

## Магнитная дефектоскопия – эффективный инструмент мониторинга технического состояния проводов и грозотросов воздушных линий электропередачи

- **Волоховский В. Ю.**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”, Москва
- **Воронцов А. Н.**, канд. техн. наук, Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”, Москва
- **Сухоруков Д. В.**, ООО “ИНТРОН ПЛЮС”, Москва
- **Рудяк А. Р.**, ООО “ИНТРОН ПЛЮС”, Москва

Обсуждается практика проведения мониторинга (контроля) технического состояния (ТС) оборудования линий электропередачи – токонесущих проводов, грозотросов, тросовых оттяжек опор ВЛ, средствами неразрушающего контроля с использованием метода магнитной дефектоскопии. Данный метод позволяет эффективно диагностировать ТС стальных канатов (грозотросов и оттяжек опор) и стальных сердечников биметаллических неизолированных проводов. Проиллюстрированы результаты контроля ТС проводов и грозотросов на ВЛ напряжением 35 – 220 кВ в сетях филиалов ПАО “Россети”. Приведены расчётные оценки остаточной несущей способности (прочности) для проконтролированных объектов на основе данных, полученных по результатам диагностирования. Сделан вывод об эффективности применения магнитных дефектоскопов для оценки текущего ТС грозотросов, оттяжек опор ВЛ и стальных сердечников биметаллических проводов.

**Ключевые слова:** воздушные линии электропередачи, техническое состояние, мониторинг, грозотросы, биметаллические неизолированные провода, магнитная дефектоскопия, дефектограмма, потеря сечения, локальные дефекты, обрывы проволок, несущая способность, остаточный ресурс.

Сроки эксплуатации ВЛ напряжением 35 – 500 кВ, построенных в СССР в 60 – 70-х годах прошлого века, сейчас уже превышают нормативные. Поэтому проблемы, решение которых даёт возможность продолжить эксплуатацию таких ВЛ, стали актуальными. Первая проблема – определение текущего технического состояния оборудования ВЛ; вторая – обоснованное продление сверхнормативного ресурса эксплуатируемого линейного оборудования при сохранении надёжной и безаварийной работы ВЛ. Мониторинг ТС оборудования с использованием инструментальных средств неразрушающего контроля (НК) является эффективным звеном мероприятий, осуществляемых сетевыми компаниями для снижения рисков аварий и повышения эксплуатационной готовности ВЛ.

Текущее ТС грозотросов, оттяжек опор ВЛ и токонесущих проводов в значительной степени определяется уровнем нагрузок, действовавших в процессе эксплуатации. Метеовоздействия и механические нагрузки оказывают влияние на расстояния от проводов и грозотросов до земли и пересекаемых объектов (строений и сооружений, ВЛ меньшего класса напряжений и др.). Дegradaция

ТС проводов и грозотросов проявляется в развитии значительных остаточных деформаций от ветровой и ледовой нагрузок. Появляются вызываемые вибрацией местные усталостные деформации. Развиваются повреждения типа потери площади поперечного сечения грозотросов и стального сердечника биметаллических проводов (типа АС и др.) из-за коррозионного и/или фрикционного износа. Кроме того, имеет место изменение механических характеристик материала стальных грозотросов и сердечников биметаллических проводов, а также проволок их алюминиевого покрытия от длительного нагрева токами высокой эксплуатационной нагрузки или короткого замыкания (в чрезвычайной ситуации), что ведёт к снижению их прочности.

С развитием инструментальных средств неразрушающего контроля в работе эксплуатационных подразделений сетевых компаний при обследованиях ТС оборудования ВЛ всё большее применение находят такие методы диагностирования, как ультразвуковой и тепловизионный контроль, магнитная дефектоскопия и др. Лазерное аэросканирование при обследованиях ВЛ позволяет идентифицировать пролёты, в которых расстояния от проводов и грозотросов до земли или пересекае-

<sup>1</sup> Волоховский Василий Юрьевич: volovasiliij@yandex.ru

мых объектов не отвечают требованиям нормативных документов. Уровень допустимых усилий при перетяжке грозотросов/проводов – одним из способов устранения неприемлемых габаритов и приведения их в соответствие с нормами, определяется их остаточной прочностью, которая может быть оценена расчётным путём на основе данных диагностирования с использованием соответствующих инструментальных средств (магнитных дефектоскопов).

