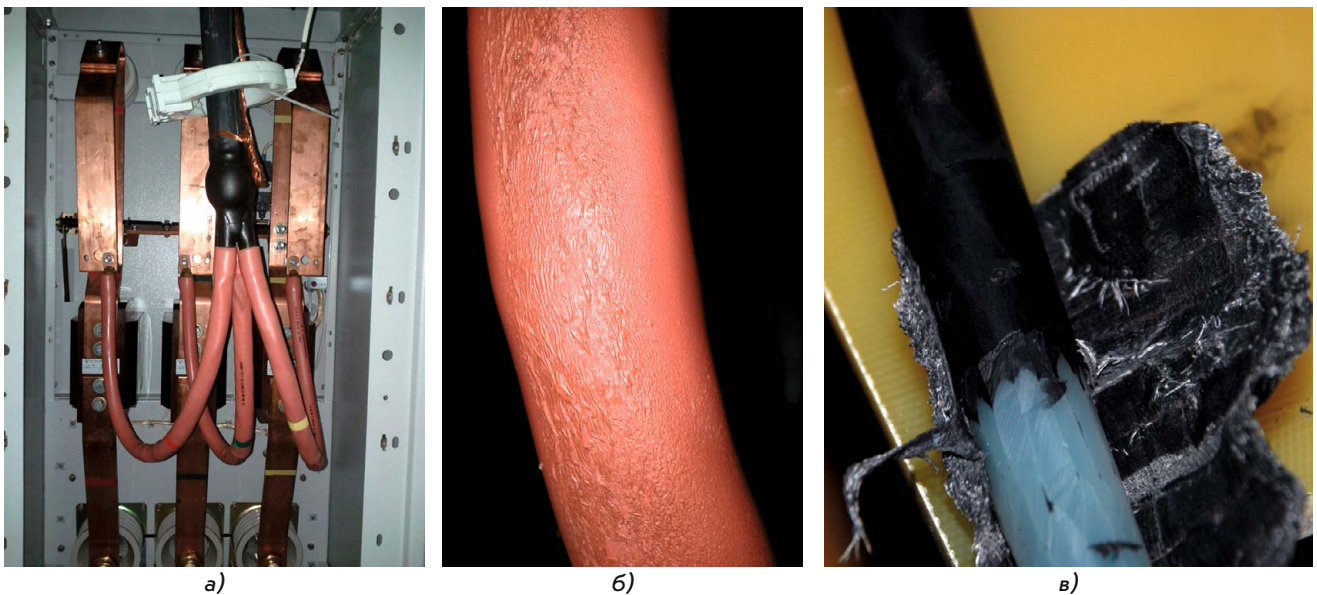


Рис. 2. Примеры нарушения норм монтажа:  
 а — недопустимый радиус изгиба; б — перегрев термоусаживаемой трубки; в — использование ненадлежащего инструмента

