

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИК НЕРАЗРУШАЮЩЕЙ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ КАБЕЛЕЙ И УПРАВЛЕНИЕ ИХ СРОКОМ СЛУЖБЫ НА ЭНЕРГОБЛОКАХ АТОМНОЙ СТАНЦИИ

Кононенко А.И., Циканин А.Г., Ихсанов Р.Ш., Медянкин Д.В., Руденко И.В.

ФГУП НИИП, г. Лыткарино

Самовичев В.Г., Титовец В.В.

Концерн "Росэнергоатом", г. Москва

Проведение и развитие работ по управлению сроком службы кабелей было стимулировано решением о продлении эксплуатации энергоблоков за проектным сроком службы. Необходимо было ответить на вопросы: Каким образом оценить состояние нескольких тысяч километров контрольных и силовых кабелей на энергоблоке? Что необходимо делать для того, чтобы поддержать состояние контрольных и силовых кабельных линий в пределах допустимых для выполнения своих функций за проектным сроком службы? Как реализовать современные требования к надежности систем, важных для безопасности, в дополнительный срок эксплуатации?

Важными элементами программы управления сроком службы являются неразрушающая диагностика состояния кабелей и прогнозирование их срока службы, в том числе, для части кабельных линий с учетом воздействия на них повреждающих факторов проектных аварий.

Совершенствование методов неразрушающей диагностики подразумевает под собой:

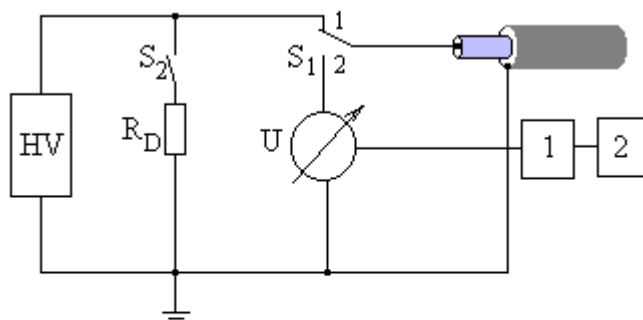
- разработку новых экспрессных методов контроля состояния;
- исследование механизмов старения кабелей и их изоляционных материалов;
- уточнение предельных значений показателей старения.

Совершенствование методов неразрушающей диагностики силовых кабелей.

Наиболее остро стоит вопрос о разработке и совершенствовании методов неразрушающего контроля состояния силовых кабелей с полиэтиленовой (ПЭ) изоляцией и с пропитанной маслоканифольными составами бумажной изоляцией (PILC). Новые возможности в этом направлении связаны с контролем свойств изоляции, имеющих поляризационную природу – ток абсорбции, возвратное (восстановленное) напряжение и тангенс угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) на сверхмалых частотах. Именно эти показатели дают возможность контролировать изменения миграционной (объемно-зарядовой) поляризации, которая имеет место в технических изоляционных материалах. Частным случаем миграционной поляризации является высоковольтная поляризация, заключающаяся в образовании объемных зарядов в диэлектрике и приэлектродных слоях при высокой напряженности электрического поля. Установление миграционной поляризации происходит в течение значительного времени, измеряемого иногда десятками минут. Интенсивность и длительность процессов миграционной поляризации определяется количеством и типом дефектов (точнее их зарядовым состоянием) в объеме изоляции. Зарядовое состояние дефектов может также измениться при захвате ими ионов воды. Таким образом, измеряя периодически параметры миграционной поляризации, мы получаем возможность контролировать старение и увлажнение изоляции. Традиционный показатель миграционной поляризации - ток абсорбции является интегральным откликом поляризационных явлений. Метод возвратного напряжения дает возможность регистрировать выборочно определенную часть дефектов, дифференцируя их по временному вкладу в процесс поляризации. Такая возможность реализуется путем изменения отношения времен предварительного заряда и разряда

контролируемой изоляции кабеля. Измерение $\text{tg}\delta$ в широком диапазоне частот (от 0,0001 до 1000 Гц) дает возможность контролировать диэлектрические потери или емкость в зависимости от частоты, т.е. непосредственно проводить диэлектрическую спектроскопию изоляции кабеля.

