

# МАГНИТНАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ ПРОВОДОВ И ГРОЗОТРОСОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ: ТЕХНОЛОГИЯ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ, ПРОБЛЕМЫ

ВОЛОХОВСКИЙ В.Ю., ВОРОНЦОВ А.Н., СУХОРИКОВ Д.В., ЦУКАНОВ В.В., ООО «ИНТРОН ПЛЮС» (Москва)

АРТЕМЬЕВ М.С., ЧЕРНЕЦОВ В.В., ОАО «Ленэнерго» (Санкт-Петербург)

Многие воздушные линии электропередачи (ВЛ) напряжением 35–750 кВ были построены в РФ в 60–70-х годах прошлого века, а сроки их эксплуатации превышают нормативные и составляют 40–50 и более лет. Проблема продления ресурса и обеспечение надежной и безаварийной работы этих линий является весьма актуальной. Инструментальный контроль технического состояния (ТС) проводов и грозотросов, а также других элементов оборудования ВЛ и подстанций – эффективное звено мероприятий, проводимых сетевыми компаниями с целью повышения эксплуатационной готовности ВЛ.

Метеовоздействия и эксплуатационные нагрузки оказывают большое влияние на ТС проводов/грозотросов ВЛ, а также на их расстояния до земли и пересекаемых объектов (ВЛ меньшего класса напряжений, сооружений, коммуникаций и т.п.). Это влияние выражается в таких факторах, как:

- появление значительных остаточных деформаций от ветровой и ледовой нагрузки;
- появление местных усталостных повреждений, вызываемых вибрацией или «пляской» проводов;
- деградация механических свойств проволок алюминиевого повива проводов от длительного нагрева токами высокой эксплуатационной нагрузки или короткого замыкания (в чрезвычайной ситуации);
- потеря площади поперечного сечения стального сердечника биметаллических проводов (типа АС и т.п.) из-за фрикционного и/или коррозионного износа.

Благодаря развитию инструментальных средств неразрушающего контроля (НК) объектов линейного оборудования ВЛ в работе эксплуатационных подразделений сетевых компаний все шире стали использоваться такие методы технической диагностики как ультра-

звуковой и тепловизионный контроль, магнитная дефектоскопия и т.п. [1]. Лазерная аэрофотосъемка линий электропередачи позволяет определить пролеты ВЛ, в которых расстояния от проводов/грозотросов до земли или пересекаемых объектов не отвечают требованиям нормативных документов. Перетяжка проводов/грозотросов – один из самых разумных способов устранения неприемлемых габаритов проводов ВЛ и приведения их в соответствие с нормативными документами. Уровень допустимой нагрузки для осуществления операций перетяжки определяется остаточной прочностью. Прочность проводов/грозотросов линий с большим сроком эксплуатации, при наличии данных об актуальных значениях механических характеристик их материалов, может быть оценена расчетным путем на основе результатов дефектоскопии с помощью подходящих инструментальных средств.

В период с 2010 года по настоящее время специалисты ООО «ИНТРОН ПЛЮС» по заказам российских и зарубежных электросетевых компаний методом магнитной дефектоскопии выполнили контроль ТС проводов и грозотросов более чем на 150 ВЛ напряжением 35–220 кВ. В ряде случаев контроль

позволил диагностировать наличие дефектов типа обрыва проволок и значительной потери сечения грозотросов и сердечников проводов. Ниже приводятся результаты выполненной магнитной дефектоскопии и диагностики ТС проводов/грозотросов ВЛ, в том числе и расчетной оценки остаточной несущей способности (прочности) объектов контроля, которые должны быть учтены при разработке проектов реконструкции и ремонтно-восстановительных мероприятий на проконтролированных ВЛ.