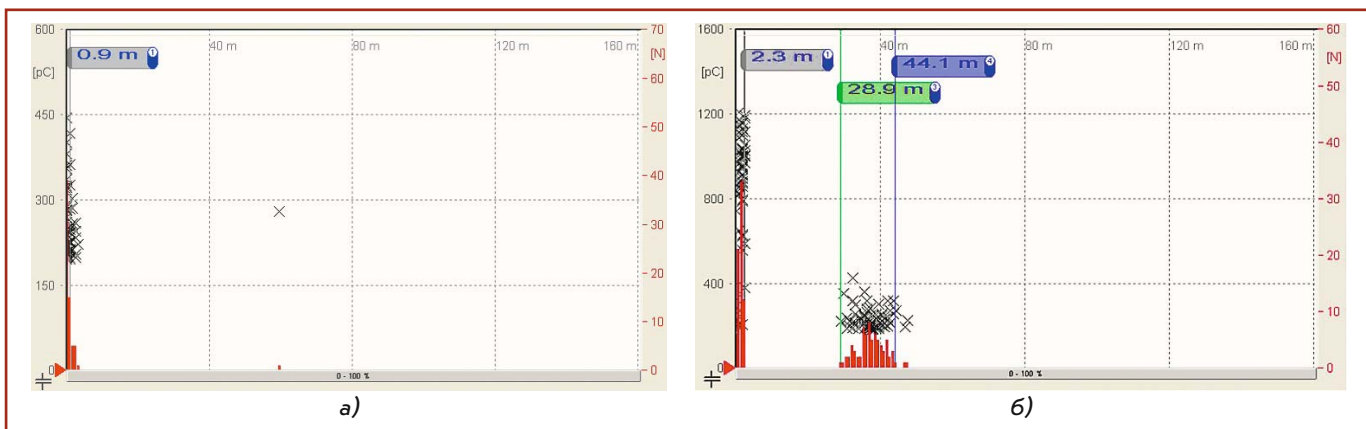


Рис. 3. Развитие ЧР в изоляции при измерениях в 2011 г. (а) и в 2015 г. (б)

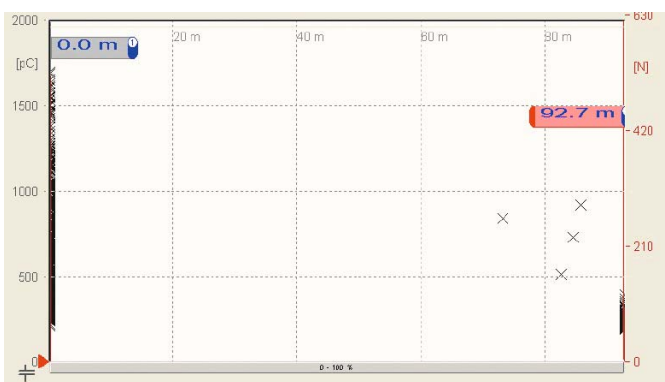


Рис. 4. Гистограмма предварительного состояния концевой муфты



Рис. 5. Пробой изоляции кабеля

стика этих КЛ повторялась с различной периодичностью в зависимости от состояния изоляции. Исследуемые КЛ на территории хозяйства уложены на эстакаде, период эксплуатации до начала исследований от двух мес до двух лет. Повседневная нагрузка по току составляет до 50 % номинальной. За указанный период эксплуатации зафиксирован один отказ (дефект концевой муфты).

Получены следующие результаты вследствие диагностики различной изоляции кабеля:

- не имевшей нареканий при первом исследовании (критерий оценки состояния изоляции — «работоспособна»), повторно исследована через пять лет. Всего таких кабелей 19, изменений в них в основном не отмечено. В двух случаях отмечено небольшое повышение значений  $\text{tg } \delta$ . Данные изменения можно было бы объяснить незначительным накоплением влаги через отдельные повреждения оболочки кабеля, происшедшие при его прокладке. Однако наличие ЧР не зафиксировано, что свидетельствует об отсутствии дефектов. Таким образом, изоляция кабеля осталась работоспособна. Следующие исследования намечены через пять лет;

- оценённой при первом исследовании как «работоспособна с незначительными отклонениями», повторно исследована через три года. В большинстве КЛ были повышенные значения  $\text{tg } \delta$ ,

Таблица 1

$U_{\text{ном}}, \text{ кВ}$	Тангенс угла диэлектрических потерь при разных состояниях изоляции, отн. ед.				
	норма	низкая степень увлажнения	средняя степень увлажнения	высокая степень увлажнения	предаврийное
1 – 35	<b>Изоляция из сшитого полиэтилена</b>				
	$\text{tg } \delta (2U_0) - (U_0) < > 0,6 \cdot 10^{-3}$ , $\text{a } \text{tg } \delta (2U_0) < < 1,2 \cdot 10^{-3}$	$\text{tg } \delta (2U_0) < < 1,2 \cdot 10^{-3}$	$\text{tg } \delta (2U_0) > > 1,2 \cdot 10^{-3}$ , $\text{a } \text{tg } \delta (2U_0) - (U_0) < < 1,0 \cdot 10^{-3}$	$\text{tg } \delta (2U_0) - (U_0) > > 1,0 \cdot 10^{-3}$	$\text{tg } \delta (2U_0) > > 2,2 \cdot 10^{-3}$
1 – 35	<b>Бумажно-пропитанная изоляция</b>				
	$\text{tg } \delta (2U_0) - (U_0) < < 10 \cdot 10^{-3}$ , $\text{a } \text{tg } \delta (2U_0) < < 50 \cdot 10^{-3}$	$\text{tg } \delta (2U_0) < < 50 \cdot 10^{-3}$	$\text{tg } \delta (2U_0) > > 50 \cdot 10^{-3}$ , $\text{a } \text{tg } \delta (2U_0) - (U_0) < < 20 \cdot 10^{-3}$	$\text{tg } \delta (2U_0) - (U_0) > > 20 \cdot 10^{-3}$	$\text{tg } \delta (2U_0) > > 70 \cdot 10^{-3}$

