



РОСАТОМ



Управление ресурсными характеристиками кабелей на атомных станциях: сертификация и диагностика

А.И. Кононенко

Начальник управления ФГУП «НИИП»

Email: aikononenko@niipribor.ru

Тел.: +7 495 5523807

Цель доклада

- Представить технический документ «ПО1.2.1.02.999.0184-2013. Определение технического состояния и управление старением кабелей на атомных станциях» (вторая редакция РД ЭО 0322-02)
 - Оценка технического состояния проводится на основе экспериментальных данных типовых сертификационных испытаний и технического диагностирования представительных кабелей в эксплуатации



Основные определения

- Сертификационные испытания – контрольные испытания продукции, проводимые с целью установления соответствия характеристик ее свойств национальным и (или) международным нормативно-техническим документам (ГОСТ 16504-81)
- Управление ресурсными характеристиками (УРХ) кабелей на атомных станциях – это виды деятельности, оперативные мероприятия, методики для поддержки работоспособного состояния кабелей в приемлемых пределах для безопасной и экономически выгодной эксплуатации атомной станции (АС)

Основные ресурсные характеристики кабелей

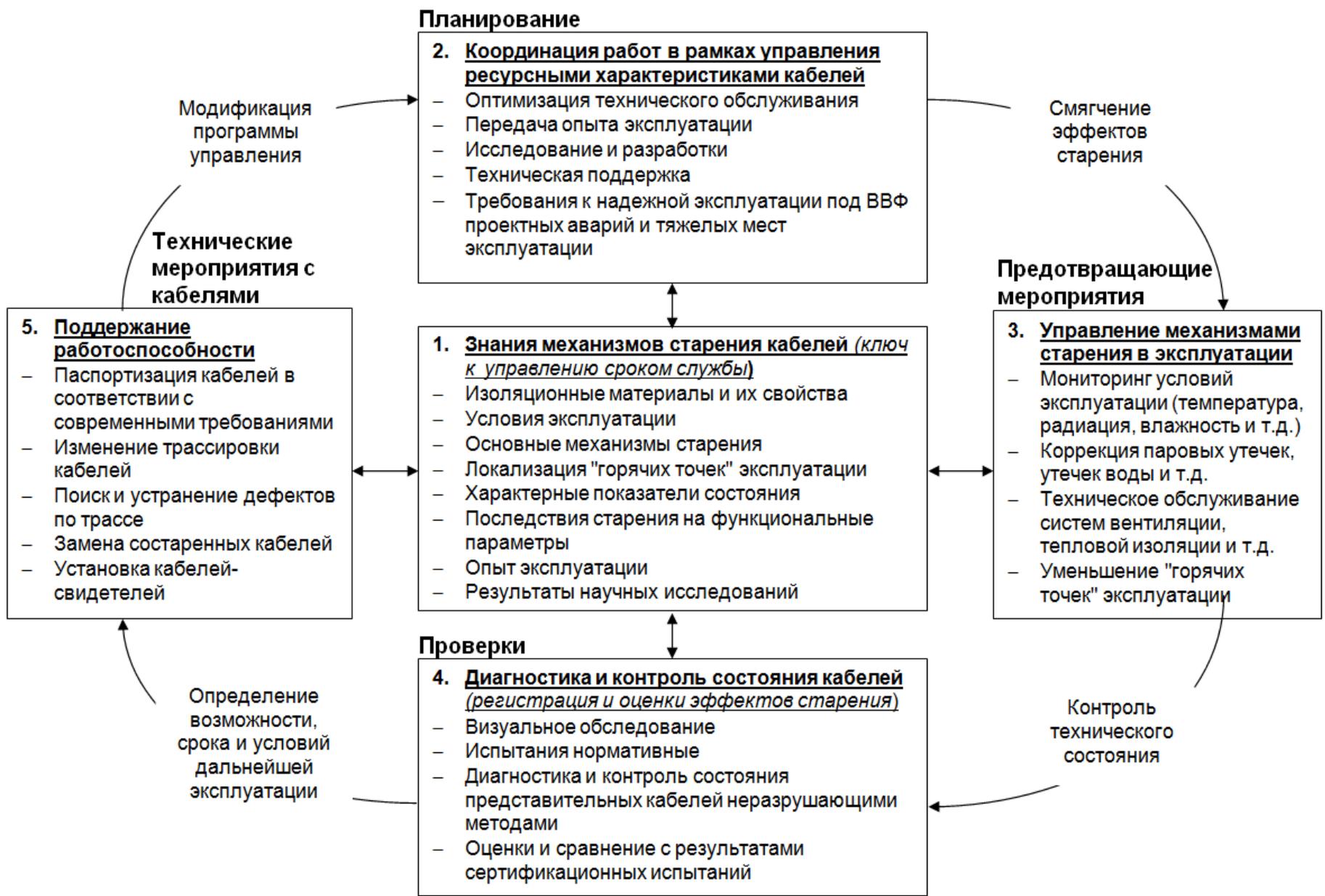
- Срок службы (гарантийный, назначенный, сертификационный, расчетный)
- Показатели (технического) состояния
- Начальные и предельные значения показателей состояния
- Траектория старения (модель старения)
- Стойкость к внешним воздействующим факторам проектных аварий

Цель проведения работ по УРХ - определение и периодическое уточнение основных ресурсных характеристик кабелей

Процесс УРХ кабелей АС

- Определение стойкости кабелей к ВВФ проектных аварий и жестким условиям («горячим точкам») эксплуатации
- Выявление доминирующих механизмов и эффектов старения
- Реализация мер по снижению интенсивности ВВФ
- Выполнение диагностики (контроля) технического состояния и периодическую оценку срока
- Разработка и внедрение новых методов неразрушающей диагностики (контроля)
- Сравнение затрат на вывод кабелей из эксплуатации и их замену с затратами на текущую сертификацию
- Своевременную замену кабелей на энергоблоках, достигших предельного состояния
- и т.д.