## МЕТОДЫ, АППАРАТУРА И ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ ПО МАГНИТНОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ ПРОВОДОВ И ГРОЗОТРОСОВ ВЛ

Для диагностики текущего ТС проводов (ГОСТ 839-80Е) и стальных грозотросов ВЛ используют как визуальный контроль (осмотр), так и инструментальные методы НК [1]. Последствия фрикционного износа, коррозии внутренних проволок и прядей грозотроса или стального сердечника провода (типа АС и т.п.) не могут быть обнаружены при осмотре. В то же время, такие дефекты приводят к потере сечения по металлу провода или грозотроса – важнейшей



а)

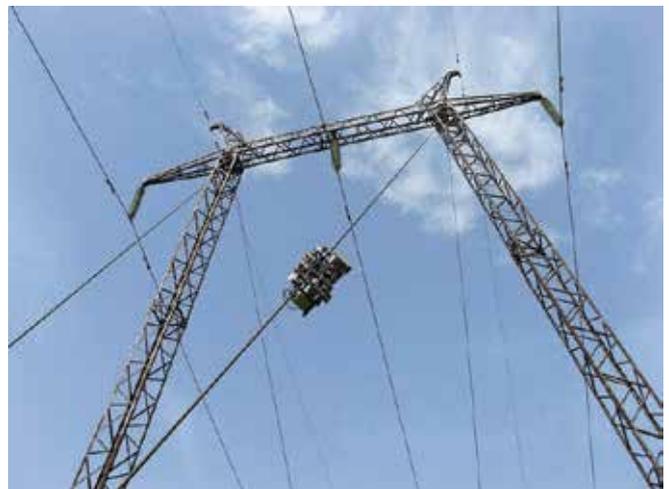


б)

**Рис. 1.** Диагностики проводов и грозотроса в пролете ВЛ 35 кВ. а) монтаж дефектоскопа; б) перемещение измерительной головки вдоль провода



а)



б)

**Рис. 2.** Использование самоходного устройства при диагностике оборудования ВЛ. а) дефектоскопия проводов; б) контроль оттяжек опоры

характеристике, определяющей его остаточную прочность. Потеря сечения по металлу (ПС) используется в нормативных документах как один из базовых критериев браковки, наряду с количеством обрывов проволок на шаге свивки провода или троса.

В отечественной и зарубежной практике диагностики ТС биметаллических (сталеалюминиевых или сталебронзовых) проводов, грозотросов и оттяжек опор ВЛ все чаще применяется магнитная дефектоскопия, физические основы которой хорошо известны [2, 3]. Метод переменного магнитного поля эффективен только для измерения ПС ферромагнитного металла объектов контроля. Метод постоянного магнитного поля используют как для измерения ПС сечения проводов/тросов, так и для обнаружения локальных дефектов (ЛД) типа обрыва проволок и т.п. Независимо от реализуемого метода и конструкции большинство видов магнитных дефектоскопов имеют два канала регистрации дефектов – каналы ПС и ЛД. Компания ООО «ИНТРОН ПЛЮС», а также ряд других отечественных и зарубежных организаций, при диагностике ТС грозотросов и сердечника АС проводов используют магнитный дефектоскоп ИНТРОС (Патент RU № 2204128) [4].

Контроль ТС проводов и грозотросов с использованием дефектоскопов ИНТРОС выполняется без опускания их на землю, но со снятием напряжения ВЛ. Работоспособность дефектоскопа ИНТРОС сохраняется как при рабочем, так и при наведенном напряжении. Отключение же ВЛ производится для повышения безопасности проведения монтажа/демонтажа диагностического оборудования на контролируемом объекте. Работы на высоте подвески провода/грозотроса выполняются с применением необходимых технических средств (подъемник, монтажная тележка и т.п.).

Для записи дефектограмм ПС и ЛД измерительную головку ИНТРОСа нужно переместить вдоль доступного участка провода, грозотроса или оттяжки опоры (перетянуть при помощи прикрепленного к ней капронового каната или дистанционно управляемого самоходного устройства). Рис. 1 иллюстрирует процесс диагностики проводов/грозотроса в пролете ВЛ 35 кВ.

В случае необходимости (например, при контроле спецпересечений, переходов ВЛ через реки и т.п.) используют специально спроектированное автономное дистанционно управляемое самоходное устройство (рис. 2).

В случае необходимости (например, при контроле спецпересечений, переходов ВЛ через реки и т.п.) используют специально спроектированное автономное дистанционно управляемое самоходное устройство (рис. 2).

В случае необходимости (например, при контроле спецпересечений, переходов ВЛ через реки и т.п.) используют специально спроектированное автономное дистанционно управляемое самоходное устройство (рис. 2).

