

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДИАГНОСТИКИ СИЛОВЫХ И КОНТРОЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ АЭС. СОЗДАНИЕ КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННОГО КАБЕЛЬНОГО ЖУРНАЛА

Кононенко А.И., Любимова М.П., Циканин А.Г.
ФГУП "НИИП", г. Лыткарино
Немытов С.А., Самовичев В.Г., Титовец В.В.
Концерн "Росэнергоатом", г. Москва

Диагностика технического состояния является ключевым элементом в программах управления сроком службы (старением) кабелей на всех этапах жизненного цикла блока атомной станции. Эффективность диагностики определяется уровнем знаний механизмов старения кабельных изоляционных материалов; чувствительностью неразрушающих методов контроля старения и повреждения электрической изоляции по трассе; объемом и нормами испытания силовых кабелей повышенным напряжением, информационной поддержкой контроля и прогнозирования состояния кабелей.

Эксплуатация кабелей на АЭС имеет свои особенности. Во-первых, это наличие "горячих точек" эксплуатации, которые характеризуются повышенным уровнем таких деградиционных факторов как температура, радиация, увлажнение, механические нагрузки. Во-вторых, обеспечение работоспособности части кабелей гермообъема во время и после проектных аварий. В третьих, большим разнообразием кабелей по типу изоляции, с разными механизмами старения в эксплуатации. В четвертых, наличием смешанной кабельной прокладки на действующих блоках, например, кабельных линий (КЛ) питания электрического оборудования в гермообъеме. Как правило, они состоят из кабеля с пропитанной бумажной изоляцией (ПБИ) вне гермообъема и кабеля с сшитой полиэтиленовой (СПЭ) изоляцией внутри гермообъема. Электропроводность изоляций этих кабелей отличается друг от друга на два порядка, что вызывает проблемы при оценке состояния всей КЛ в эксплуатации.

В данном докладе представлены:

- результаты исследования старения кабелей с СПЭ изоляцией, проведенные в обоснование разработки рекомендаций по проведению испытаний повышенным напряжением и контролю технического состояния силовых кабельных линий на атомных станциях;
- программное обеспечение компьютеризированного кабельного журнала, разработанного для информационной поддержки контроля и прогнозирования состояния кабелей;
- результаты работ по установке образцов кабелей свидетелей в гермообъеме 1 блока Калининской АЭС.

Все выше перечисленные результаты были получены для разработки, внедрения и выполнения на АЭС концерна "Росэнергоатом" программ по управлению сроком службы кабелей.

Исследования старения кабелей с изоляцией из СПЭ. Исследования проводили на кабелях ПвСГ 1х240 после их 23 лет эксплуатации на 1 блоке Калининской АЭС; кабелях ПвСГ-3х185 после 26 лет эксплуатации в гермообъеме 3 блока КоАЭС; кабелях ПБВнг1х240 после 10 лет эксплуатации на 1 блоке СМАЭС; кабелях ПБВнг 1х240 в процессе радиационного старения гамма-излучением источника ⁶⁰Со до поглощенной дозы 450 кГр (45 Мрад). Такую дозу по консервативным оценкам может получить кабель в гермообъеме ВВЭР-1000 за 50 лет эксплуатации.

Контроль степени старения СПЭ изоляции на кабелях в эксплуатации осуществляли методами частотной диэлектрической спектроскопии (ЧДС) на установке IDA-200 и методом восстановленного (возвратного) напряжения (ВН) на

установке CD-31. Для радиационно-состаренных кабелей накопление радиационных дефектов в изоляции дополнительно осуществляли методом ИК-спектроскопии на Фурье спектрометре Avatar 380 с приставкой нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) для микрообразцов. Все эти методы дают возможность регистрации дефектов на стадии образования новых зарядовых состояний и разупорядочных областей непосредственно в объеме СПЭ изоляции [1].