Метод возвратного напряжения. Сегодня метод возвратного напряжения активно используют для диагностики состояния ПЭ и PILC силовых кабелей среднего напряжения, так как эти кабели наиболее распространены в промышленности. На рисунке 1 представлена схема измерения возвратного напряжения



- HV- источник высокого постоянного напряжения
- R_D разрядное сопротивление
- U-измерительный элемент
- 1- измерительный преобразователь
- 2- устройство для записи показаний

Рисунок 1 – Схема измерения возвратного напряжения

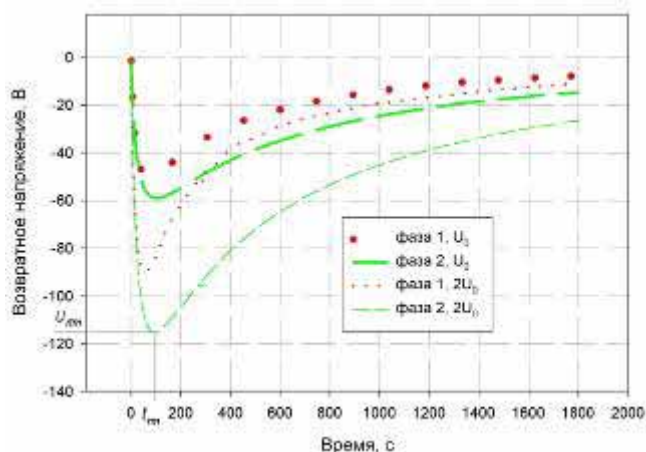
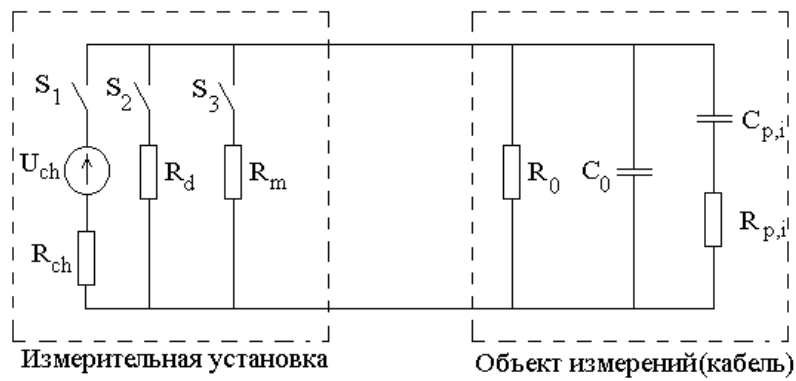
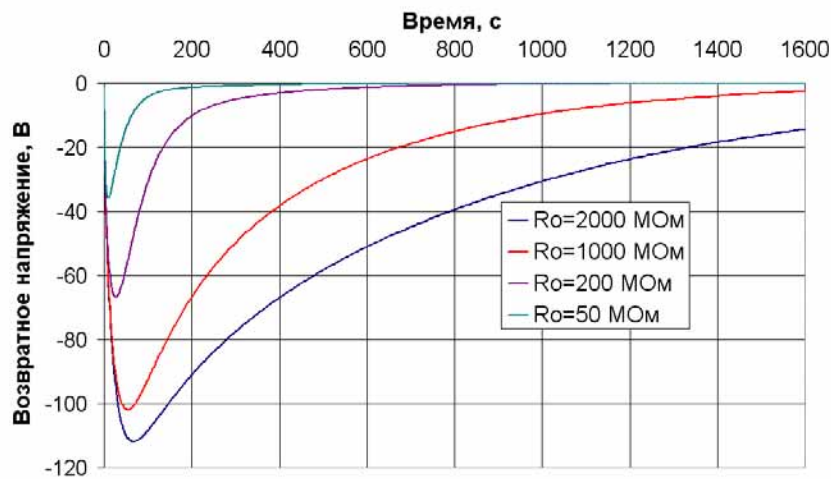


Рисунок 2 – Кривые возвратного напряжения для силового кабеля ААШВ на 6 кВ для поврежденной фазы (точечная кривая) и неповрежденной фазы (пунктирная кривая) при двух зарядовых напряжениях U_0 и $2U_0$

