

# РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ МЕТОДИЧЕСКИХ УКАЗАНИЙ ПО ПОИСКУ И ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФЕКТОВ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ НА АТОМНЫХ СТАНЦИЯХ

Циканин А.Г., Кононенко А.И., Солопко С.Н., Ихсанов Р.Ш., Медянкин Д.В.  
ФГУП НИИП, г. Лыткарино

Кабели на атомных станциях (АС) играют важную роль в системах измерений, безопасности и контроля и к ним предъявляются повышенные требования, т.к. часть кабелей обязана выполнять свои функции в неблагоприятных условиях эксплуатации (повышенные температура, радиация, влажность, вибрация, запаривание и т.д.), а также в условиях проектных аварий и после них.

Своевременное выявление дефектов кабельных линий (КЛ) неразрушающими методами и их устранение способствует повышению надежности работы и безопасности при эксплуатации энергоблоков АС. Для достижения этой цели предназначены разработанные "Методические указания по поиску и локализации дефектов в контрольных кабелях атомных станций" – РД ЭО 0504-03.

Поиск дефектов в контрольных кабелях на АС до разработки указанных методических указаний (МУ) осуществлялся, как правило, на основе методов, реализованных для силовых кабелей, в которых, в частности, предусматривается подача повышенного напряжения (пробой) для перевода высокоомных дефектов в низкоомные с последующей их фиксацией либо визуально, либо техническими методами поиска. Однако этот метод пригоден для одиночных кабелей и не пригоден, как показала практика, для кабелей в пучках, что связано с повреждением соседних кабелей в процессе испытаний за счет большой энергии, выделяющейся в месте неконтролируемого пробоя.

Кроме того, большинство КЛ на АС покрыты огнезащитным составом (ОЗС), что препятствует визуальному отысканию места повреждения, в том числе и места пробоя. Поэтому дефект на практике устранялся, как правило, не ремонтом, а путем прокладки новых кабелей без удаления старых, а это, в свою очередь, приводит к увеличению нагрузки на кабельные конструкции, их деформации и последующему повреждению самих кабелей. Также необходимо учитывать высокую стоимость прокладки нового кабеля.

В связи с этим, в разработанных МУ рекомендуется применять низкоэнергетические методы диагностирования контрольных кабелей, позволяющие эффективно обнаружить дефекты как дистанционно, так и локализовать их непосредственно на трассе КЛ.

Все дефекты КЛ в МУ по характеру делятся на устойчивые и неустойчивые, простые и сложные:

- к устойчивым дефектам относятся такие простые дефекты, как короткие замыкания (КЗ) и обрывы. Характерной особенностью устойчивых дефектов является неизменность сопротивления в месте дефекта с течением времени и под воздействием различных дестабилизирующих факторов;
- к неустойчивым дефектам относятся утечки и продольные сопротивления проводников с большими величинами сопротивлений, увлажнение в местах нарушения изоляции и другие. Неустойчивые дефекты могут самоустраняться, оставаться неустойчивыми или переходить при определенных условиях в устойчивые. Сопротивление в месте неустойчивого дефекта может изменяться как с течением времени, так и под воздействием различных дестабилизирующих факторов (напряжения, тока, температуры и др.).

Устойчивость дефекта может быть определена посредством измерения сопротивления изоляции (СИ) и "прозвонки" дефектного кабеля при отсутствии или наличии дестабилизирующих факторов.

Для поиска и локализации дефектов в МУ применяются:

- локационные и мостовые дистанционные методы при измерениях с одного конца кабеля;
- трассовые (топографические) методы при измерениях вдоль кабельных линий.