При проведении измерений на кабелях, проложенных в гермообъеме энергоблока, часто приходилось проводить измерения кабеля с СПЭ изоляцией, соединенного вместе с проходкой. К сожалению, многие старые проходки типа ВГУ исчерпали свой ресурс, что было подтверждено в процессе измерения ВН и частотных спектров диэлектрических потерь. На рис.1 представлен типичный спектр диэлектрических потерь для силового кабеля гермообъема ПвСГ с увлажненной проходкой ВГУ. В этих случаях характерным является разная степень увлажнения по фазам, так для фазы "С" на рис.1 значения $tg\delta$ соответствуют неувлажненной полиэтиленовой изоляции, для

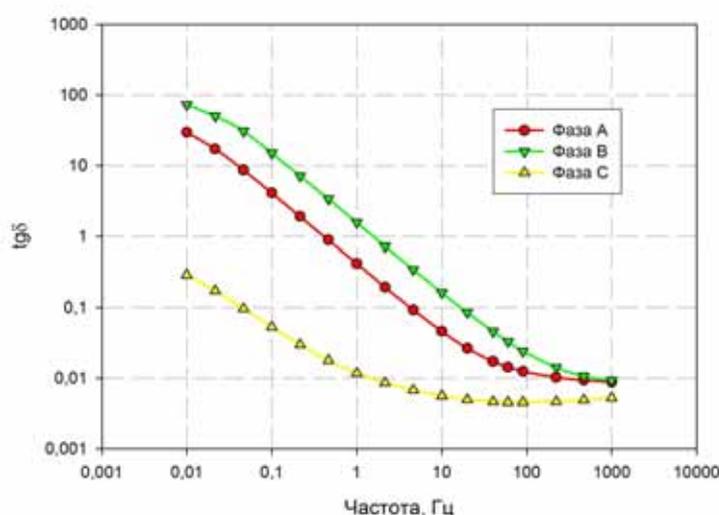


Рис. 1 – Типичная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь для силового кабеля ПвСГ с увлажненной проходкой ВГУ

фаз "А" и "В" увлажнение соответствует предельным значениям. Отметим, что наиболее интенсивное поглощение диэлектрических потерь для увлажненной изоляции наблюдается на низких частотах. В настоящее время на всех энергоблоках проводится плановая замена проходок типа ВГУ.

Опыт показал, что методы ЧДС и ВН могут успешно применяться для оценки степени старения полиэтиленовой изоляции в эксплуатации. Вместе с тем использование установки IDA-200 для измерения ЧДС дает возможность проводить контроль состояния кабелей с изоляцией из СПЭ длиной менее 40 м, так как испытательное напряжение установки не превышает 200 В.

Оценка состояния кабелей в тяжелых местах эксплуатации, включая гермообъем реакторного отделения, показала, что даже после 26 лет срока службы отсутствует старение изоляции из СПЭ (см. рис 2). Максимумы ВН линейно зависят от напряжения зарядки, что свидетельствует об отсутствии дефектов в объеме СПЭ изоляции. Вместе с тем, для кабелей ПвСГ, которые были заменены на 1 блоке Калининской АЭС через 23 лет эксплуатации, старение изоляции было зафиксировано (см. рис 3). В данном случае линейная зависимость отсутствует. Уменьшение максимума отклика ВН при больших напряжениях, свидетельствует о наличии в объеме изоляции зарядовых состояний, которые ведут к увеличению тока утечки.

Образование дефектов в изоляции отдельных кабелей может быть связано с повреждением их оболочки при монтаже и с последующим старением изоляции в месте повреждения. В месте с тем, более подробные исследования несостаренных