для диагностирования кабеля. Для оценки состояния PILC кабеля обычно используют такие параметры возвратного напряжения как максимум возвратного напряжения U_{rm} , время максимума t_{rm} (см. рисунок 2), производную возвратного напряжения на начальном участке кривой, отношение кривых возвратного напряжения для двух циклов измерений с разным зарядовым напряжением [1]. Для прогнозирования состояния кабеля необходимо знать начальное и предельное значения указанных выше величин. Как правило, увеличение степени старения изоляции сопровождается увеличением U_{rm} , сдвигом t_m в левую сторону. При отсутствии влаги в бумажной изоляции значение отношения кривых возвратного напряжения в точке 8 с равно 2,0 при этом, допустимому значению содержания влаги соответствует значение – 1,7.



a)



б)

Рисунок 3 – Схема замещения кабеля при измерении возвратного напряжения в кабеле (а) и расчетные кривые возвратного напряжения с разным сопротивлением изоляции (б)

Необходимо отметить, что локальные повреждения кабельной изоляции, приводящие к значительному уменьшению сопротивления изоляции (R_0), сильно изменяют форму кривой возвратного напряжения. Такие повреждения часто встречаются на практике, они могут быть связаны не столько со старением изоляции, сколько с механическим повреждением кабеля в локальном месте, которое также часто сопровождается увлажнением в месте повреждения. На рисунке 2 представлен именно такой случай: кривые возвратного напряжения для силового кабеля ААШВ на 6 кВ для поврежденной фазы (точечная кривая) и неповрежденной фазы (пунктирная кривая). Такие значительные изменения хорошо описываются в рамках поляризационно-релаксационных моделей. В моделях кабель представляется в виде схемы замещения, которая отражает инерционные процессы поляризации и деполяризации. На рисунках 3а,б представлены: схема замещения кабеля и испытательной установки и расчетные данные по изменению кривых возвратного напряжения в зависимости от R_0 . В схеме замещения измерительной установки приняты следующие обозначения: U_{ch} , R_{ch} – эквивалентные напряжение и внутреннее сопротивление источника высокого напряжения, осуществляющего зарядку кабеля, S_1 – ключ коммутации источника, R_d – сопротивление разрядного резистора, S_2 – ключ коммутации разрядной цепи, R_m – внутреннее сопротивление элемента измерения напряжения, S_3 – ключ коммутации измерительной цепи. В схеме замещения кабеля: R_0 – сопротивление изоляции, C_0 – геометрическая емкость кабеля, $R_{pi,i}$, $C_{pi,i}$ – сопротивления и емкости эквивалентных инерционных поляризационных контуров с

постоянными времени τ_{pi} , $i=1\dots n$, n -общее количество эквивалентных поляризационных контуров.

Дальнейшее развитие моделей для количественного описания старения сдерживается недостатком данных по кинетике старения промышленных кабелей. Несмотря на это, метод возвратного напряжения с успехом применяется для мониторинга состояния силовых кабелей с ПИЛС изоляцией. Основой для этого является банк данных кривых возвратного напряжения, полученных для определенных типов кабелей непосредственно в эксплуатации.

Метод возвратного напряжения показал высокую чувствительность к старению РЕ изоляции силовых кабелей. Наличие в изоляции как дефектов старения, например, карбонильных групп, так и "полезных" примесей – антиоксидантов ведет к изменению величины возвратного напряжения. Высокая чувствительность данного метода к дефектам, зарядовое состояние которых отлично от нуля, продемонстрирована на рисунке 4. Для образцов кабеля с ПЭ изоляцией при наличии антиоксиданта величина возвратного напряжения больше, чем для образца без антиоксиданта. Исходя из особенностей метода, диагностику силовых кабелей с ПЭ изоляцией необходимо проводить через несколько лет после эксплуатации, когда в изоляции остаются и образуются новые дефекты, обусловленные только старением.

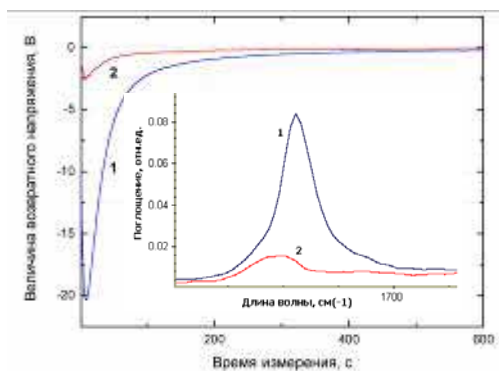


Рис.4 – Возвратное напряжение для образцов кабеля ПВВнг 1×240 и характерное для антиоксиданта поглощение в инфракрасной области спектра: 1 – присутствует антиоксидант, 2 – антиоксидант отсутствует