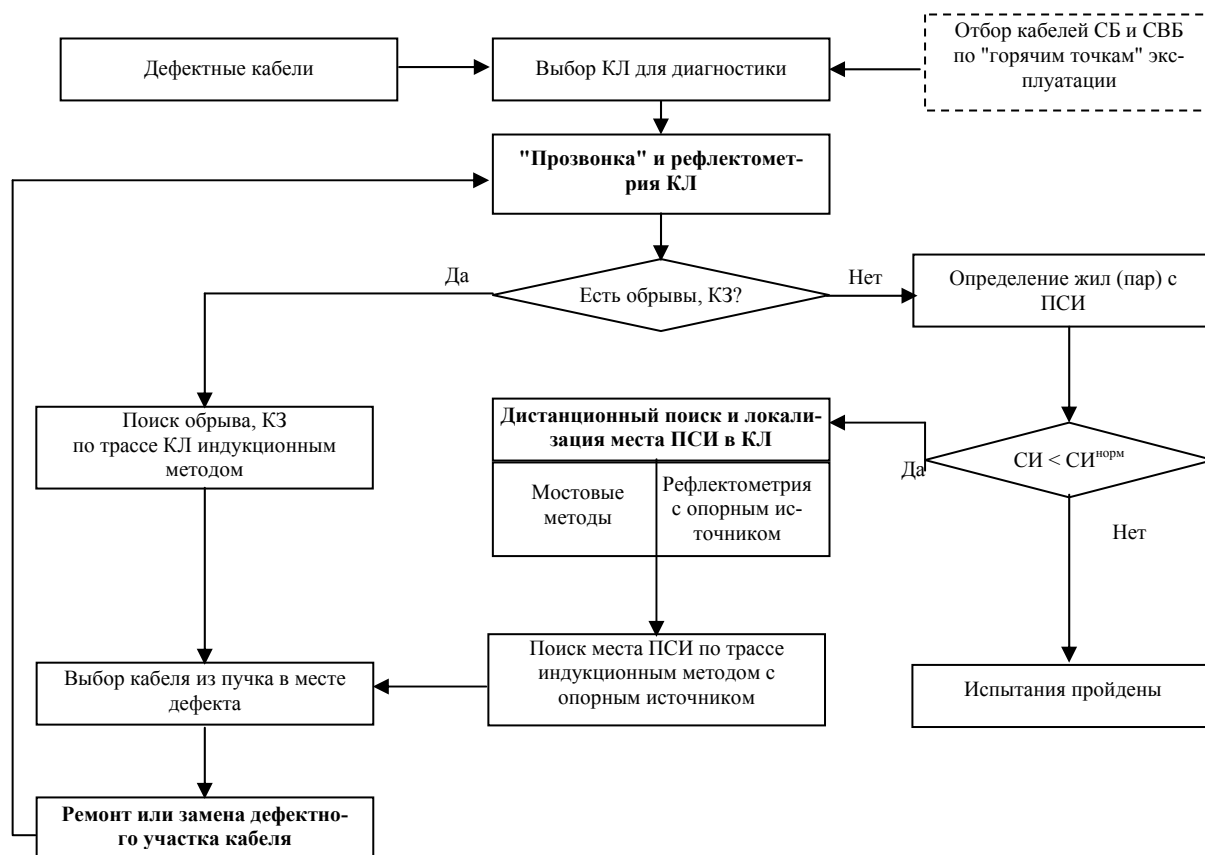


Рис. 1. Алгоритм поиска и локализации дефектов

Работы по поиску и локализации дефектов в контрольных кабелях на энергоблоке выполняются по алгоритму, приведенному на рис.1.

Список кабелей для диагностирования формируется на основе дефектных кабелей, определенных в процессе эксплуатации. Этот список может быть расширен по решению Главного инженера АС кабелями СБ и СВБ, участки которых попадают в "горячие точки" эксплуатации. Отбор таких кабелей производится на основе РД ЭО 0322-02.

Проверка целостности КЛ проводится методами "прозвонки" и импульсной рефлектометрии [1-2] на предмет наличия простых дефектов, макронеоднородностей (соединений, присоединений, перегибов с малым радиусом, вставок, других явных неоднородностей) и определения фактической длины кабеля.

Реализация метода импульсной рефлектометрии сводится к выполнению следующих операций: посылке в кабель (двухпроводную линию) импульсов напряжения; прием импульсов, отраженных от дефектов и неоднородностей волнового сопротивления; выделение отражений от дефектов на фоне помех (случайных и отражений от неоднородностей линий); определение расстояния до дефекта по временной задержке отраженного импульса относительно зондирующего.