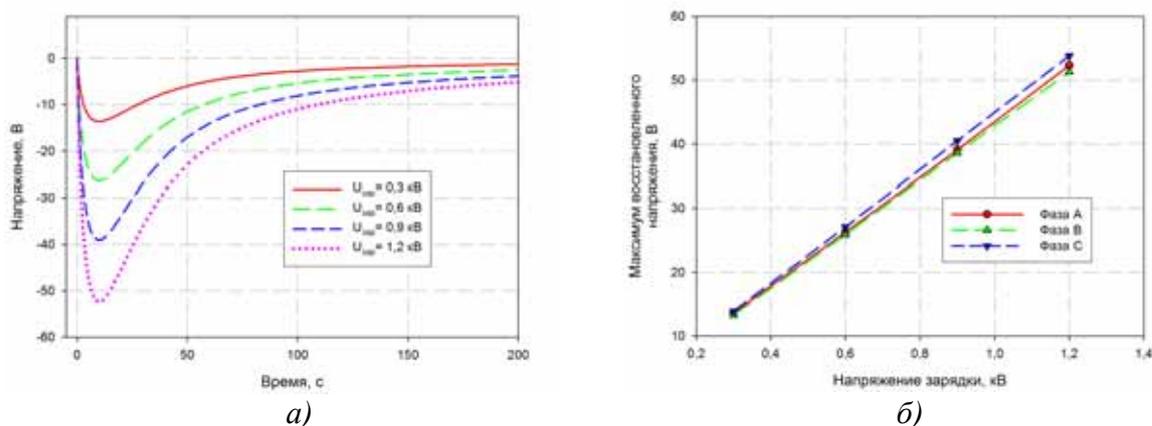


Рис. 2 – Параметры восстановленного напряжения для силового кабеля ПвСГ на напряжение 0,4 кВ после 26 лет эксплуатации при напряжениях зарядки 0,3; 0,6; 0,9; 1,2 кВ: кривые восстановленного напряжения (а); максимумы восстановленного напряжения (б)

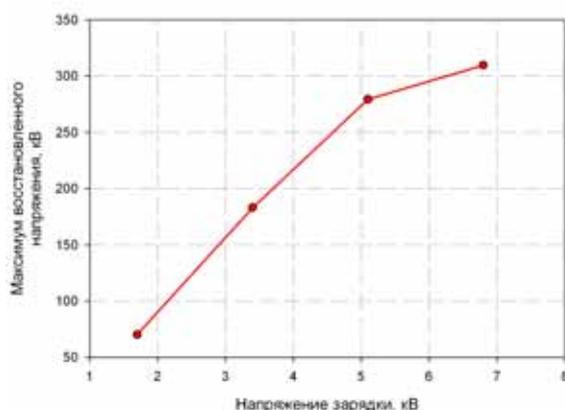


Рис. 3 – Максимум восстановленного напряжения для силового кабеля ПвСГ на напряжение 6 кВ после 23 лет эксплуатации при напряжениях зарядки 1,7; 3,4; 5,1; 6,8 кВ

образцов кабелей с изоляцией из СПЭ в лабораторных условиях методом инфракрасной спектроскопии позволили установить, что кабели одной и той же марки, но разных партий могут иметь разную концентрацию неконтролируемой примеси при изготовлении. Это касается кабелей старого поколения, например, ПвСГ и ПВВ.

Ускоренное радиационное старение образцов кабелей типа ПВВнг позволило не только оценить вклад радиации в старение изоляции, но и объяснить механизм ее старения в присутствии неконтролируемой примеси. Для облучения были выбраны образцы кабелей с разной начальной концентрацией неконтролируемой примеси. В одном из образцов эта примесь не обнаруживалась методом ИК-Фурье спектроскопии. После облучения дозой 450 кГр инфракрасное поглощение для образца кабеля с неконтролируемой примесью в изоляции увеличилось практически во всем наблюдаемом диапазоне (см. рис.4). Для второго образца увеличение поглощения в инфракрасном спектре фактически не было зафиксировано.

Исследование кинетики радиационного старения с помощью ЧДС показало, что неконтролируемая примесь является центром зарождения и стабилизации дефектов в аморфной фазе полиэтилена. Действительно, при наличии в полиэтиленовой изоляции

неконтролируемой примеси даже при небольшой дозе облучения 5,6 кГр фиксируются значительные изменения диэлектрических потерь (см. рис.5),