Упрощенная методика, реализованная на приборе CD-31 производства фирмы SEBA KMT, позволяет оценить состояние полиэтиленовой изоляции силовых кабелей низкого и среднего напряжений вне зависимости от их типа. Показателем старения в этом случае выступает отношение (L) максимумов возвратного напряжений, полученных при напряжении зарядки $2U_0$ и напряжении U_0 : $L = U_{rmax}(2U_0)/U_{rmax}(U_0)$. При $L = 2,0 - 2,5$ изоляция кабеля считается не состаренной, испытание кабеля повышенным напряжением необходимо проводить только в том случае, если имеются повреждения кабеля на отдельных участках и требуется его ремонт. При $L = 2,5 - 3,0$ средняя степень старения изоляции, испытание кабеля повышенным напряжением проводить необходимо. При $L > 3,0$ – изоляция кабеля значительно повреждена, кабель необходимо заменять.

Эффективным методом контроля влажности и старения бумажной изоляции является измерение тангенса угла диэлектрических потерь в широком диапазоне частот. Особенностью этого метода контроля высоковольтной изоляции является низкая величина испытательного напряжения, которая варьируется в пределах от 0 до 200 В. С уменьшением частоты испытательного напряжения наблюдается увеличение

диэлектрических потерь для состаренной или увлажненной изоляции, а при предельном состоянии изоляции происходит ее пробой (см. рисунок 5). Экспериментально полученная зависимость частотного минимума диэлектрической кривой от содержания влаги (см. рисунок 6 [2]) дает возможность оценивать среднее содержание влаги в бумажной изоляции кабеля за одно измерение.

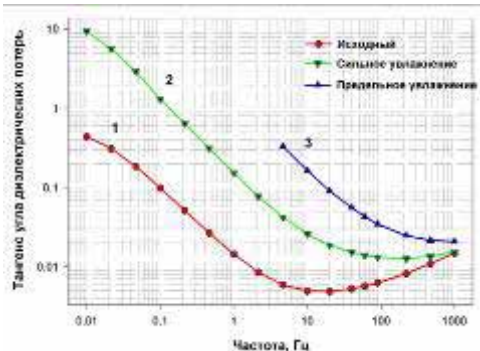


Рис.5 – Диэлектрическая спектроскопия кабеля ААБл 30×40: 1 – исходный образец после хранения на улице; 2 – сильное увлажнение изоляции; 3 – предельное содержание влаги в изоляции

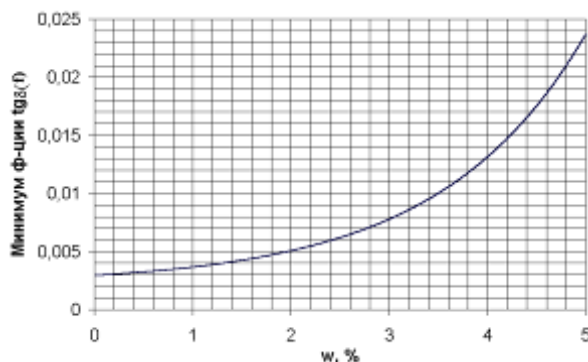


Рис.6 – Среднее содержание влаги в бумажной изоляции кабеля от величины частотного минимума диэлектрической кривой

Разработка новых неразрушающих методов диагностики состояния контрольных кабелей. Перспективными показателями теплового старения контрольных кабелей следует рассматривать скорость распространения ультразвуковых волн в полимерной оболочке [3] и изменение скорости динамического индентора при его соударении с полимерной оболочкой. Первый метод может быть реализован на стандартном ультразвуковом дефектоскопе, для второго разработан опытный динамический твердомер.

На рисунке 7 представлена зависимость скорости распространения ультразвуковых волн от концентрации пластификатора в поливинилхлоридной (ПВХ) изоляции. Для получения этой зависимости были использованы модельные образцы ПВХ пластиката в форме пластин толщиной около 3 мм с известным содержанием пластификатора диоктилфталата. Измерения проводили при помощи ультразвукового дефектоскопа А1212 МАСТЕР. Полученная зависимость дает основание использовать измерения скорости ультразвука для оценки степени теплового старения поливинилхлорида, т.е. когда старение определяется десорбцией пластификатора [1, 3].