Для работы необходимо использовать современные портативные цифровые рефлектометры, т.к. точность результатов, достоверность выводов и затраченное на диагностику время в существенной степени зависят от набора дополнительных функций, большая часть которых появилась недавно, и качества их реализации. Последние модели рефлектометров построены на основе цифровой обработки сигнала и обладают

высокой чувствительностью (до 90 дБ), разрешающей способностью (до 2 см) и дальностью действия (до 30 км).

Наибольшая эффективность при нахождении дефектов достигается совместным использованием приборов дистанционного типа (рефлектометров, мостовых приборов и др.) и трассовых приборов. При этом сначала прибором дистанционного типа определяют зону нахождения дефекта, а затем трассовым прибором в этой зоне находят КЛ и определяют точное местонахождение дефекта.

Наиболее высокую точность (1-3 м) нахождения дефекта по трассе КЛ дает индукционный метод, основанный на улавливании электромагнитного поля над кабелем, созданного специальным генератором, работающем на одной или нескольких частотах в диапазоне 200 Гц - 10 кГц. Этим же методом можно определить или уточнить трассу кабеля, определить нужный кабель в пучке кабелей, глубину заложения кабельной трассы, места расположения муфт и т.д.

В то же время индукционный метод обладает рядом недостатков:

- требует низкого переходного сопротивления между жилами в месте замыкания (до 100 Ом);
- трудно применим при замыкании жил на землю, поскольку сигнал генератора при прохождении по заземленным конструкциям искажает истинную картину распределения электромагнитного поля (наведенный сигнал "разносится" практически по всем заземленным частям);
- сигнал от генератора может вызвать срабатывание низковольтных устройств (РЗА, технологических защит и т.п.), КЛ которых проходят параллельно трассе КЛ, на которую подается сигнал.

Если в процессе проверки целостности КЛ простых дефектов (обрывов, КЗ) не обнаружено, то, согласно рис.1, переходят к поиску высокоомных дефектов, т.е. мест с пониженным сопротивлением изоляции (ПСИ), методом "прозвонки" мегомметром напряжением до 1000 В. Измерительное напряжение на мегомметре устанавливается в пределах 300 – 1000 В (в зависимости от типа изоляции и ее толщины) с целью обеспечения величины напряженности электрического поля в 500 В/мм [3]. Если толщина изоляции неизвестна, то ее можно взять из [4] исходя из марки кабеля. Если предельное значение сопротивления изоляции для исследуемого кабеля по каким-либо причинам неизвестно, то его можно взять из [4] исходя из типа изоляции.

После нахождения дефектной жилы (пары) с ПСИ встает задача отыскания дефекта по трассе КЛ. Точно указать место дефекта на трассе по результатам замеров дистанционными методами возможно только при укладке кабеля в коробах, лотках, на полках и т. д. и при наличии точной разметки трассы, а также по дополнительным признакам (наличию видимого обрыва, пережатию, нарушению защитного покрова или брони, следам от пробоя или выгорания участка кабеля, увлажнению и т.п.).

Для повышения надежности и точности рекомендуется проводить дистанционный поиск с обоих концов КЛ, особенно когда имеется несколько дефектов.

Мостовые методы изначально разрабатывались для поиска дефектов в кабелях связи. Суть этих методов состоит в сравнении методом моста условно исправной и неисправной жил симметричного кабеля по их активному сопротивлению, емкости.

На практике в условиях АС используются многожильные контрольные кабели и, как правило, по одной трассе проложено несколько однотипных кабелей. Поэтому практически всегда схему измерений можно частично симметризовать, используя в качестве исправной жилы исправные жилы дефектного кабеля либо соседнего, а в качестве оболочки (экрана) - оставшиеся параллельно соединенные жилы.

Мостовым методом можно определить место ПСИ с переходным сопротивлением от 0 до 20 МОм. При этом с ростом значения переходного сопротивления точность определения падает. Кроме этого точность также зависит от типа кабеля - для симмет-

ричных кабелей она естественно выше. Погрешность определения расстояния до дефекта с ПСИ может составлять от 0,2 % и выше.