Процесс УРХ кабелей АС (продолжение)



Методология сертификации кабелей для АС

- Основная задача сертификации – предоставление обоснованных доказательств работоспособности кабелей под ВВФ в эксплуатации в течение заданного срока эксплуатации
 - Первый этап – проведение типовых испытаний новых типов кабелей на устойчивость к ВВФ нормальных условий эксплуатации и проектных аварий для установления сертификационного срока службы
 - Второй этап – текущая сертификация кабелей, находящихся в эксплуатации на энергоблоке АС. Цель текущей сертификации – распространение сертификационного срока службы на новый период времени на основе анализ опыта эксплуатации, проведения периодической диагностики (контроля) состояния представительных кабелей
- Альтернатива текущей сертификации
 - замена кабелей
 - проведение повторных типовых сертификационных испытаний

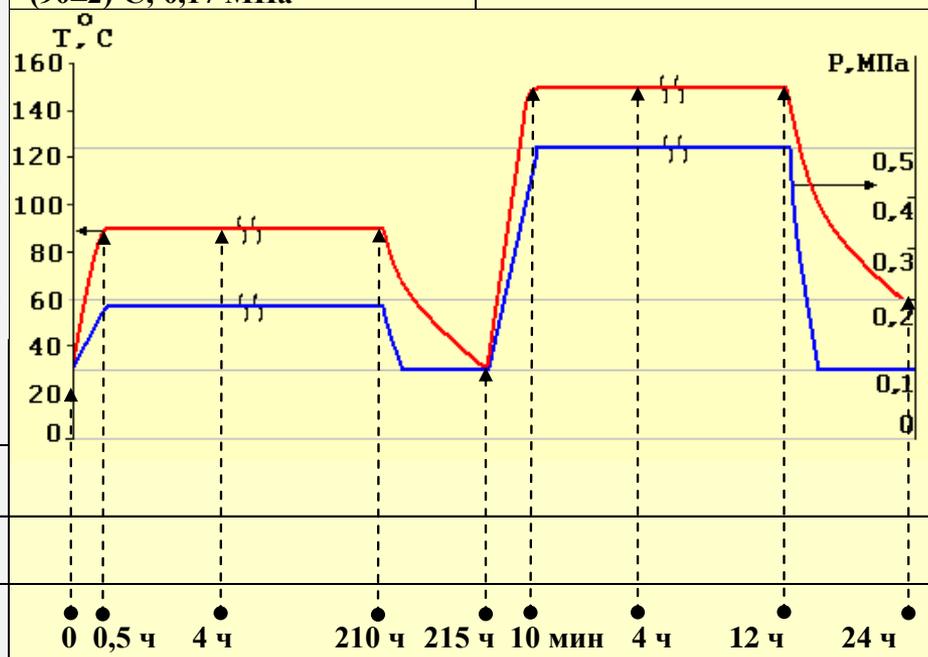


Типовые сертификационные испытания на заданные условия эксплуатации

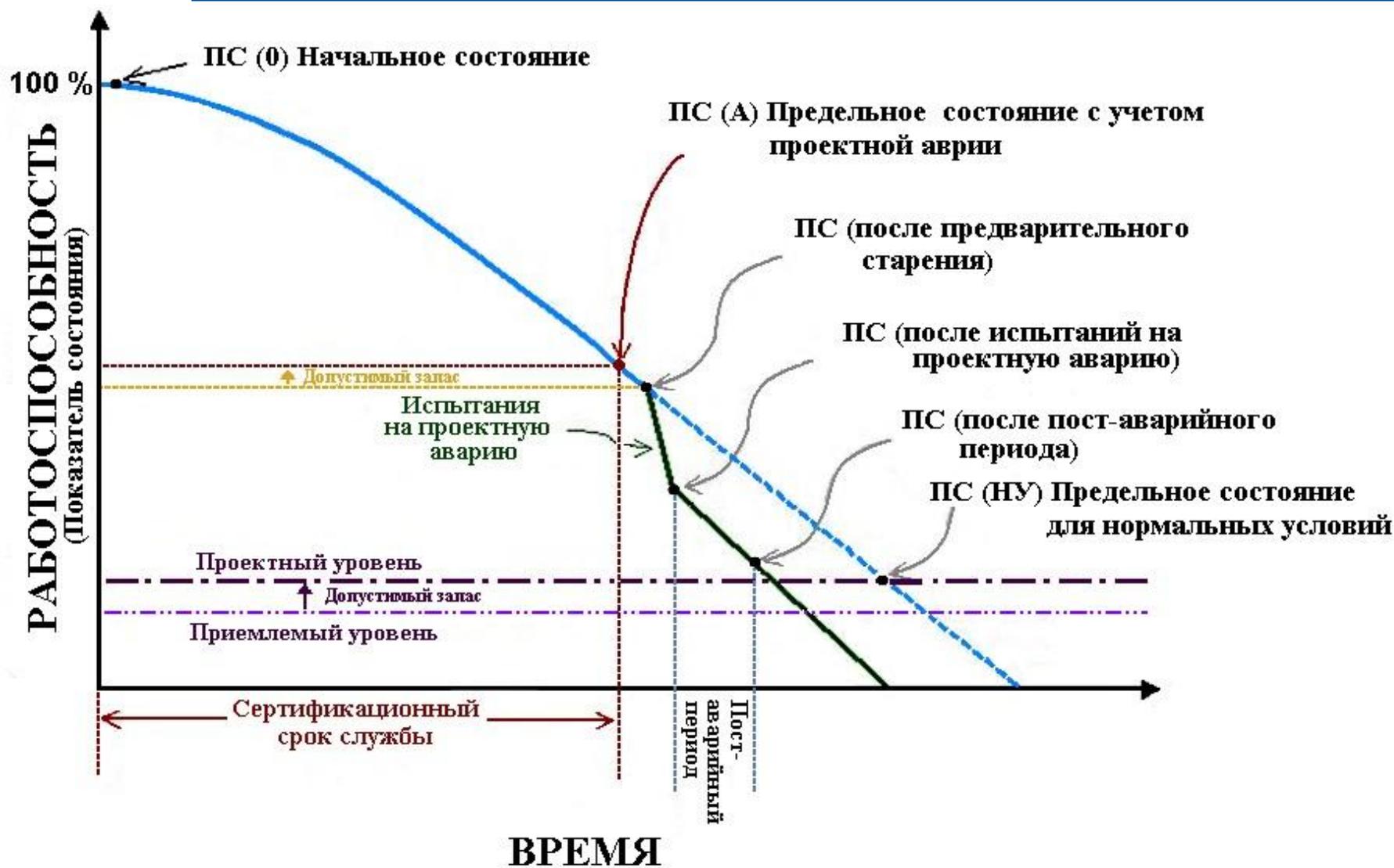
- В ходе проведения сертификационных типовых испытаний последовательно искусственно имитируется деградация кабелей:
 - 1) в нормальных проектных условиях эксплуатации в течение назначенного срока службы;
 - 2) под воздействием повреждающих факторов проектных аварий;
 - 3) под воздействием пост-аварийных окружающих условий
- Рекомендуется планировать и проводить типовые испытания сразу на несколько временных периодов, например, 25, 30, 35, 40 лет