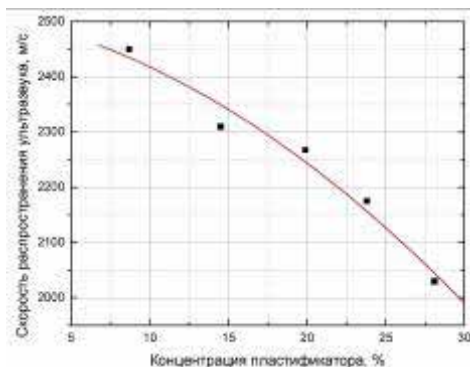


Рис. 7 – Зависимость скорости распространения ультразвуковых волн от концентрации пластификатора в ПВХ пластикате

Опытный ударный индентор, разработанный и изготовленный в Центре материаловедения и ресурса ВНИИАЭС, показал хорошие потенциальные возможности для оценки состояния контрольных кабелей. В основу работы прибора положен метод регистрации процесса ударного взаимодействия индентора с материалом. Схема этого процесса изображена на рисунке 8. Боек 2 из взведенного состояния выталкивается пружиной, ускоряется и летит вдоль направляющей трубки 1 в направлении испытуемого образца 5. В нижней части бойка прикреплен шаровой индентор 3, который приходит в контакт с образцом. В процессе контактного взаимодействия боек замедляется, меняет направление движения и отрывается от образца. Регистрация процесса взаимодействия намагниченного индентора с образцом проводится по величине электромагнитного тока в катушке индуктивности 4. Для описания

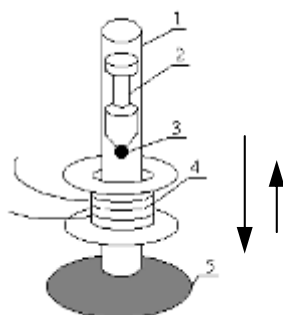


Рис.8 – Схема процесса измерения: 1 – направляющая трубка, 2 – намагниченный боек, 3 – индентор, 4 – индукционная катушка, 5 – образец

процесса взаимодействия шарового индентора используется модель Фойгта [4], по которой движение индентора будет определяться уравнением:

$$m \frac{d^2\alpha}{dt^2} + \mu r^{0,5} \alpha^{0,5} \frac{d\alpha}{dt} + kr^{0,5} \alpha^{1,5} = 0, \quad (1)$$

где α - глубина внедрения индентора, m - масса ударника, μ - коэффициент вязкости, k - коэффициент жесткости, r - радиус индентора. Сравнительные измерения оболочки кабеля КВВГ ударным индентором и индентором "EPRI/OGDEN" (см. рисунки 9 а и б) показали на возможность регистрировать ударным индентором не только тепловое старение ПВХ изоляционных материалов, но и их радиационное старение.

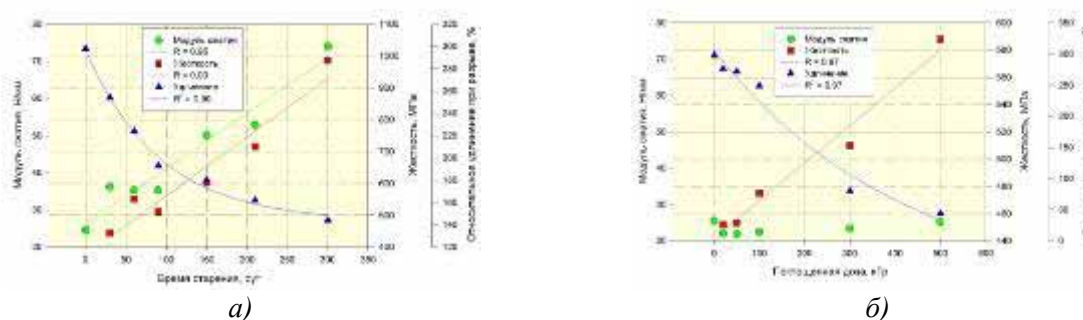


Рис.9. Изменение относительного удлинения при разрыве (▲), модуля сжатия (●) и жесткости (■) при старении ПВХ оболочки кабеля типа КВВГ: а) тепловое старение при 100°C; б) радиационное старение при 0,03 Гр/с

Знание механизмов старения изоляционных материалов дает возможность уменьшить степень консерватизма при прогнозировании срока службы кабелей. В настоящее время установлены закономерности старения в эксплуатации контрольного