В случае необходимости (например, при контроле спецпересечений, переходов ВЛ через реки и т.п.) используют специально спроектированное автономное дистанционно управляемое самоходное устройство (рис. 2).

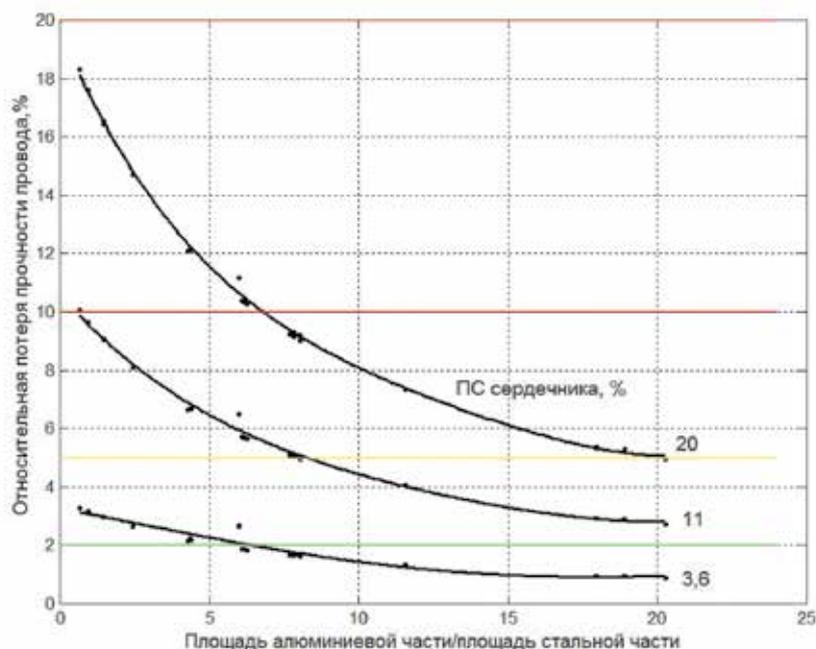


Рис. 3. Области состояний сталеалюминиевых проводов (ГОСТ 839-80Е)

### КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРОВОДОВ И ГРОЗОТРОСОВ ВЛ ПО ДАННЫМ МАГНИТНОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ

Классификация текущего ТС проводов и грозотросов производится в соответствии с нормативными документами. Ниже приведены критерии оценки ТС проводов типа АС и стальных грозотросов на основе данных НК методом магнитной дефектоскопии, которые используются при освидетельствовании ВЛ:

- «нормальное» состояние – ПС не более 3,6 %;
- «рабочее» состояние – ПС от 3,6 % до 11 %;
- «ухудшенное» состояние – ПС от 11 % до 20 %;
- «предавварийное» состояние – ПС более 20 %, а также наличие обрывов проволок троса или сердечника провода.

Допустимое количество ЛД типа обрывов проволок сердечника провода или грозотроса зависит от их конструкции.

Исходя из критериев оценки ТС проводов и грозозащитных тросов ВЛ по данным магнитной дефектоскопии обследованного провода или грозотроса рекомендуется назначать следующие сроки проведения очередной диагностики: «Нормальное» и «Рабочее» состояния – через 6 лет после предыдущей дефектоскопии; «Ухудшенное» состояние – через 3 года после предыдущей дефектоскопии.

### МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОТЕРИ ПРОЧНОСТИ ПРОВОДОВ И ГРОЗОТРОСОВ ВЛ ПО ДАННЫМ МАГНИТНОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ

Расчет потери прочности проводов и грозотросов ВЛ – важная составная часть общей проблемы анализа их технического состояния в процессе эксплуатации. Диагностическая информация, получаемая методом магнитной дефектоскопии, сама по себе не позволяет судить об изменении несущей способности проводов и грозотросов с инженерной точки зрения. Однако диагностические параметры, такие как величина потери сечения и/или данные об обрывах проволок, могут быть использованы в качестве входных параметрами механических моделей провода или грозотроса. Такой подход к использованию результатов магнитной дефектоскопии позволяет методами механики конструкций определить ряд прочностных показателей, по которым можно делать выводы о ТС обследованных объектов.