План сертификационных испытаний

Последовательность	Этапы испытаний				Измерения перед паровым тестом	Режим нарушения теплообмена (12 циклов x 15 часов) и «малой течи» (6 циклов x 5 ч) (90±2)°C; 0,17 МПа		Режим «большой течи» (1 цикл x 10 ч) (150±2)°C; 0,5 МПа		Измерения после парового теста	Измерения после парового теста		Выдержка в дезактивирующем растворе 7 суток при 60 °С и давлении 0,1 МПа					
	Тепловое старение		Радиационное старение I (500 Гр/ч, ... кГр + 21 кГр)			до	после	до	после		до	после						
Операции																		
Проверка оборудования	X		X								X							
Визуальный осмотр		X			X						X		X					
Измерение сопротивления изоляции	X	X		X		0	0,5 ч	4 ч	210 ч	215 ч	10 мин	4 ч	12 ч	24 ч	X	X	X	X
Функциональный тест	X	X	X	X	X				X						X	X	X	X
Измерение индентором (для кабелей)	X	X		X											X			X
Измерение относительного удлинения при разрыве (для кабелей)	X	X		X											X			X



Оценка работоспособности. Показатели состояния



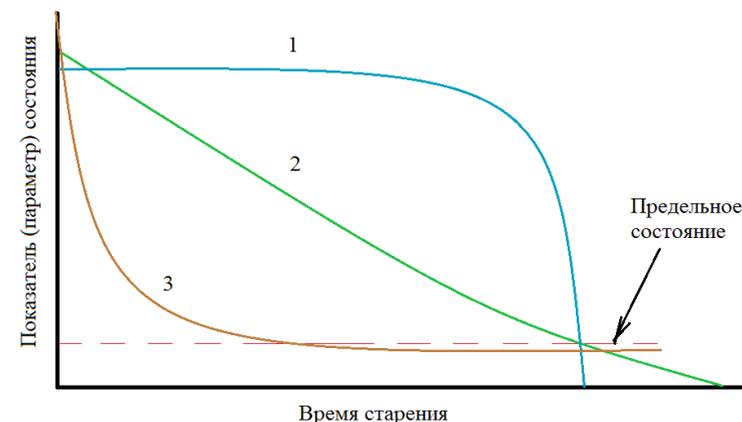
Традиционные технические параметры кабелей и критерии их приемки

Параметр	Тип кабеля	Критерий приемки		
		Новый кабель	После искусственного старения	Во время и после испытания с имитацией проектной аварии
Относительное удлинение при разрыве	Все типы	Должен отвечать ТТ	>50% абсолютной величины ¹	>50% абсолютной величины
Испытание на эластичность при изгибе	Все типы	Трещины в изоляции отсутствуют	Трещины в изоляции отсутствуют	Трещины в изоляции отсутствуют
Испытание на электрическую прочность	Все типы	Тест пройден успешно	Тест пройден успешно	Тест пройден успешно
Сопротивление изоляции	Все типы	Должно соответствовать ТТ, либо проектной документации	Должно соответствовать ТТ, сниженным на один порядок, либо проектной документации	Должно соответствовать ТТ, сниженным на четыре порядка. Кабель должен выполнять свои функции
Электрическая емкость	Кабели связи	Отсутствуют изменения	Отсутствуют изменения	Отсутствуют изменения
Коэффициент затухания, характеристический импеданс, подавление помех, распространение сигнала	Коаксиальный	Нет изменений, связанных с техническими характеристиками	Нет изменений, связанных с техническими характеристиками	Нет изменений, связанных с техническими характеристиками ²
Другой параметр		Зависит от конкретного применения кабеля (например, отсутствие жидкости или пара в кабеле во время испытания с имитацией проектной аварии)		

П р и м е ч а н и я

1 Для некоторых кабелей может использоваться значение, составляющее менее 50% от абсолютной длины

2 Допускаются только такие изменения, как увеличение коэффициента затухания из-за повышения температуры, предусмотренное проектом АС или соответствующими стандартами



Выбор параметров испытаний и образцов

- 3 - 5 образцов не менее 3 м, дополнительно небольшие образцы для проведения измерений механических свойств
- $t_{исп-1.} = t_{эксп.} \cdot \exp[(E_a / k) \cdot (1/T_{исп-1.} - 1/T_{эксп.})]$ – время теплового старения (оценка по Аррениусу)
- Проблемы в определении E_a
- $t_{исп-2.} = (D_{эксп.} + D_{авар-2})/P_{исп.}$ – время радиационного старения, $P \leq 500$ Гр/час ($P \leq 100$ Гр/час при наличии эффектов синергизм)



Консерватизм и неопределенности ТИПОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