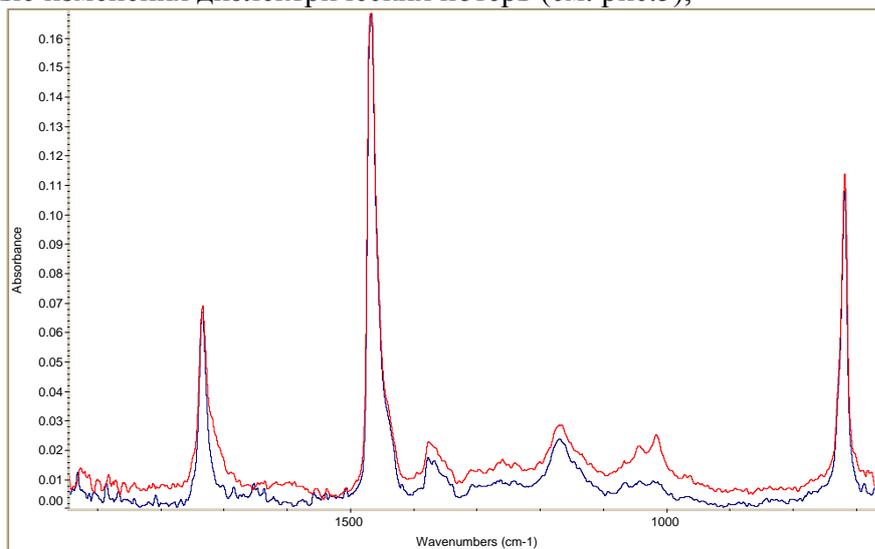


Рис. 4 – Инфракрасные спектры поглощения сшитой полиэтиленовой изоляции кабеля ПВВнг до (синяя линия) и после радиационного старения (красная линия) при дозе 450 кГр

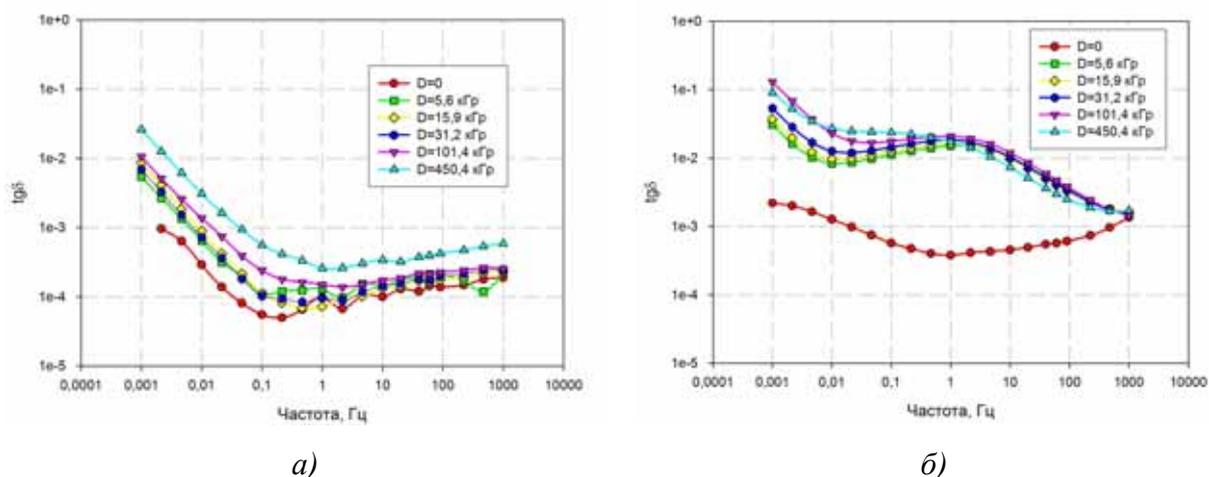


Рис. 5 – Тангенс угла диэлектрических потерь в зависимости от дозы облучения для полиэтиленовой изоляции кабелей ПВВнг в отсутствии (а) и при наличии (б) в ней неконтролируемой примеси

в дальнейшем с ростом дозы облучения скорость роста тангенса угла диэлектрических потерь значительно уменьшается. Диэлектрические потери монотонно увеличиваются в области частот 0,2 Гц. Для полиэтиленовой изоляции без примеси рост диэлектрических потерь наблюдается в основном при дозах больше 10 Мрад во всем диапазоне частот. Быстрый рост диэлектрических потерь на начальной стадии облучения возможен только за счет изменения зарядового состояния неконтролируемых примесей и, возможно, вследствие этого перестройкой их структуры. Последующий рост диэлектрических потерь связан с деструкцией молекулярных цепей, т.е. появлением радиационных дефектов, концентрация которых уже превышает концентрацию неконтролируемых примесей.