Одним из недостатков мостовых методов является то, что при наличии нескольких дефектов сложно получить точный результат, т.е. все приборы такого типа работают на один дефект. Несколько дефектов - только НИЗКООМНЫХ – можно обнаружить импульсным методом. Кроме этого, метод импульсной рефлектометрии является более точным, удобным, наглядным и привлекательным. Он применим для любых кабелей, и позволяет находить и распознавать различные дефекты: обрывы, короткие замыкания, соединения, присоединения, перегибы с малым радиусом, увлажнения и т.д.

Для перевода высокоомного дефекта в низкоомный рекомендуется использовать источник постоянного напряжения с регулируемым ограничением тока. Рефлектометр подключается к кабелю через разделительную емкость. При подаче на кабель и постепенном увеличении напряжения от источника в месте высокоомного дефекта возникает проводящий канал, по которому начинает протекать ток, ограничиваемый заданным значением. При этом напряжение уменьшается до нескольких вольт. С помощью регулировки ток увеличивают и посылают импульс от рефлектометра, и смотрят отражение уже от низкоомного дефекта.

В качестве примера, можно привести результаты моделирования в лабораторных условиях высокоомного дефекта. Жила кабеля совместно с ее экраном сдавливалась тисками до тех пор, пока сопротивление изоляции не стало равным 0 при 250 В. В режиме тестера (10 В) оно составляло более 200 МОм. Затем подавалось опорное напряжение от стабилизированного источника с ограничением тока и одновременно через разделительную емкость снималась рефлектограмма кабеля. При повышении напряжения произошел пробой кабеля в месте локального сжатия и напряжение упало до десятка вольт. Рефлектометром при этом пробоем не фиксировался. После повышения тока пробоем был зафиксирован, см. рис.2. После снятия с кабеля напряжения сопротивление в месте пробоя осталось конечным, и рефлектометром дефект не фиксировался.

Приборы трассового поиска позволяют определить трассу, глубину залегания и точное местонахождение дефекта КЛ, если это простой дефект.

Для нахождения места ПСИ индукционным методом необходимо перевести высокоомный дефект в низкоомный с СИ до 100 Ом. В этих целях можно воспользоваться выше описанным приемом.

При выборе кабеля из пучка в месте расположения дефекта используют приемник из трассопоискового комплекта. Приемник может быть как индукционного типа, так и емкостного.

Осмотрев поврежденный кабель в месте нахождения дефекта, служба ремонта производит его ремонт или заменяет поврежденный участок. Об этом делается запись в кабельном журнале. После этого, в соответствии с приведенной схемой, диагностика КЛ повторяется до полного выявления всех имеющихся дефектов.

Разработанные МУ успешно применены при диагностировании КЛ Балаковской (блоки 1, 3, 4) и Смоленской АС (блок 2) во время проведения ППР.

На первом блоке продиагностировано 30 КЛ в системах 1-го и 2-го комплекта АЗ, а также ПЗ. Примерно у половины КЛ по результатам рефлектометрии имелись соединения в виде клипс, что было подтверждено разделкой ОЗС и муфты одного из кабелей в коробе. У кабеля из первого комплекта АЗ обнаружен и локализован дефект в виде ПСИ.

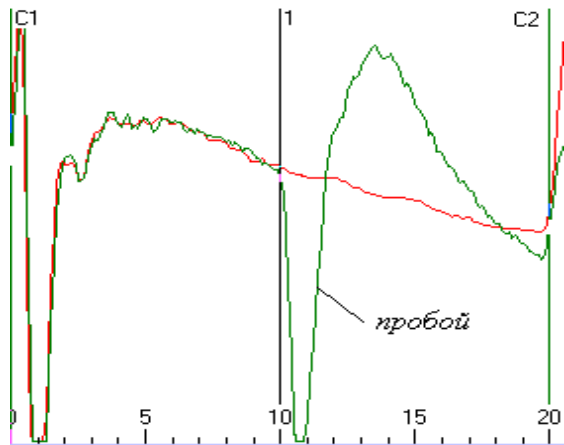


Рис.2. Рефлектограммы (жила-экран) без пробоя и с регулируемым пробоем от внешнего источника