- В ускоренных испытаниях из-за большой интенсивности воздействующих факторов невозможно полностью реализовать механизм старения
- Применение модели Аррениуса – основная причина появления консерватизма
- Имитация многофакторного старения в ускоренных испытаниях (раздельное / одновременное воздействия /последовательность воздействий)
- Учет других ВВФ, в том числе непроектных
- Погрешности испытательной техники при моделировании интенсивности ВВФ. Типичные допуски:
 - максимальная температура: +8 °С
 - максимальное давление: $\pm 10\%$ от показаний датчика
 - поглощенная доза: $\pm 15\%$ от показаний дозиметров
 - напряжение источника питания $\pm 10\%$ от показаний величины напряжения



Основные виды деятельности по УРХ кабелей в эксплуатации

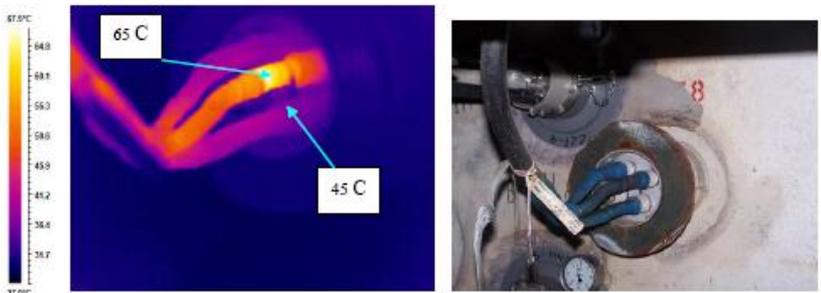
- Мониторинг условий эксплуатации кабелей
- Определение представительных кабелей и определение кабельных трасс с жесткими условиями ("горячими точками") эксплуатации
 - ❑ Кабели, которые полностью характеризуют старение группы однотипных кабелей с одинаковыми условиями монтажа, одинаковыми внешними воздействующими факторами на всех участках кабельных трасс и одинаковыми режимами эксплуатации
- **Диагностика** (контроль) состояния представительных кабелей по ПС, в том числе, образцов кабелей-свидетелей
- Выполнение мероприятий по снижению действия интенсивности ВВФ
- Плановый ремонт и замена кабелей

Оценка текущего сертификационного статуса кабелей

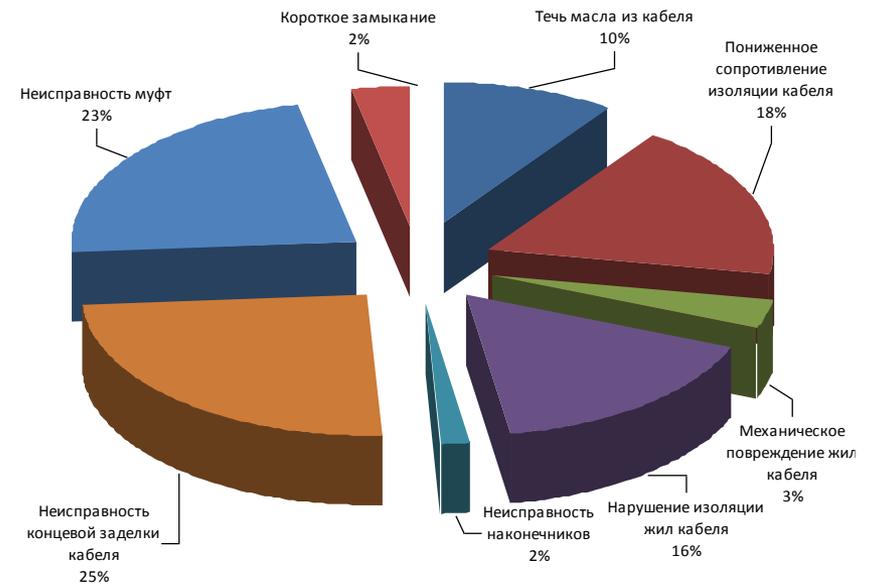
- Кабели EQ1 – кабели с сертификационным сроком службы T_{eq} не менее дополнительного срока эксплуатации T_{newpr} блока и остаточного срока эксплуатации по проекту T_{respr} : $T_{eq} \geq T_{newpr} + T_{respr}$
- Кабели EQ2 – кабели с T_{eq} менее $T_{newpr} + T_{respr}$, но более текущего срока T_{cur} его эксплуатации
- Кабели EQ3 – кабели с $T_{eq} \leq T_{cur}$
- Кабели EQ4 – кабели, имеющие неподтвержденный сертификационный статус
 - Кабели могут быть переведены в другой класс (например, из класса EQ4 в класс EQ1) при получении положительных результатов типовых сертификационных испытаний или документального подтверждения их сертификационного статуса

Технический осмотр кабельных трасс

- Визуальный и тактильный осмотр
- Тепловизионный контроль
- Опрос персонала
- Анализ оперативной эксплуатационной документации



Пом. Э531/2, В158, отм. +17,0. Температура окружающей среды – 26°C, кабелей – до 45°C, наконечника фазы В – до 65 °С: а) инфракрасное изображение, б) фотография



Неразрушающие методы диагностики

- Условно можно разделить на две группы
 - методы, которые позволяют в силу своей высокой чувствительности оценивать степень старения изоляции (*определение концентрации антиоксидантов и стабилизаторов, измерение восстановленного напряжение, изотермического тока релаксации, $\text{tg}\delta$ в диапазоне 0,001 – 1000 Гц, ...*)
 - методы, которые не обладают высокой чувствительностью к старению, но позволяют осуществлять локацию (предварительное местоположение) уже развитых дефектов по трассам кабелей (*временная рефлектометрия, рефлектометрия ЧР, мостовые методы, ...*)