Важной особенностью полиэтилена как полукристаллического вещества является то, что его механические и электрические свойства определяются состоянием аморфной фазы [2]. Образование радиационных и других дефектов в аморфной фазе в

процессе эксплуатации при повышенной температуре, как правило, не изменяет свойств полиэтилена на первой стадии. Это связано с отжигом дефектов в аморфной фазе, так как благодаря повышенной температуре и приложенному электрическому полю идет термостимулированный сток дефектов в кристаллические области. В последующем объем кристаллической области может настолько увеличиться, что резко изменятся механические, а значит и электрические свойства полиэтилена. Наличие неконтролируемых примесей в аморфной фазе меняет механизм старения. Заряженная примесь сама становится дополнительным центром стока для радикалов. Это ведет, по-видимому, к более ускоренной кристаллизации полиэтилена, т.е. к более быстрому изменению его механических и электрических свойств.

Следовательно, старение изоляции из СПЭ под воздействием радиации вплоть до поглощенных доз 450 Гр при повышенной температуре эксплуатации 60 – 70 °С можно не учитывать при отсутствии других деградационных факторов и отсутствии примесей в аморфной фазе полиэтилена. Последнее условие не всегда соблюдается для изоляции силовых кабелей старого поколения.

Полученные результаты, с одной стороны, позволили объяснить противоречивые данные по старению силовых кабелей с изоляцией из СПЭ, с другой стороны, показали высокую чувствительность методов ВН и ЧДС при оценке этого старения. В качестве показателей старения (ПС) изоляции из СПЭ изоляции можно использовать величину максимума кривой ВН и тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 0,2 Гц. Эти показатели практически идентично описывают старение изоляции СПЭ, что следует из представленных на рис. 6а и 6б их зависимостей от дозы облучения.

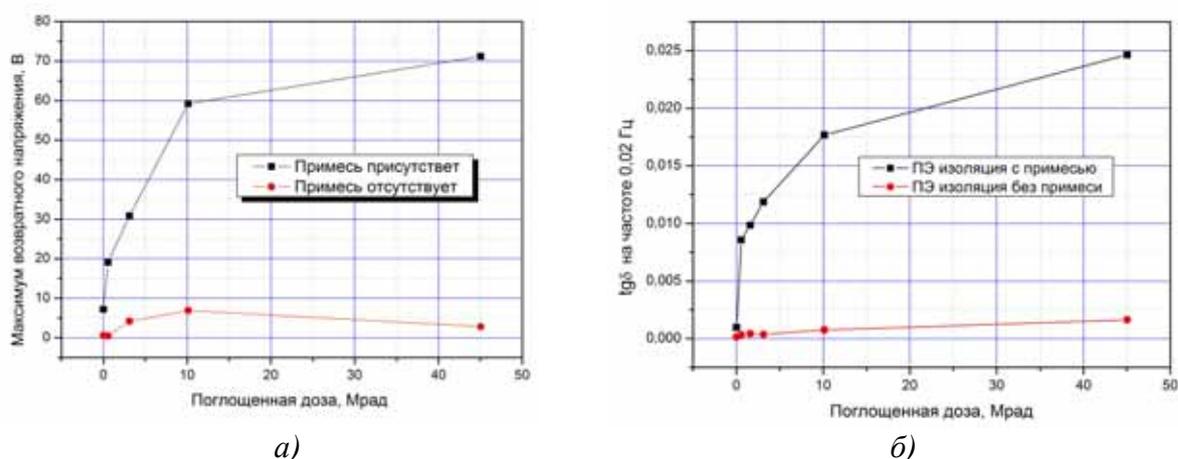


Рис.6 – Максимум восстановленного напряжения (а) и тангенс угла диэлектрических потерь (б) для образцов кабелей ПВВнг: ● – в отсутствии примеси, ■ – в присутствии неконтролируемой примеси

Разработка технического документа. Проведенные исследования старения СПЭ изоляции силовых кабелей в тяжелых условиях эксплуатации и анализ технической документации по методам испытаний силовых кабелей [3-7] явились обоснованием для разработки технического документа по проведению испытаний повышенным напряжением и контролю технического состояния силовых кабельных линий на атомных станциях. Данный документ введен в действие под номером 1.2.4.10.006.0014-2007.