Примечание. В скобках указано напряжение, при котором выполнено измерение.

Таблица 2

$U_{\text{ном}}, \text{ кВ}$	Напряжение возникновения ЧР при разных состояниях изоляции, кВ				
	работоспособна	работоспособна с незначительными отклонениями	работоспособна со значительными отклонениями	ухудшенное	предаврийное
6	5,4 6	5,4 – 4,5 6 – 4,8	4,5 – 3,6 4,8 – 3,6	3,6 – 1,9 3,6 – 1,9	> 1,9 > 1,9
	8,9 10	8,9 – 7,5 10 – 8	7,5 – 6,1 8 – 6	6,1 – 3,2 6 – 3,2	> 3,2 > 3,2
20	17,8 20	17,8 – 15 20 – 16	15 – 12,2 16 – 12	12,2 – 6,4 12 – 6,4	> 6,4 > 6,4
	31,2 35	31,2 – 26,3 35 – 28	26,3 – 21,4 28 – 21	21,4 – 11,2 21 – 11,2	> 11,2 > 11,2

Примечание. В числителе приведены данные бумажно-пропитанной изоляции, в знаменателе — СПЭ-изоляция.

Таблица 3

$U_{ном},$ кВ	Уровень ЧР при разных состояниях изоляции, пКл				
	работоспособна	работоспособна с незначительными отклонениями	работоспособна со значительными отклонениями	ухудшенное	предавварийное
6 – 35	До 2400 До 1200	2400 – 8800 1200 – 4400	8800 – 15 000 4400 – 7500	15 000 – 30 000 7500 – 10 500	Свыше 30 000 Свыше 10 500

Примечание. В числителе приведены данные бумажно-пропитанной изоляции, в знаменателе — СПЭ-изоляции.

Таблица 4

$U_{ном},$ кВ	Частота следования ЧР при разных состояниях изоляции, шт/с				
	работоспособна	работоспособна с незначительными отклонениями	работоспособна со значительными отклонениями	ухудшенное	предавварийное
6 – 35	До 0,35 До 0,066	0,35 – 0,5 0,066 – 0,15	0,5 – 0,8 0,15 – 0,23	0,8 – 2 0,23 – 0,7	Свыше 2 Свыше 0,7

Примечание. В числителе приведены данные бумажно-пропитанной изоляции, в знаменателе — СПЭ-изоляции.

в 20 % кабеля наблюдались единичные ЧР, распространённые по его длине. Напряжение возникновения ЧР составляло от 10,5 до 11,4 кВ при незначительном уровне ЧР (до 650 пКл).

Значение  $\text{tg } \delta$  при повторном исследовании осталось на том же уровне. По всей длине кабеля наблюдались ЧР, их частота следования выросла от 0,07 до 0,16 шт/с, напряжение возникновения уменьшилась до 8,8 кВ, а уровень ЧР вырос до 900 пКл. В целом из 14 кабелей ухудшилось состояние только 2. Но за рамки критерия «работоспособна с незначительными отклонениями» изоляция этих кабелей не вышла;

- оценённой при первом исследовании как «работоспособна со значительными отклонениями». Таких кабелей было 9 и все имели повышенные значения  $\text{tg } \delta$ , а также ярко выраженные локальные места возникновения ЧР (в основном дефект в концевых муфтах). Напряжение возникновения ЧР было близким к фазному, частота следования составляла от 0,15 до 0,23 шт/с, а уровень ЧР в среднем не превышал 1300 пКл.