Традиционные методы прочностного расчета токонесущих АС проводов как биметаллических конструкций разработаны достаточно подробно [5]. При этом провод рассматривается в виде набора независимо работающих прямолинейных проволок стального сердечника и проволок алюминиевого повива, то есть все результаты получаются в «стержне-

вом» приближении. На основании подобных оценок сформулированы и требования к прочности проводов в ПУЭ [5] и других нормативных документах.

Для более точных прочностных расчетов грозотросы и биметаллические провода следует рассматривать как спиральные канаты, то есть как механические системы, состоящие из разнородных упругих винтовых элементов, которые деформируются совместно вдоль оси провода/грозотроса [6]. Потерю прочности рабочего провода/грозотроса естественно трактовать как снижение его запаса прочности вследствие накопления дефектов по сравнению с начальным (бездефектным) состоянием. Коэффициент запаса является параметром состояния провода/грозотроса при текущей нагрузке. Когда его значение становится близким к минимально допустимому уровню, это означает необходимость принятия надлежащих мер для продолжения безопасной эксплуатации ВЛ.

Последовательность операций прочностного расчета грозотроса по модели спирального каната сводится к следующим шагам. Рассчитываются показатели прочности для трех вариантов: нового грозотроса без дефектов, грозотроса с заданными потерей сечения и с локальными дефектами (обрывами проволок). Карты дефектности ПС и ЛД грозотроса формируются по данным диагностики, полученным дефектоскопом ИНТРОС. В каждом случае сначала вычисляются деформации грозотроса, деформации и напряжения растяжения, изгиба и кручения в проволоках. Затем определяются максимальные эквивалентные напряжения  $\max \sigma_{\text{эKB}}$  в наиболее напряженной проволоке по подходящему критерию прочности и коэффициент запаса прочности:

$$n = \frac{\sigma_B}{\max \sigma_{\text{эKB}}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_B$  – предел прочности материала проволок на растяжение. Относительными показателями снижения прочности сечения грозотроса, ослабленного, с одной стороны, потерей площади по металлу  $\Delta F$ , а с другой – обрывами проволок числом  $A$ , являются параметры:

$$\chi_{\Delta F} = 1 - \frac{n_{\Delta F}}{n_0}, \quad \chi_A = 1 - \frac{n_A}{n_0}; \quad (2)$$

где  $n_{\Delta F}$  и  $n_A$  – коэффициенты запаса прочности грозотроса с дефектами,

$n_0$  – коэффициент запаса прочности неповрежденного (нового) грозотроса. Показатели снижения прочности  $\chi_{\Delta F}$  и  $\chi_A$  определяются независимо. Результирующая потеря прочности  $\chi$  в любом сечении грозотроса оценивается как суперпозиция потерь:

$$\chi = \chi_{\Delta F} + \chi_A. \quad (3)$$

Фактический коэффициент запаса остаточной прочности  $\tilde{n}$  грозотроса с дефектами определяется по формуле:

$$\tilde{n} = n_0(1 - \max \chi), \quad (4)$$

где  $\max \chi$  – есть максимальная потеря прочности в некотором сечении грозотроса на контролируемом участке.

Прочностной расчет биметаллических проводов типа АС или БС производится по той же схеме, что и для грозотросов, с оценкой параметров напряженного состояния методами, принятыми для комбинированных конструкций.

Запас прочности  $\tilde{n}$  элемента ВЛ должен оставаться выше минимально допустимого уровня  $n_*$  на протяжении всего срока эксплуатации  $\tilde{n} \geq n_*$ . В ПУЭ-7 [5] ставится требование, чтобы напряжения в проводе не превышали допустимого значения  $[\sigma]$ , которое назначается в зависимости от типа и марки провода и характерных условий эксплуатации. Для проводов АС и «среднегодовой температуры» принимается  $[\sigma] = 0,3\sigma_B$ . В механике конструкций подобное соотношение записывают в виде  $[\sigma] = \sigma_B/[n]$ , где параметр  $[n]$  имеет смысл нормативного коэффициента запаса прочности. Тяжение нового провода назначается из условия  $n_0 \geq [n] = 3,3$ . Для грозотроса, по сути – спирального каната, роль нормативного показателя  $[n]$  играет так называемый «коэффициент использования» [7].