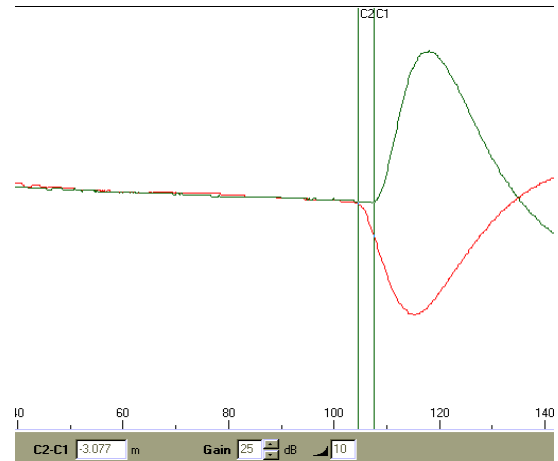


Рис.3 Рефлектограммы (жила-экран) исправной и неисправной (замыкание) жил кабеля датчика вибрации подшипника турбины

На третьем блоке продиагностировано 67 КЛ различных систем: САОЗ, спринклерной, СВРК, пожаротушения, контроля вибрации подшипников турбины, ротора ТГ, ТПН. Обнаружены как простые, так и сложные дефекты. Например:

- у некоторых КЛ каналов нейтронных измерений СВРК сопротивление изоляции между экранами пар жил и общим экраном оказалось пониженным в пределах от 1 Ом (режим тестера) до 10 МОм (500 В), тогда как в нормальном состоянии оно превышает 200 МОм. Рефлектометрия пары с низшим сопротивлением показала на то, что место понижения находится в гермопроходке. Это подтвердилось также диагностикой других КЛ мостовым методом; на рис. 3 приведены рефлектограммы исправной (сигнал идет вверх) и неисправной (замыкание жилы с экраном) жил кабеля КУГВЭВнг 7х0.5 датчика вертикальной вибрации первого подшипника турбины. Причиной замыкания стало старение изоляции кабеля из-за повышенной температуры и как следствие ее растрескивание при манипуляциях с кабелем во время проведения ППР. Это подтверждается результатами измерений по микросрезам концентрации пластификатора в оболочке кабеля на разных расстояниях от турбины. Она оказалась ниже или равной критической концентрации - 15%. Трасса кабеля проходит сначала вдоль турбины. Этот участок составляет 3-4 метра. Потом кабель отходит от нее и тепловое воздействие на него уменьшается. Это и подтверждается рефлектограммами. На четвертом блоке объектами диагностики были 38 КЛ системы регулирования питания парогенераторов и системы питания блоков электромагнитных приводов СУЗ. У половины КЛ на разных расстояниях от сборок обнаружены соединения в виде клипс, клипс + пайка, промклемников. У одного кабеля питания основных клапанов сопротивление изоляции между парой рабочих жил, измеренное мегомметром при 500 В, было нулевое, а в режиме тестера (5 В) – 140 Ом. С помощью рефлектометра дефект дистанционно локализован. Трассовым прибором кабель был найден в пучке и локализовано место дефекта. Оно оказалось вблизи паропровода, причем кабель касался паропровода.

На втором блоке Смоленской АС проводилось диагностирование неразрушающими методами КЛ систем релейной защиты и автоматики с особо сложными дефектами (ПСИ около 1МОм) из числа дефектных КЛ, выявленных персоналом электроцеха при эксплуатации. Дефекты были локализованы.

Таким образом, разработанные МУ показали свою эффективность при осуществлении поиска и локализации дефектов КЛ на АС неразрушающими методами.

#### **Список литературы**

1. Бакланов И.Г. Методы измерений в системах связи. – М.: Изд-во «ЭКО-Трендз», 1999, 195 с.
2. Бакланов И.Г. Рефлектометры для медных кабелей. Сети и системы связи, №11, 1997.
3. Д.М. Казарновский, Б.М. Тареев. Испытание электроизоляционных материалов, Л., "Энергия", 1969г.
4. ГОСТ 26411-85. КАБЕЛИ КОНТРОЛЬНЫЕ. Общие технические условия