Методы диагностики

Метод	Контроль состояния и определение срока службы	Локализация дефектов по трассе
Измерение ОУР изоляционных кабельных материалов	Да, основной разрушающий метод	Нет
Измерение сопротивления изоляции $R_{из}$ и абсорбционных характеристик K_a и PI	Да, низкая чувствительность	Нет
Определение гель-фракции	Да, контроль старения по определению числа сшивок	Нет
Измерение плотности	Да, контроль старения по величине плотности	Нет
Ядерно-магнитный резонанс (ЯМР)	Да, контроль старения величине периода релаксации ЯМР	Нет
Определение ТНО методом ДСК	Да, по температуры начала окисления	Нет
Определение периода индукции или (ВИ) методом ДСК	Да, по времени индукции	Нет
Измерение кабельным индентором	Да, по коэффициенту жесткости	Нет
ИК Фурье спектроскопия микрообразцов изоляции	Да, по характерным полосам поглощения	Нет
Измерение удельной теплоты плавления методом ДСК микрообразцов массой ≥ 4 мг	Да, для ПТФЭ изоляции	Нет
Термогравиметрический анализ (ТГА)	Да, по потере массы	Нет
Частотная диэлектрическая спектроскопия (ЧДС)	Да, по диэлектрическим потерям в широком диапазоне частот	Нет
Измерение восстановленного (возвратного) напряжения в силовых кабелях	Да, по параметрам восстановленного напряжения	Нет
Метод измерения изотермического тока релаксации (IRC-анализ), т.е. метод измерения разрядного тока	Да, по параметрам релаксационной кривой	Нет

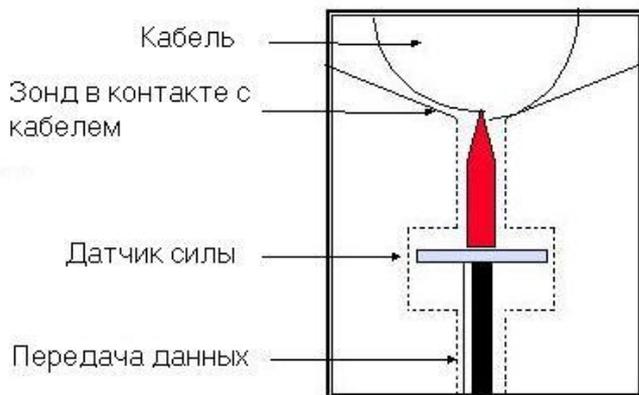
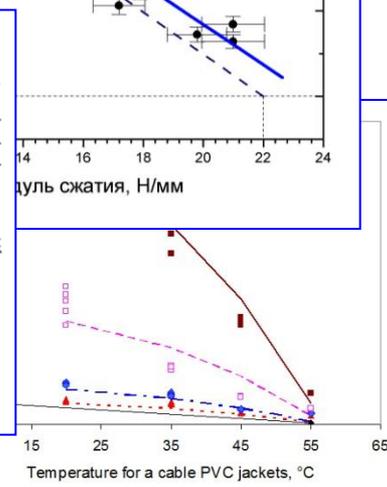
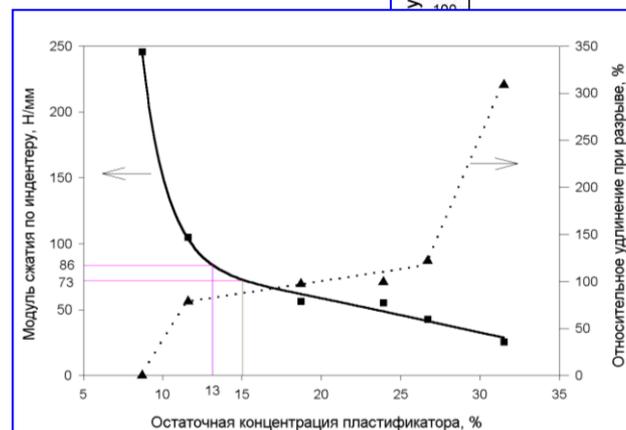
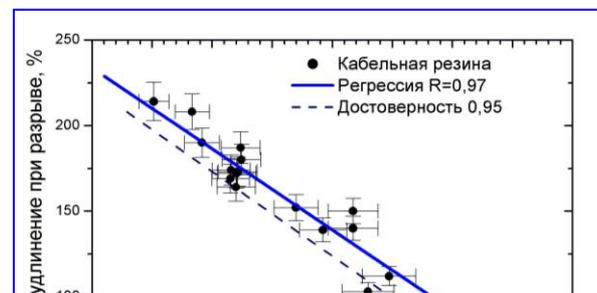


Методы диагностики (продолжение)

Метод	Контроль состояния и определение срока службы	Локализация дефектов по трассе
Традиционный метод регистрации частичных разрядов (ЧР)	Да, по параметрам ЧР в изоляции силовых кабелей	Нет
Метод регистрации ЧР при затухающем осциллирующем напряжении (метод OWTS)	Да, по параметрам ЧР в изоляции силовых кабелей	Да
Рефлектометрия (временная, временная с опорным источником напряжения, вейвлет)	Да, низкая чувствительность к старению изоляции	Да
Мостовые методы	Нет	Да
Топографические методы (индукционный, емкостной, потенциальный)	Нет	Да, точная локализация
Тепловизионный контроль	Нет	Да, при визуальном доступе к трассе
Частотная рефлектометрия. Резонансный синусоидальный метод стоячих волн (LIRA - Line Resonance Analysis)	Да, чувствительность выше, чем у временной рефлектометрии	Да
Совместная (одновременная) частотно-временная рефлектометрия	Да, чувствительность выше, чем у временной рефлектометрии	Да