Прочностные показатели  $\tilde{n}$  и  $\chi$  предлагается использовать при оценке текущего режима работы провода/грозотроса с дефектами. Соответствие диагностического параметра «Потеря сечения сердечника» вышеприведенным критериям оценки ТС проводов типа АС проиллюстрировано на рис. 3. Предельно допустимый коэффициент запаса прочности провода /грозотроса с повреждениями (запас живучести)  $n_*$  соответствует допустимым нормам дефектности в элементе ВЛ на границе зон «Ухудшенное состояние» и «Предварийное состояние». Например,

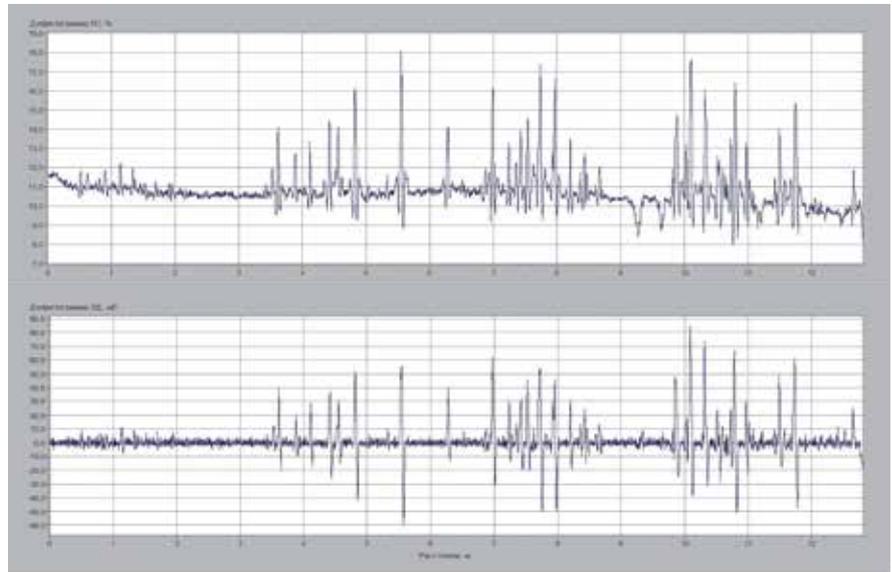


Рис. 4. Дефектограммы потери сечения и локальных дефектов сталебронзового провода БС 185/43

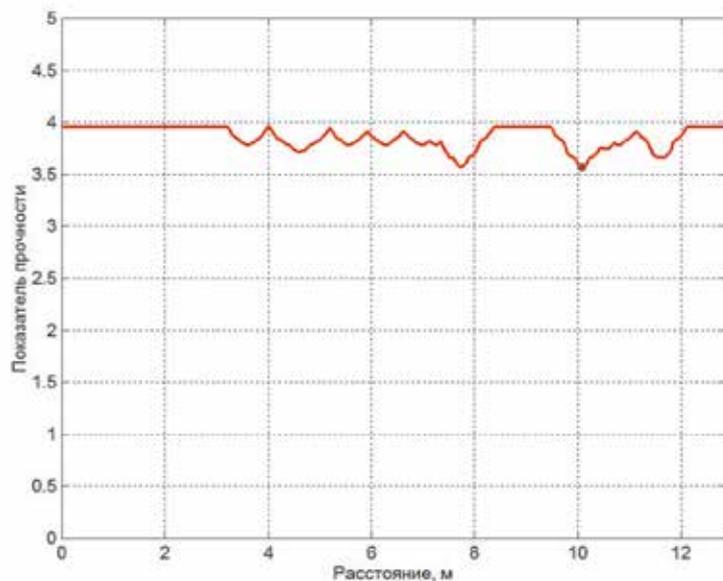


Рис. 5. Распределение показателя прочности по длине участка провода БС 185/43

для проводов АС с отношением площадей сечений алюминиевой и стальной части, равной 7,71 и ПС сердечника 20 %, относительная потеря прочности провода  $\chi$  составляет около 10 % и, следовательно,  $n_*$  можно принять равным  $n_* = [n](1 - \chi) = 3,3(1 - 0,10) = 2,97$  или, с некоторым риском, даже 2,5.