Основной целью документа является повышение эффективности выявления дефектов изоляции силовых кабелей и снижение уровня разрушающего воздействия испытательного напряжения на бездефектные области изоляции из СПЭ путем: внедрения испытаний силовых кабельных линий повышенным напряжением на сверхнизкой частоте 0,1 Гц; проведением периодических испытаний силовых

кабельных линий повышенным выпрямленным напряжением величиной не более $4U_0$, где U_0 – рабочее напряжение между жилой и металлическим экраном; проведением испытаний силовых кабелей с полимерной изоляцией постоянным напряжением поэтапно величинами $0,5U_0$, $1,0U_0$, $1,5U_0$, $2,0U_0$ и одновременным измерением при этом восстановленного напряжения. Последний путь фактически предоставляет возможность заменить проведение испытания повышенным напряжением силовых кабелей с изоляцией из СПЭ и этиленпропиленовой резины периодическим контролем состояния методом восстановленного напряжения.

Документ вводит классификацию состояния силовых кабелей по степени старения изоляции в эксплуатации и определяет действия персонала при проведении ТОиР силовых кабелей при различных уровнях старения. Введено четыре градации силовых кабелей по степени старения изоляции: "норма", "работоспособное с отклонениями", "ухудшенное" и "предельное". Степень старения определяется по измерению восстановленного напряжения, определению частотного спектра диэлектрических потерь, коэффициенту абсорбции и индексу поляризации.

При отсутствии осушения пропитанной бумажной изоляции персонал может проводить оценку состояния кабеля с пропитанной бумажной изоляцией по коэффициенту абсорбции и индексу поляризации. Коэффициент абсорбции рассчитывается по формуле:

$$K_a = \frac{R_{60сек}}{R_{15сек}} \quad (1)$$

Индекс поляризации рассчитывается по формуле:

$$PI = \frac{R_{10мин}}{R_{1мин}} \quad (2)$$

Для оценки состояния кабелей с изоляцией из СПЭ и этиленпропиленовой резины (ЭПР) следует применять только показатель K_a . Оценку состояния кабелей по этим показателям следует проводить согласно классификации, представленной в таблице 1.

Таблица 1 – Классификация технического состояния силовых кабелей в эксплуатации по коэффициенту абсорбции и индексу поляризации изоляции

Состояние кабеля	Коэффициент абсорбции	Индекс поляризации
Норма	$K_a > 1,6$	$PI > 4,0$
Работоспособное с незначительными отклонениями	$1,6 \geq K_a \geq 1,4$	$4,0 \geq PI \geq 3,0$
Работоспособное со значительными отклонениями	$1,4 > K_a \geq 1,25$	$3,0 > PI \geq 2,0$
Ухудшенное	$1,25 > K_a > 1,0$	$2,0 > PI \geq 1,0$
Предельное	$K_a \leq 1,0$	$PI \leq 1,0$

Для оценки интегрального увлажнения кабеля с ПБИ возможно применение метода ЧДС. Интегральное содержание влаги W_C в бумажной изоляции рассчитывается по формуле [8]:

$$W_C = 15,3 + 2,53 \ln(\operatorname{tg} \delta_{\min}), \% \quad (3)$$

где $\operatorname{tg} \delta_{\min}$ – значение тангенса в минимуме спектра диэлектрической кривой. Оценка состояния кабелей по содержанию W_C проводится согласно критериям, представленным в таблице 2.

Для оценки степени старения силового кабеля с изоляцией из СПЭ или ЭПР возможно применение метода ВН. Из кривых ВН рассчитывается показатель старения γ по величине максимума возвратного напряжения по формуле:

$$\gamma = \frac{U_{rm}(U_c = 2U_0)}{U_{rm}(U_c = U_0)}, \quad (4)$$

Таблица 2 – Классификация технического состояния силовых кабелей с пропитанной бумажной изоляцией по увлажнению изоляции

Классификация состояния кабеля	Степень увлажнения изоляции	Содержание влаги в изоляции W_C , %
Норма	Увлажнение отсутствует	$W_C < 0,5$
Работоспособное с незначительными отклонениями	Низкая	$0,5 \leq W_C \leq 1,0$
Работоспособное со значительными отклонениями	Средняя	$1,0 < W_C \leq 2,5$
Ухудшенное	Высокая	$2,5 < W_C \leq 3,5$
Предельное	Предельная	$W_C > 3,5$

где U_{rm} – максимальная величина возвратного напряжения, кВ; U_c – напряжение зарядки, кВ. Оценку состояния кабелей по показателю γ следует проводить согласно классификации, представленной в таблице 3.