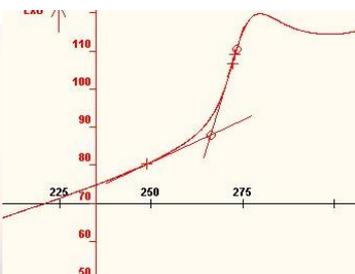
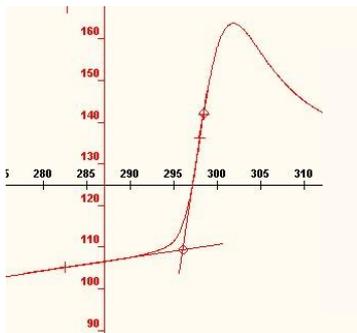
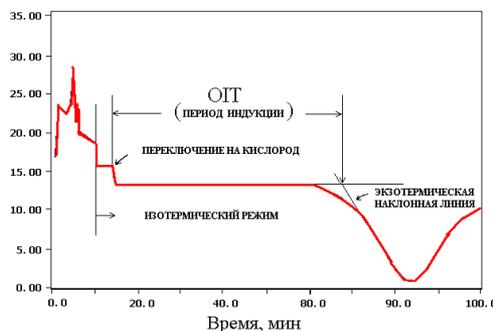
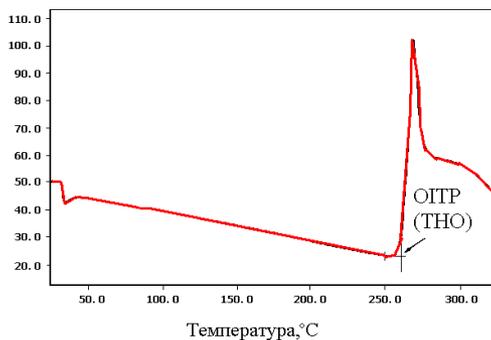
Традиционные методы для оценки старения электрической изоляции. Измерения кабельным индентором



$$\tau_{\text{срок_службы}} = \tau_d \cdot \frac{M_{\text{Пр}} - M(\vartheta)^{0,95}}{M(\vartheta)^{0,95} - M_0},$$

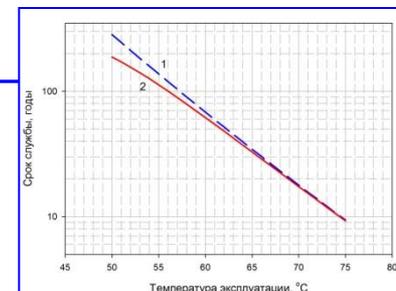


Традиционные методы для оценки старения электрической изоляции. Дифференциальная сканирующая калориметрия



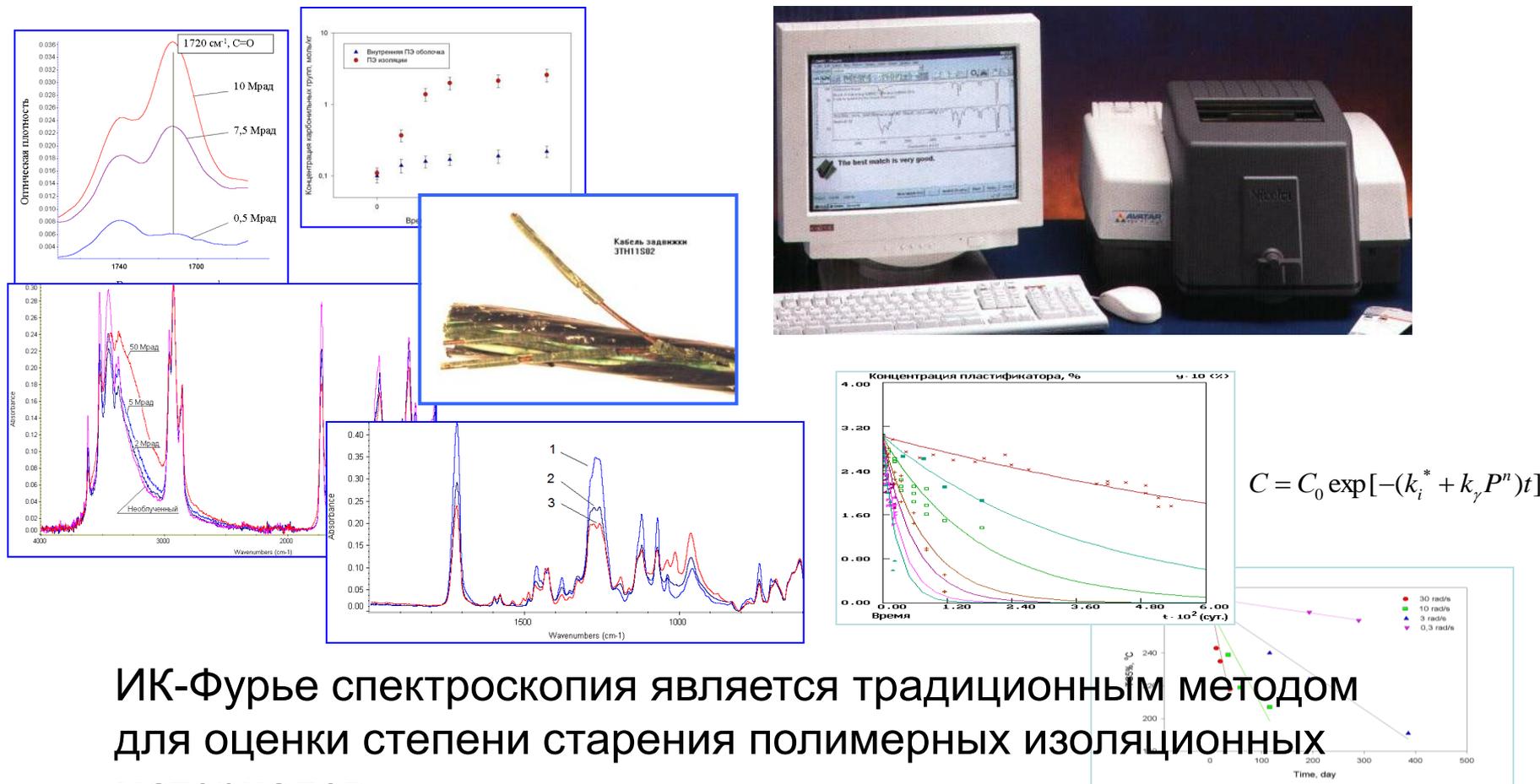
$$\tau_{OITP} = \tau_{test} \cdot \frac{OITP_{test} - OITP_{lim}}{OITP_{ini} - OITP_{test}} \cdot \frac{OITP_{ini} + 273}{OITP_{lim} + 273}$$