Данные кабели обследовали ежегодно. При этом значение  $\text{tg } \delta$  практически оставалось постоянным, а картина ЧР претерпевала изменения. Напряжение возникновения ЧР постепенно снизилось до фазного и ниже. Частота следования составила от 0,2 до 0,3 шт/с, а уровень ЧР повысился втрое. На отдельных кабелях (рис. 3) появились локальные места возникновения ЧР по длине кабеля. До настоящего времени ни одна КЛ, которой по состоянию изоляции была присвоена категория «работоспособна со значительными отклонениями», в категорию «ухудшенное состояние» не перешла.

Кроме того, КЛ, состояние изоляции которых относилось бы их к категории «ухудшенное состояние», выявлено не

было, а случай «предавварийное состояние» изоляции встретился однажды (на рис. 4 представлена гистограмма этого исследования). Напряжение возникновения ЧР — 3 кВ, частота их следования — 1,76 шт/с, уровень — 1700 пКл при низкой степени увлажнения изоляции. Такие значения показателей свидетельствуют о ярко выраженном дефекте. Своевременный ремонт концевой муфты не был осуществлён, что привело к возникновению аварийной ситуации (рис. 5).

В таблицах представлены предлагаемые диагностической лабораторией ООО «Болид» критерии оценки состояния изоляции высоковольтных кабелей среднего класса напряжения по значениям: тангенса угла диэлектрических потерь (табл. 1), напряжения возникновения ЧР (табл. 2), уровня ЧР (табл. 3), частоты следования ЧР (табл. 4).

При оценке КЛ учитываются все измерения и на их основе делается заключение о состоянии изоляции с установлением срока следующего исследования и даются рекомендации по дальнейшей эксплуатации:

- «работоспособна» — следующее исследование провести в течение пяти лет;
- «работоспособна с незначительными отклонениями» — в течение трёх лет;
- «работоспособна со значительными отклонениями» — в течение одного года;
- «ухудшенное состояние» — выполнить ремонт дефектных участков КЛ в течение года с последующей диагностикой;
- «предавварийное состояние» — произвести немедленный ремонт КЛ.

Существуют два варианта диагностики КЛ: при выведении из эксплуатации (offline) и без вывода (online). В лаборатории ООО «Болид» используется offline диагностика, а исследование проводится при повышенном напряжении частотой 0,1 Гц. Преимущества этой диа-

гностики — наиболее полная картина происходящего при более точной локализации дефектных мест.

Обнаружение и локализация ЧР в режиме online производится при рабочем напряжении на частоте 50 Гц. Основной недостаток — регистрируются только те ЧР, которые появляются при фазном напряжении. В случае обнаружения дефекта можно прибегнуть к offline диагностике для уточнения состояния изоляции и принятия решения о дальнейшей эксплуатации. Некоторые сложности в процессе идентификации ЧР, связанные с помехами, и отсутствие каких-либо критериев оценки состояния изоляции для данного вида диагностики делает его менее эффективным по сравнению с offline диагностикой.

Понятно, что подобное предложение можно использовать при определённых условиях прокладки кабеля (на эстакадах, в кабельных колодцах) и на объектах, где кабельное хозяйство находится на собственной территории. Для получения данных используются различного типа датчики, причём увеличение их числа на единицу длины КЛ повышает точность и достоверность получаемых результатов. Для проведения подобных исследований необходимо соответствующее оборудование и подготовленный персонал.

### Выводы

1. На основании многолетнего опыта проведения диагностики кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена сформулированы критерии оценки её текущего состояния, позволяющие определить сетевым организациям перспективные действия для надёжной эксплуатации кабельного хозяйства. Основные параметры, измеряемые при диагностике изоляции кабельной линии, по которым приведены критерии в статье — тангенс угла диэлектрических потерь, напряжение возникновения частичных разрядов, частота их следования и уровень.

2. Метод диагностики изоляции кабелей с выводом из эксплуатации и применением повышенного напряжения частотой 0,1 Гц в настоящее время оценивается как наиболее информативный. В перспективе для метода диагностики без вывода из эксплуатации и на рабочем напряжении требуются дальнейшие исследования и наработки, а также тщательное технико-экономическое обоснование.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 55025—2012. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение от 6 до 35 кВ включительно. Общие технические условия, 2012.
2. IEEE Std 400™—2001. IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems, 2001.