кабеля КПЭТИ с изоляцией из сшитого полиэтилена марки 102-57 на основе терморadiационных ускоренных испытаний. Полученные данные позволяют установить устойчивость этого кабеля как тепловому воздействию (см. Рис.10), так и радиационному старению через корреляционную зависимость относительного удлинения при разрыве (ОУР) и времени индукции, определяемого при помощи дифференциальной сканирующей калориметрии (см. рис.11). Время индукции микрообразца полиэтилена массой 4 мг в данном случае измеряли на термическом анализаторе Labsys при температуре 210°C в атмосфере кислорода.

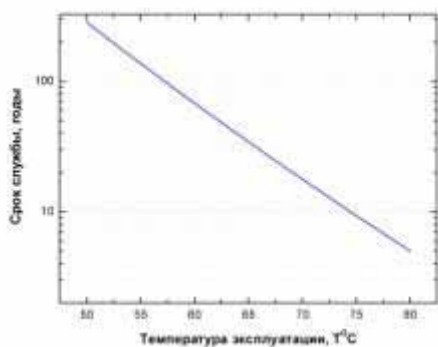


Рис. 10 – Срок службы кабеля КПЭТИ в зависимости от температуры эксплуатации

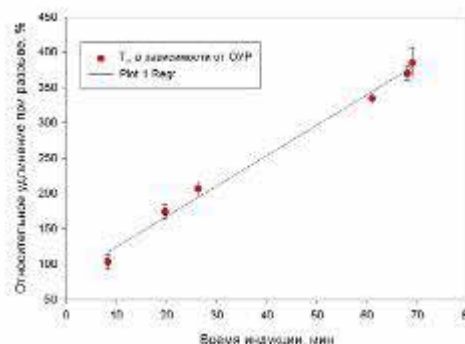


Рис. 11 – Относительное удлинение при разрыве и время индукции для внутренней полиэтиленовой оболочки кабеля КПЭТИ при терморadiационном старении

Оценка срока службы для кабелей гермообъема. Для установления срока службы кабелей с учетом воздействия на них повреждающих факторов максимальной проектной аварии (МПА) в дополнительный срок эксплуатации энергоблока, разработаны РД ЭО 0496-03 [5]. Этапы выполнения работ по этим РД представлены на рисунке 12. Основой для разработки этого руководящего документа явились экспериментальные работы, проведенные по проекту R2.10/96 "Мониторинг старения кабелей" в рамках программы ТАСИС на пилотном 3 энергоблоке Нововоронежской АЭС. Важным результатом для эксплуатации контрольных кабелей типа КВВГ, МКШ с изоляцией из ПВХ явилась оценка их срока службы с учетом воздействия МПА. Эти данные представлены в таблице 1. Низкий срок службы кабелей с ПВХ изоляцией обусловлен возможной потерей функциональных свойств этих кабелей во время воздействия высокотемпературной паровоздушной смеси даже при незначительном старении за счет десорбции пластификатора. Поэтому применение этих кабелей допустимо только в гермообъеме энергоблоков ВВЭР-440 первой очереди (3 и 4 блоки Нововоронежской АЭС, 1 и 2 блоки Кольской АЭС), в которых высокая температура эксплуатации реализуется только в отдельных точках.

Таблица 1 – Консервативная оценка срока службы (эксплуатация кабелей без диагностики состояния) в годах кабелей типа КВВГ на энергоблоке ВВЭР-440

Окружающая температура, °C	Место расположения кабеля	
	В гермообъеме	Вне гермообъема
40	28,1	64,8
45	16,6	39,3
50	10,0	24,0
55	4,3	14,8
60	2,7	9,2