- Полиолефиновые изоляционные материалы (полиэтилен и др.)
 - Измерение температуры начала окисления (OITP) микрообразцов
 - Измерение времени индукции (OIT)



$$\tau(T, \gamma) = a \cdot \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \cdot \exp(-k \cdot D)$$

Традиционные методы для оценки старения электрической изоляции. ИК-Фурье спектроскопия



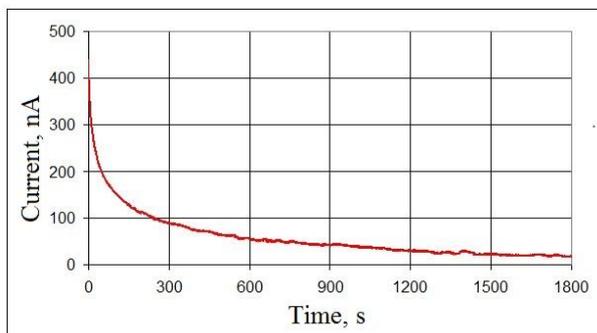
ИК-Фурье спектроскопия является традиционным методом для оценки степени старения полимерных изоляционных материалов

$$TG5\% = TG5\%(0) \cdot (1 - r \cdot P^n \cdot t)$$

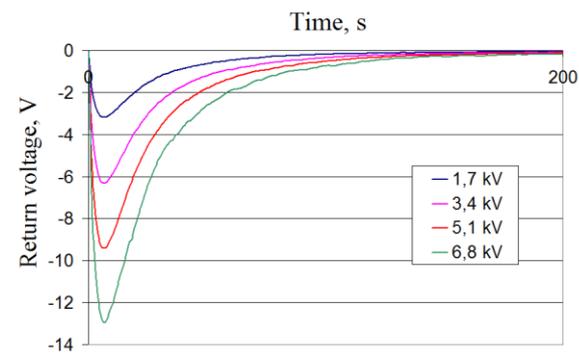


Измерение тока релаксации и ВН для оценки старения полимерной изоляции силовых кабелей

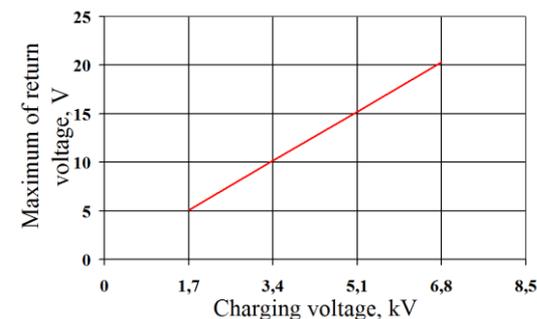
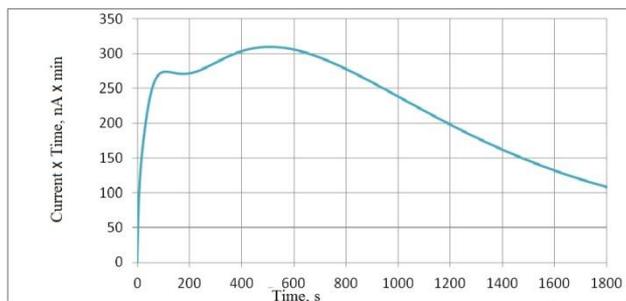
$$I_{relax} = I_0 + \sum_{i=1}^n I_i \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right)$$



$$U_r(t) = \sum_{i=1}^n A_i \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right)$$

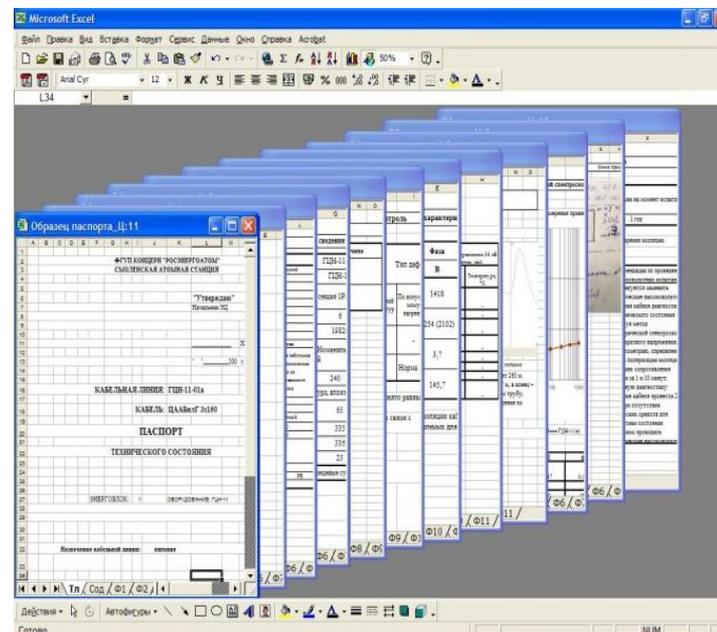
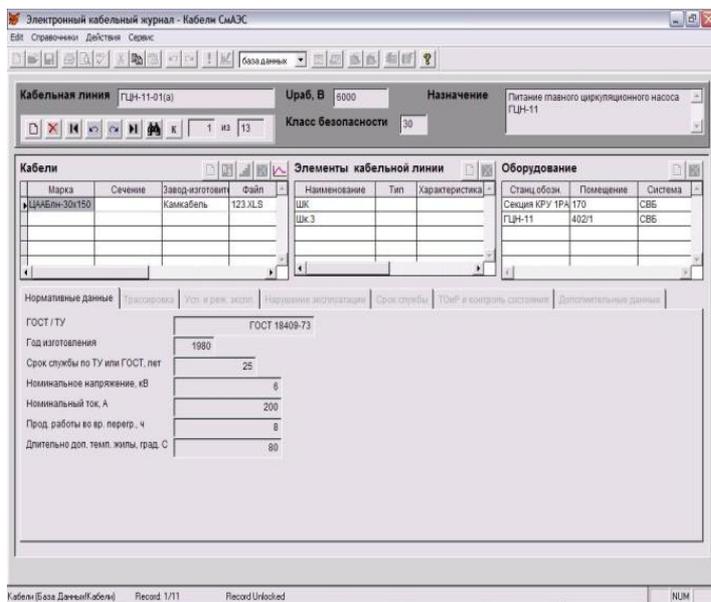