В последние годы специалисты лаборатории неразрушающего контроля (ЛНК) ООО «ИНТРОН ПЛЮС» по заказам российских и зарубежных электросетевых компаний с применением метода магнитной дефектоскопии выполнили диагностирование ТС стальных грозотросов и сердечников биметаллических (сталебронзовых и сталеалюминиевых) проводов более чем на 175 ВЛ напряжением 35 – 500 кВ. Особое внимание было уделено спецпересечениям (автостреды, ВЛ меньшего класса напряжения и др.) и переходам ВЛ через водные преграды. В ряде случаев диагностирование ТС с использованием магнитных дефектоскопов позволило выявить наличие дефектов типа обрыва проволок и значительной потери сечения грозотросов и стальных сердечников проводов по причине коррозионного износа. Проведенные по результатам мониторинга ТС ремонтно-восстановительные работы позволили избежать возникновения аварийных ситуаций.

Далее дано описание технологии мониторинга ТС стальных грозотросов и стальных сердечников проводов (типа АС и других, ГОСТ 839–80 Е) с использованием метода магнитной дефектоскопии (MFL – Magnetic Flux Leakage). Приводятся примеры данных диагностирования и результатов расчётной оценки остаточной несущей способности (прочности) проконтролированных объектов. Эти материалы были использованы при разработке проектов реконструкции и ремонтно-восстановительных мероприятий на обследованных ВЛ.

**Технология и аппаратура для магнитной дефектоскопии проводов и грозотросов ВЛ.** Для мониторинга ТС неизолированных токонесущих проводов (ГОСТ 839–80 Е) и стальных грозотросов (ГОСТ 3062–80, ГОСТ 3063–80 и др.) применяются следующие два типа НК: визуальный контроль (осмотр) и инструментальные методы. Визуальный контроль проводов и грозотросов, который предусмотрен РД 34.20.504-94 [1], позволяет обнаружить поверхностные дефекты. Фрикционный и/или коррозионный износ внутренних проволок грозотроса, а также проволок стального сердечника провода не может быть обнаружен при осмотре. В то же время такие дефекты приводят к потере сечения по металлу грозотроса или сердечника провода – важнейшей характеристике, определяющей их несущую способность.

В последние годы в работе эксплуатационных подразделений сетевых компаний для диагностирования ТС стальных грозотросов и оттяжек опор ВЛ, а также стальных сердечников проводов (типа АС, АСК, СБ и др.) стали применяться инструментальные средства магнитного НК [2 – 4].

Физические основы MFL (метода регистрации магнитных полей рассеяния, возникающих вблизи нарушений однородности намагниченного каната из ферромагнитной стали) известны [5 – 7]. Метод MFL для обнаружения и анализа дефектов сердечников биметаллических токонесущих проводов, стальных грозотросов и оттяжек опор ВЛ может быть реализован на основе использования переменного или постоянного магнитного поля. Метод переменного магнитного поля эффективен только для измерения потери сечения (ПС) по металлу ферромагнитных объектов контроля. Метод постоянного магнитного поля позволяет обнаружить как распределённые дефекты (типа ПС грозотросов или стальных сердечников биметаллических проводов), так и локальные дефекты (ЛД) в виде обрывов проволок или прядей.

Независимо от конструкции большинство современных магнитных дефектоскопов имеет несколько информационных каналов – каналы для регистрации распределённых дефектов типа потери сечения и канал ЛД. В качестве датчиков магнитных потоков рассеяния используют магниточувствительные датчики Холла и/или индуктивные катушки. При применении одновременно датчиков обоих типов информация от них обрабатывается по отдельным для каждого типа датчиков каналам и представляется в виде дефектограмм [8]. Для расшифровки дефектограмм, идентификации дефектов, определения их параметров и принятия решения о виде ТС диагностируемого объекта требуется привлечение квалифицированного персонала – аттестованных специалистов-экспертов по магнитному НК.

Контроль ТС проводов и грозотросов может быть осуществлён без опускания их на землю, но со снятием напряжения ВЛ. Отключение же ВЛ производится для повышения безопасности проведения монтажа/демонтажа диагностического оборудования (МГ – измерительная магнитная головка и ЭБ – электронный блок) на контролируемом объекте. Работоспособность магнитного дефектоскопа сохраняется как при рабочем, так и при наведённом напряжении на проводах и грозотросах.