Таблица 3 – Классификация технического состояния силовых кабелей с изоляцией из СПЭ или ЭПР по результатам данных восстановленного напряжения

Классификация состояния кабеля	Степень старения изоляции	Показатель старения γ
Норма	Старение отсутствует	2
Работоспособное со значительными отклонениями	Наличие отдельных областей старения	$2,0 < \gamma \leq 2,5$
Ухудшенное	Высокая степень старения или локальное повреждение изоляции	$2,5 < \gamma < 3,0$
Предельное	Предельная	$\gamma \geq 3,0$

Документ определяет объем и нормы испытаний силовых кабелей на напряжение 6 кВ, в том числе при их смешанной прокладке. Величина и соответствующая ей длительность испытаний напряжением частотой 0,1 Гц выбирается из таблицы 4 производителем работ по испытаниям, исходя из производственных условий.

Таблица 4 – Величина и соответствующая ей длительность испытаний напряжением частотой 0,1 Гц

Напряжение, кВ	18	15	11
Время испытаний, мин	15	30	60

При отсутствии необходимого оборудования для проведения испытаний кабелей повышенным напряжением на частоте 0,1 Гц испытания следует проводить напряжением постоянного тока. Величина и длительность испытательного выпрямленного напряжения, приложенного между испытуемой жилой и заземленными двумя другими жилами и экраном (броней), должны быть равны 15 кВ и 15 мин.

Разработка компьютеризированного кабельного журнала. Для внедрения и выполнения процедур по управлению сроком службы кабелей разработан

компьютеризированный кабельный журнал для контрольных и силовых кабелей АЭС. Журнал представляет собой: программное обеспечение; базы данных, количество которых может быть не ограничено; паспорта технического состояния кабеля в формате EXCEL. Журнал включает информацию о свойствах кабелей, кабельных линий, трасс, щитов и коробок, помещений, оборудования, систем. В паспортах в удобном формате для печати представлены нормативные и эксплуатационные характеристики кабелей, результаты их обследования различными методами и оценки срока службы. Паспорт автоматически формируется по шаблону при заполнении основных страниц кабельного журнала.

Структура базы данных обеспечивает быстрый доступ, исключает ненужное повторение и обеспечивает целостность данных. База данных является реляционной, т.е. все данные хранятся в файлах в виде прямоугольных таблиц и все манипуляции над базой данных сводятся к манипуляции с таблицами.

Основная единица хранения в базе данных – кабельная линия. Кабельная линия состоит из некоторого количества кабелей, муфт, проходок и других деталей. Каждому кабелю поставлено в соответствие оборудование (источник и потребитель) и (или) щиты и коробки. Каждый кабель обладает рядом характеристик, которые также хранятся в базе данных. На рис.7 представлено одно из характерных окон базы данных с описанием нормативных данных КЛ и листы кабельного журнала в формате EXCEL.