$K_a^I = I_{15}/I_{60}$	$PI^I = I_{60}/I_{600}$
1,47	3,85
1,48	3,53
1,50	3,24



Информационное обеспечение технического диагностирования

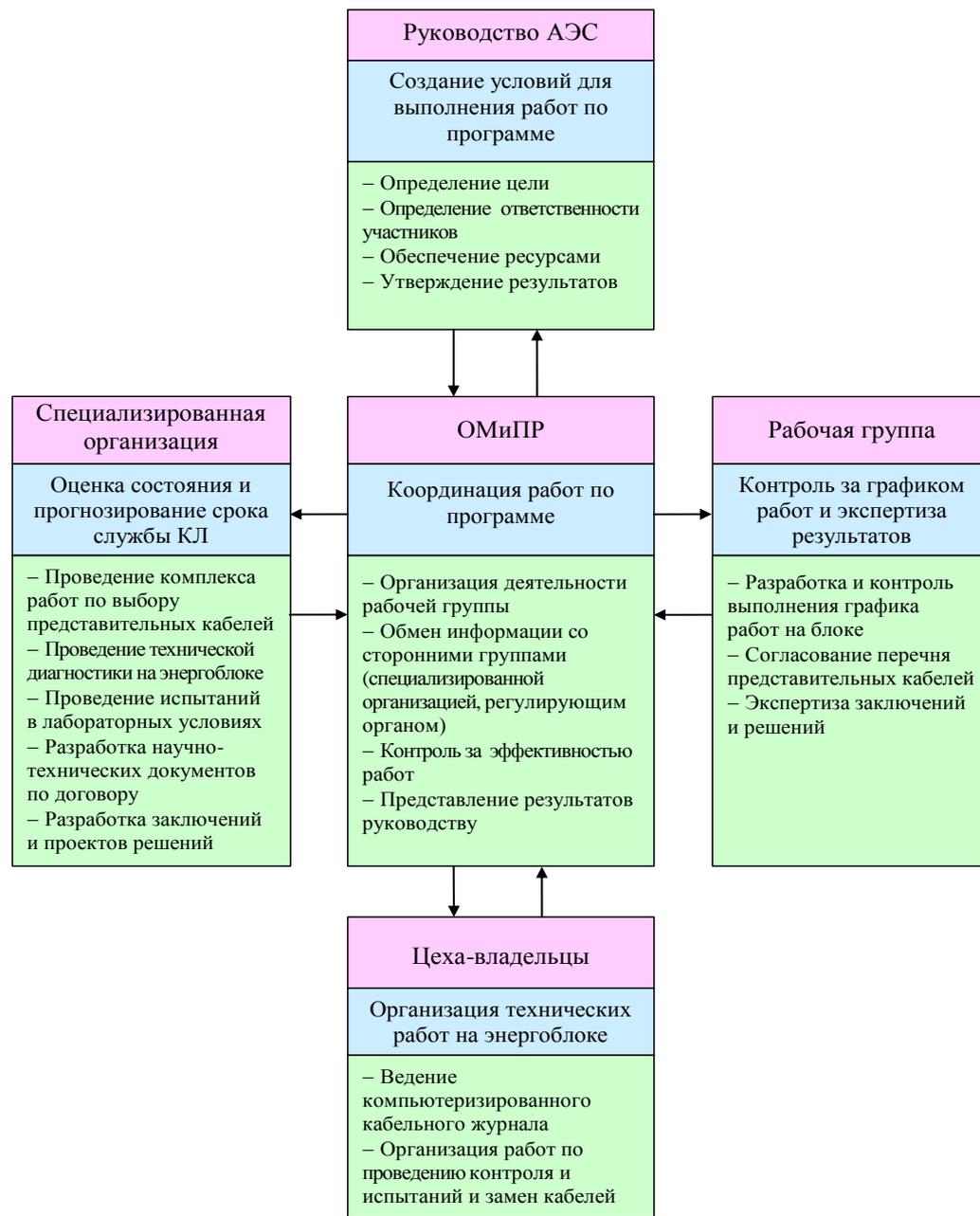
- Информационное обеспечение диагностики (контроля) технического состояния кабелей – это паспортизация представительных кабелей с ведением компьютеризированного кабельного журнала, т.е. базы данных по эксплуатационным параметрам кабелям и ресурсным характеристикам, которые оцениваются при периодическом контроле кабелей



Разработка и внедрение программ по управлению ресурсными характеристиками кабелей

Типовые формы

- Мероприятий по УРХ
- Регламента диагностики





**РОС
ЭНЕРГО
АТОМ**

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
ДИВИЗИОН РОСАТОМА



60 лет
атомной
энергетике



МНТК-2014

«Безопасность,
эффективность
и экономика
атомной
энергетики»

Диплом

Лучший доклад
Девятой Международной научно-технической конференции
«Безопасность, эффективность и экономика
атомной энергетики»

Направление: БЕЗОПАСНАЯ, ЭФФЕКТИВНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ АЭС
Секция: Повышение надежности электротехнического оборудования,
систем контроля и управления

НАГРАЖДАЕТСЯ

Кононенко Александр Иванович

Тема доклада: Управление ресурсными характеристиками

кабелей на АЭС: сертификация и диагностика

Первый заместитель
Генерального директора
ОАО «Концерн Росэнергоатом»

В.Г. Асмолов



Спасибо за внимание!