В качестве примера приведем результаты расчета остаточной прочности сталебронзового провода БС 185/43, который был обследован 25.12.2013 на ВЛ 35 кВ «Ладожская-3». Дефектограммы потери сечения и локальных дефектов в сердечнике приведены на рис. 4.

На рис. 5 показано соответствующее распределение показателя прочности вдоль отрезка провода, полученное расчетным путем. Здесь под термином «показатель прочности» понимается величина, аналогичная параметру (4), которая вычисляется в каждом сечении каната при переменной по его длине потере прочности  $\chi$ . Номинальное натяжение провода принято равным 30 кН. Красный кружок отмечает минимальное значение 3,57 на отметке 10,1 м. Этот минимум можно считать фактическим коэффициентом запаса прочности провода  $\tilde{n}$  на рассмотренном участке. Про-

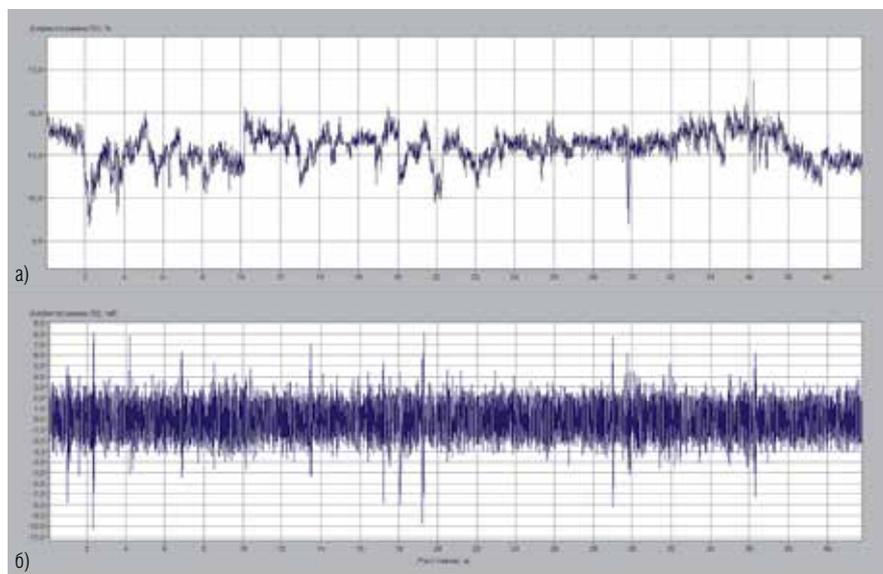


Рис. 6. Дефектограммы ПС (а) и ЛД (б) сердечника правого нижнего провода в пролете между опорами №32-ГЭС10 на ВЛ «Северная-10»

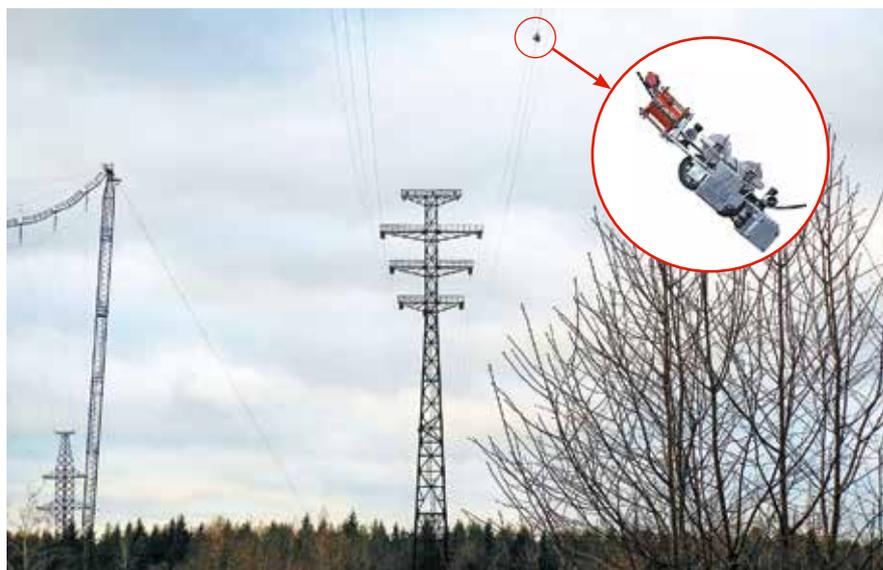


Рис. 7. Диагностика проводов ВЛ 35 кВ «Ладожская-3/4»