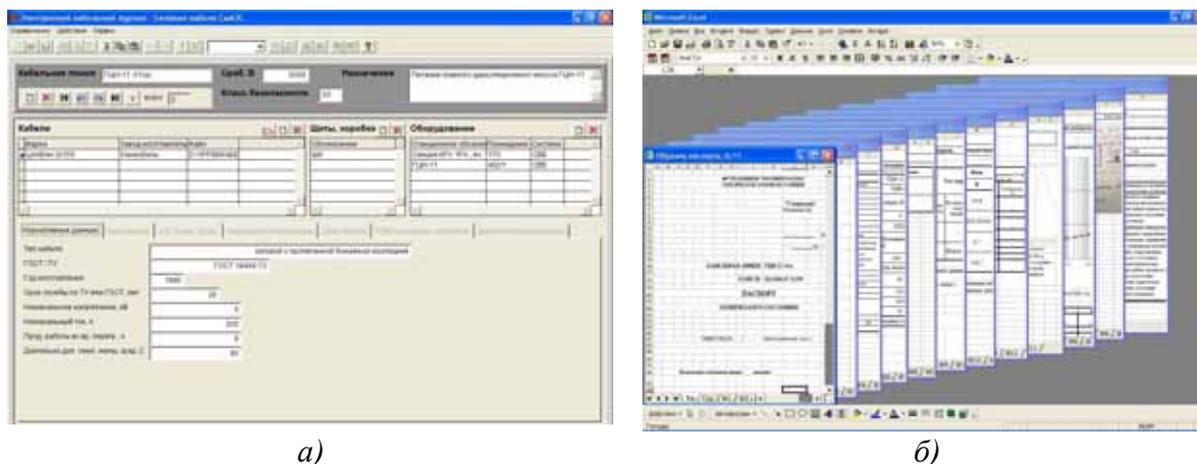


Рис. 7 – Характерное окно базы данных и листы кабельного журнала в формате EXCEL

Программное обеспечение обеспечивает доступ пользователя к информации, хранимой в базах данных, в интерактивном режиме посредством ввода команд меню или нажатия кнопок, расположенных на рабочем поле.

Внедрение кабельного журнала формализует выполнение процедур по управлению сроком службы кабелей, и, следовательно, обеспечивает: организацию работ по надежной эксплуатации кабелей, передачу опыта эксплуатации, «плавный» переход к дополнительному сроку эксплуатации блока.

Установка образцов кабелей свидетелей. Для исследования реальных механизмов старения кабельных изоляционных материалов и оценок срока их службы, в том числе, с учетом воздействия на них повреждающих факторов проектных аварий, были установлены образцы свидетели наиболее широко используемых кабелей в гермообъеме реакторного отделения 1 блока Калининской АЭС. Скорость старения образцов при этом всего в несколько раз выше, чем для кабелей, находящихся непосредственно в эксплуатации. Половина образцов кабелей свидетелей перед установкой предварительно были подвергнуты воздействию повреждающих факторов максимальной проектной аварии.

Обычно для оценок срока службы кабелей в гермообъеме используют данные, полученные в ходе ускоренных лабораторных испытаний. В таких испытаниях скорость старения в сотни – тысячи раз выше, чем в реальной эксплуатации. Такой подход приводит к тому, что в лабораторных испытаниях траектория старения (механизм старения) изоляционных материалов не совпадает с реальной, имеющей место в эксплуатации. Как правило, оценки срока службы по данным лабораторных испытаний слишком консервативны. Мониторинг состояния образцов кабелей свидетелей позволит в будущем существенно снизить этот консерватизм, в том числе, с учетом возможного воздействия на кабели гермообъема повреждающих факторов максимальной проектной аварии.

Список литературы

1. Кононенко А.И. "Контроль состояния и управление назначенным сроком службы кабелей на атомных станциях". IX Симпозиум "ЭЛЕКТРОТЕХНИКА 2030. Перспективные технологии электроэнергетики." Сборник тезисов, 29 мая – 31 мая 2007 г., С.176-177.
2. Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety: In-containment instrumentation and control cables. (Оценка и управление старением основных компонент атомной станции, важных для безопасности: Кабели контроля и управления гермообъема) IAEA-TECDOC-1188, Volume 1-2, ISSN 1011-4289, IAEA, 2000.
3. Стандарт МЭК 60502-2/2005 "Силовые кабели на напряжение от 1 кВ до 30 кВ".
4. Стандарт IEEE 400 "Руководство по проведению испытаний в эксплуатации и оценке изоляции систем силовых кабелей".
5. Стандарт DIN-VDE 0276 часть 620 "Силовые кабели".
6. РД 34.45-51.300-97 "Объем и нормы испытаний электрооборудования", 6-е издание.
7. ТУ 16.К71-343-2004 "Кабели силовые с изоляцией из сшитого полиэтилена не распространяющие горение на напряжение 6 -10 кВ".
8. Neimanis R., Saha T.K., R. Eriksson. Determination of Moisture Content in Mass Impregnated Cable Insulation Using Low Frequency Dielectric Spectroscopy // IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Seattle, USA, July 16-20, 2000.