Перед магнитной дефектоскопией грозотросов и проводов с целью проверки отсутствия препятствий перемещению вдоль них измерительной головки необходим их визуальный контроль (осмотр). Такой осмотр может быть выполнен с использованием беспилотного летательного аппарата (БПЛА) (рис. 1 [3]) или перемещающегося по проводу или грозотросу колесного устройства (рис. 2 [3]), оснащённого устройством видеофик-



**Рис. 1. Визуальный контроль состояния проводов ВЛ 35 кВ при помощи беспилотного летательного аппарата с устройством видеofиксации**

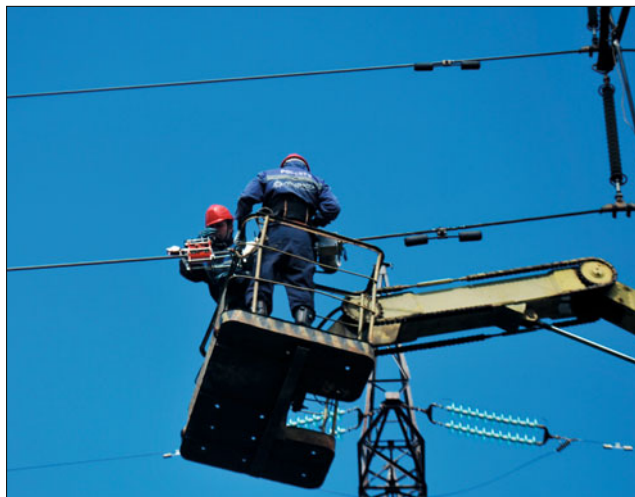
сацией и передачи информации – системой First Person View (FPV).

Работы по монтажу (рис. 3) и демонтажу диагностического оборудования (МГ и ЭБ дефектоскопа, а также систем FPV и передачи данных) на высоте подвески провода/грозотроса выполняются с применением вспомогательных средств (подъёмник, монтажная тележка и др.). Для записи дефектограмм по каналам ПС и ЛД измерительную головку дефектоскопа необходимо переместить вдоль доступного контролю участка провода или грозотроса (перетянуть при помощи прикреплённого к ней капронового каната) (рис. 4). В случае невозможности или трудности осуществления такой перетяжки (например, при контроле спецпересечений, переходов ВЛ через реки и др.) используется автономное, дистанционно управляемое, самоходное устройство (СУ) (рис. 5).

Многие российские и зарубежные лаборатории неразрушающего контроля и специализированные



**Рис. 2. Колесная система для перемещения по проводам/грозотросам устройства видеofиксации**



**Рис. 3. Монтаж дефектоскопа на провод для проведения диагностирования**

организации при выполнении работ по диагностированию ТС стальных тросов оттяжек опор ВЛ, грозотросов и сердечников биметаллических проводов используют магнитный дефектоскоп “ИНТРОС” (патент РФ – RU 2204128; патент США – US 6.492.808), который является сертифицированным средством измерений. Недавно арсенал инструментальных средств НК пополнился автоматизированными магнитными дефектоскопами [9]. В автоматизированном дефектоскопе “ИНТРОС-АВТО” функции идентификации дефектов, определения их параметров и принятия решения о категории ТС диагностируемого объекта выполняются автоматически, т.е. без участия человека. В этом случае сотрудник эксплуатирующей организации при мониторинге ТС оборудования ВЛ (стальные грозотросы и оттяжки опор, провода типа АС и др.) в состоянии самостоятельно обслужить



**Рис. 4. Перемещение измерительной головки вдоль провода с помощью капронового каната**

жить дефектоскоп и воспользоваться его выходными сигналами.

Автоматизация процесса диагностирования ТС оборудования путём передачи функций дефектоскописта автоматизированному средству НК имеет важное значение для повышения эксплуатационной готовности ВЛ. Она позволяет реализовать мониторинг ТС проводов, грозотросов и оттяжек опор без привлечения дефектоскопистов – специалистов по магнитному НК. Такие специалисты, как правило, отсутствуют в штате персонала службы линий предприятий, осуществляющих эксплуатацию и обслуживание ВЛ. Одновременно, за счёт исключения субъективного фактора при расшифровке дефектограмм идентификации дефек-

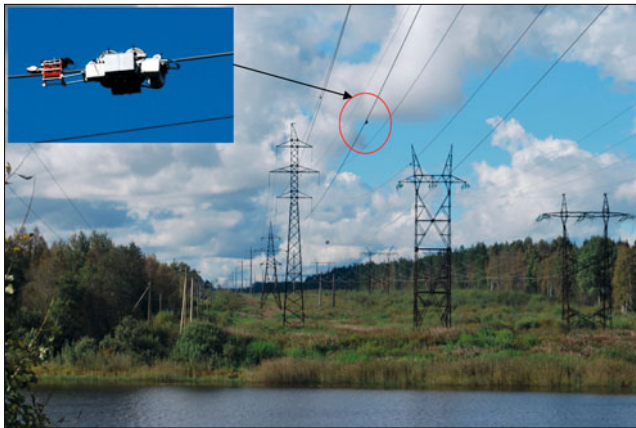
тов и определения их параметров человеком, повышается достоверность результатов диагностирования ТС объектов контроля.