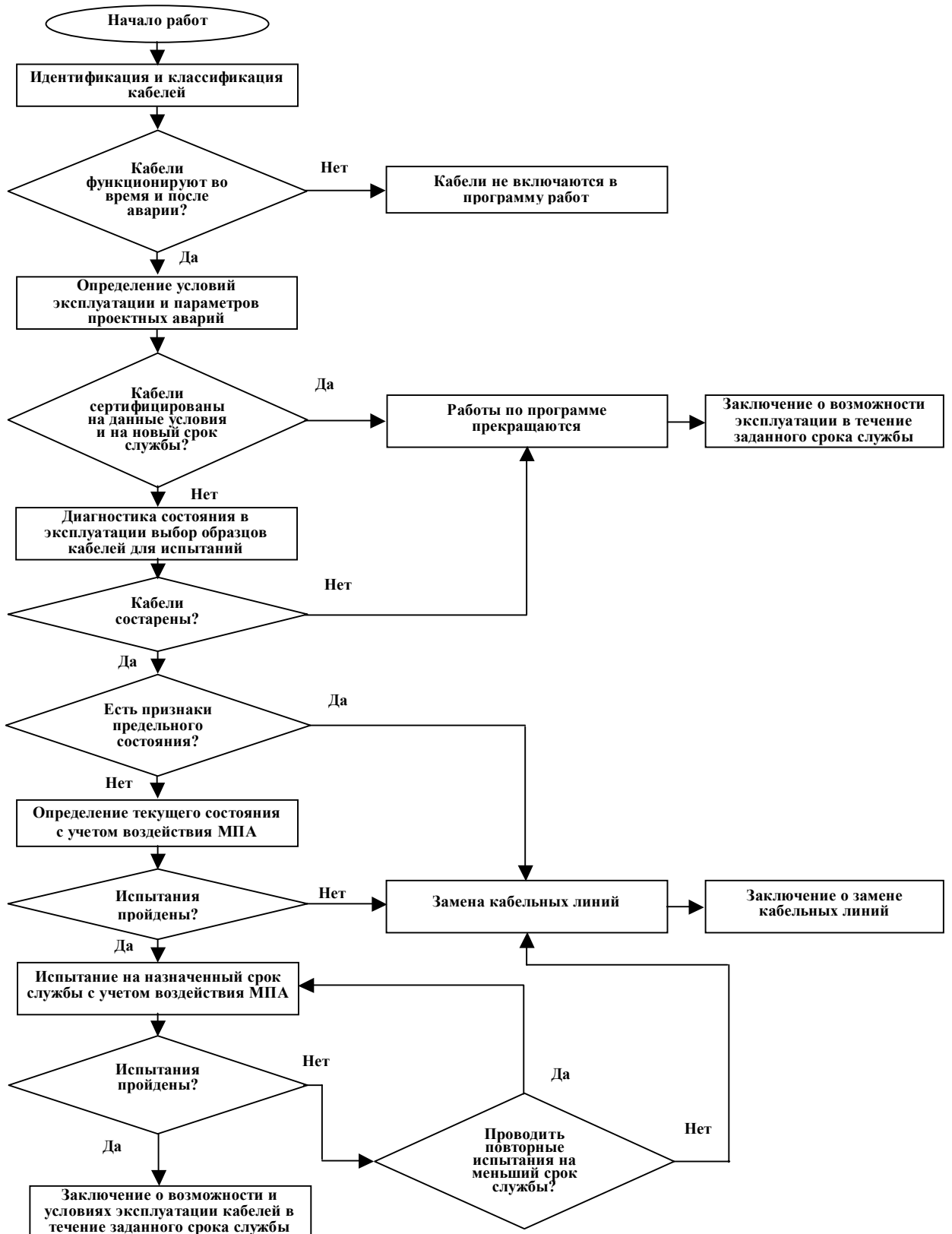


Рис.12 – Схема организации работ по определению состояния и продлению срока службы кабелей АЭС с учетом воздействия на них повреждающих факторов проектных аварий

Список литературы

1. РД ЭО 0322-02. "Положение по определению технического состояния и управлению старением кабелей на АЭС".
2. Neimanis R., Saha T.K., Eriksson R., Determination of Moisture Content in Mass Impregnated Cable Insulation Using Low Frequency Dielectric Spectroscopy / IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Seattle, USE, July 16-20, 2000.
3. IAEA-TECDOC-1188 "Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety: In-containment instrumentation and control cables", Volume 1-2, ISSN 1011-4289, IAEA, 2000.
4. Бакиров М.Б., Рудницкий В.А., Кононенко А.И., Фролов И.В. "Определение свойств вязкоупругих материалов методом динамического индентирования"/ Заводская лаборатория. Диагностика материалов. №2, 2001. Том 67. С.38-41.
5. РД ЭО 0496-03. "Методические указания по определению состояния и продлению срока службы кабелей атомной станции с учетом воздействия на них повреждающих факторов проектных аварий"