валы на графике соответствуют скоплению локальных обрывов проволок стального сердечника. Заметим, что механическая модель провода учитывает способность оборванных проволок воспринимать натяжение при удалении от места обрыва благодаря трению. Общее снижение запаса прочности относительно начального значения  $n_0 = 4,23$  обусловлено влиянием распределенной потери сечения вследствие коррозии, абразивного износа и других факторов.

Отметим некоторые проблемы и общие особенности результатов расчетной оценки остаточной прочности проводов и грозотросов с дефектами:

- расчетная оценка несущей способности проводов и грозотросов должна проводиться с учетом изменения прочностных характеристик соответствующих конструкционных материалов в процессе длительной эксплуатации [8]. К сожалению, нет достоверных и систематизированных данных, касающихся длительной прочности биметаллических проводов. Актуальность исследований не вызывает сомнения;
- потеря прочности биметаллических проводов оказывается меньше значения ПС сердечника, так как часть нагрузки дополнительно воспринимается

ется токопроводящим повивом (алюминиевым или бронзовым);

- расчет провода или грозотроса по модели спирального каната, в отличие от «стержневого приближения», учитывает неравномерное распределение напряжений по проволокам, которое обусловлено растяжением, изгибом и кручением проволок. Он дает большую потерю прочности, чем расчет по предельным нагрузкам в «стержневом приближении». По той же причине потеря прочности грозотросов в процентном отношении выше, чем соответствующая потеря несущего сечения по металлу;
- коэффициент запаса прочности снижается заметнее для проводов с более сложной конструкцией сердечника (при сопоставимом тяжении). Чем сложнее конструкция сердечника, тем сильнее разнятся запасы прочности новых проводов и проводов с дефектами при одинаковом уровне дефектности.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРОВОДОВ И ГРОЗОТРОСОВ МЕТОДОМ МАГНИТНОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ

Начиная с 2011 года специалисты «ИНТРОН ПЛЮС» принимают участие в работе комиссий ОАО «Ленэнерго» при технических освидетельствованиях ВЛ 35–110 кВ в филиалах ОАО «Ленэнерго». В рамках этих работ магнитная дефектоскопия проводов и грозотросов производилась на 23-х ВЛ с большим сроком эксплуатации. Особое внимание было уделено переходам ВЛ через водные преграды.

В ряде случаев были диагностированы эксплуатационные дефекты грозотросов и сердечников токонесущих проводов. Так, на ВЛ 110 кВ «Северная-10» на переходе через р. Вуокса по всей длине грозотроса (СТ 50) был обнаружен значительный коррозионный износ, обрывов же проволок не обнаружено. Максимальное значение ПС=14,6 %, а относительная потеря прочности  $\chi = 15,33$  %. Техническое состояние грозотроса диагностировано как «Ухудшенное», но грозотрос пригоден к дальнейшей эксплуатации. На фазных проводах (АС-120/19) этой ВЛ, по всей обследованной длине, также был обнаружен значительный коррозионный износ сердечников. Обрывов проволок сердечников не обнаружено. ТС проводов диагностировано как

«Ухудшенное», но провода пригодны к дальнейшей эксплуатации. Очередной контроль ТС проводов и грозотросов этой ВЛ рекомендовано провести в 2016 году. В качестве примера, на рис. 10 приведены дефектограммы ПС и ЛД сердечника нижнего правого фазного провода. Максимальное значение ПС=12,8 % на отметке 36,2 метра, а расчетная относительная потеря прочности не менее  $\chi = 6,41\%$ .

Более тревожными являются результаты контроля ТС проводов ВЛ 35 кВ «Ладожская-3/4» (рис. 11), который был выполнен в декабре 2013 года.

В пролете между опорами № 42–43 (на переходе через р. Нева) применены сталебронзовые провода БС-185 (диаметр провода 19,6 мм, диаметр стального сердечника 8,4 мм) срок эксплуатации которых составляет 56 лет. При дефектоскопии проводов по всей длине обследованных участков обнаружена значительная, вызванная коррозией, величина ПС сердечников, а также многочисленные обрывы их проволок. Результаты дефектоскопии проводов и расчетная величина потери прочности приведены в таблице 1. ТС проводов ВЛ «Ладожская-3/4» на переходе через р. Нева диагностировано как «Предаварийное».

Общие результаты выборочного контроля ТС проводов и грозотросов на 23-х ВЛ 35–110кВ в филиалах ОАО «Ленэнерго», выполненного в 2013 г. с использованием метода магнитной дефектоскопии отражены диаграммой, приведенной на рис. 8.

Полученные результаты работ в ряде случаев сигнализируют о предаварийном состоянии проводов/грозотросов, а в других – позволяют продлить срок безопасной эксплуатации, что экономит многомиллионные затраты на их замену.

**ВЫВОДЫ**

1. Магнитная дефектоскопия – эффективный метод неразрушающего контроля и диагностики технического состояния



Рис. 8. Результаты диагностики проводов/грозотросов на ВЛ 35–110 кВ, проконтролированных в филиалах ОАО «Ленэнерго» в 2011–2013 гг.

биметаллических (сталеалюминиевых) неизолированных проводов и стальных грозотросов. Она находит все более широкое применение в практике обследований ВЛ напряжением 35–500 кВ, проводимых с целью оценки технического состояния линейного оборудования.

2. Необходимость применения магнитной дефектоскопии при диагностике технического состояния линейного оборудования ВЛ должна быть отражена в нормативно-технических документах, регламентирующих порядок проведения и очередность контрольно-диагностических работ на линиях.

3. Параметр состояния провода/грозотроса – коэффициент запаса остаточной прочности, рассчитанный по данным дефектоскопии, позволяет придать результатам неразрушающего контроля привычный инженерный смысл. Этот показатель может служить дополнительным аргументом при принятии эксплуатационным персоналом соответствующих решений, что может сократить многомиллионные расходы на ремонтно-восстановительные работы или замену проводов и грозотросов.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. V. Volokhovskiy, A. Vorontsov, D. Sukhorukov, B. Mekhanoshin, V. Shkaptsov. «Assessment of OHL Availability and Residual Life-Time by Using Non Destructive Instrumental Control for Conductors, Steel Wires and Guys». (CIGRE Session 2010, B2-309) <http://www.cigre.org/gb/Events/session.asp>
2. КОНТРОЛЬ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ. Классификация видов и методов. ГОСТ 18353-79. – 40 с.
3. Методические указания по магнитной дефектоскопии стальных канатов. Основные положения. Котельников В.С., Сухоруков В.В., Короткий А.А. и др. РД-03-348-00. М.: Гостехнадзор, 2000 г. – 18 с.
4. Сухоруков В.В. Неразрушающий контроль стальных канатов: новые приборы. Контроль. Диагностика, №1, 1999.
5. Правила устройства электроустановок. 7-е издание. П68 Стереотипное переиздание. – СПб.: Издательство ДЕАН, 2008. – 704 с.
6. Кессельман Л.М. Основы механики воздушных линий электропередач. М.: Энергоатомиздат, 1992. – 354 с.
7. Глушко М.Ф. Стальные подъемные канаты. Одесса: Астропринт, 2013. – 336 с.
8. Петрова И.М., Гадолина И.В., Ботвина Л.Р., Демина Ю.А., Тютин М.Р. Влияние длительного старения на характеристики усталости стали 45. Западская лаборатория. Диагностика материалов, т. 77, № 1, 2011. С. 58–61.

Таблица 1. Результаты дефектоскопии проводов и расчетная величина потери прочности

№ п/п	Наименование ВЛ	Контролируемый объект (фазный провод)	Максимальная величина ПС сердечника провода, %	Относительная потеря прочности првода, (не менее %)
1.	«Ладожская-3»	Нижний	19,7	17,6
		Средний	18,1	16,1
		Верхний	20,3	21,2
2.	«Ладожская-4»	Нижний	28,4	24,4
		Средний	35,9	27,5
		Верхний	36,3	27,7