**Оценка ТС и несущей способности грозотросов и проводов ВЛ по результатам магнитного НК.** Классификация ТС проводов и грозотросов по результатам магнитной дефектоскопии производится в соответствии с корпоративными нормативными документами. По заданию ПАО “ФСК ЕЭС” в рамках работ по одной из НИОКР (договор № 03-НТЦ/07 от 02.07.2007) компанией “ИНТРОН ПЛЮС” был разработан, а заказчиком утверждён руководящий документ “Инструкция по определению технического состояния комбинированных проводов, грозозащитных тро-

**Т а б л и ц а 1**

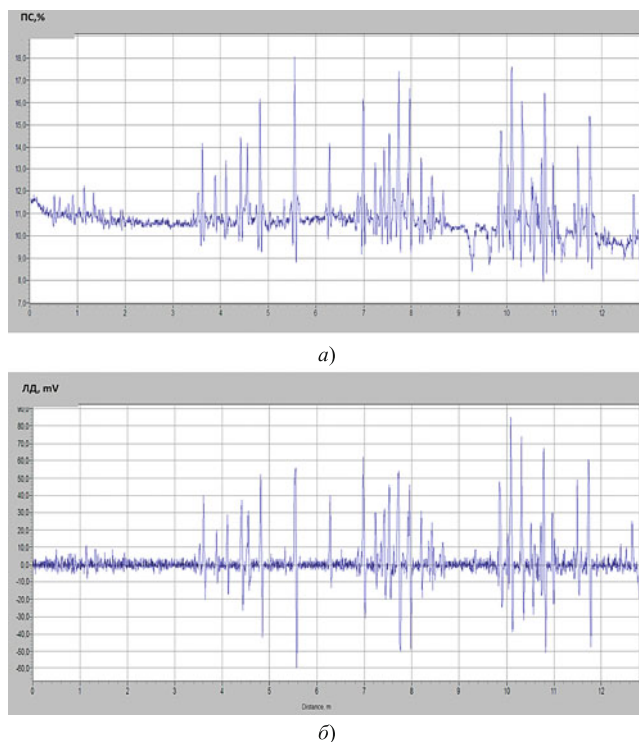
**Перечень обследованных переходов ВЛ через водные преграды в филиалах ПАО “Ленэнерго”**

ВЛ	Водное препятствие	Напряжение ВЛ, кВ	Объект контроля (пролёт ВЛ между опорами, контрольный образец)
<b>Гатчинские электрические сети</b>			
Балтийская-1	Р. Ижора	110	11 – 12
Прометей-2	Р. Ижора	110	110 – 111
Колпинская-4	Р. Ижора	110	8 – 9
Батовская-1	Р. Оредеж	35	4 – 5
Батовская-2	Р. Оредеж	35	4 – 5
Андриановская	Р. Тосна	35	87 – 88
Любанская-2	Р. Тигода	35	49 – 50
Трубниковская-1	Р. Тигода	35	10 – 11
Трубниковская-2	Р. Тигода	35	97 – 98
Чудовская-2	Р. Тосна	110	44 – 45
<b>Выборгские электрические сети</b>			
Громовская-3	Р. Вуокса	110	Контрольный образец провода
Громовская-5	Р. Вуокса	110	Контрольный образец провода
Вуокса-3	Р. Вуокса	110	1 – 2
Северная-10	Р. Вуокса	110	Оп. 32 – ГЭС-10
Кузнечная-1	Озеро	110	66 – 67
Кузнечная-2	Озеро	110	66 – 67
ОЛ “Выборгская–1”	Сайменский канал	110	Контрольный образец провода
ОЛ “Выборгская–2”	Сайменский канал	110	23 – 24
Саперная-3	Р. Вуокса	35	112 – 113
<b>Санкт–Петербургские высоковольтные электрические сети</b>			
Ладожская-3	Р. Нева	35	42 – 43
Ладожская-4	Р. Нева	35	42 – 43
<b>Тихвинские электрические сети</b>			
Киришская-1	Р. Волхов	110	13 – 14
Киришская-2	Р. Волхов	110	13 – 14
Киришская-4	Р. Волхов	110	14 – 15
Киришская-4	Р. Волхов	110	86 – 87
<b>Новоладожские электрические сети</b>			
Волховская-5	Р. Сясь	110	19 – 20
Л-47	Р. Оять	35	28 – 29

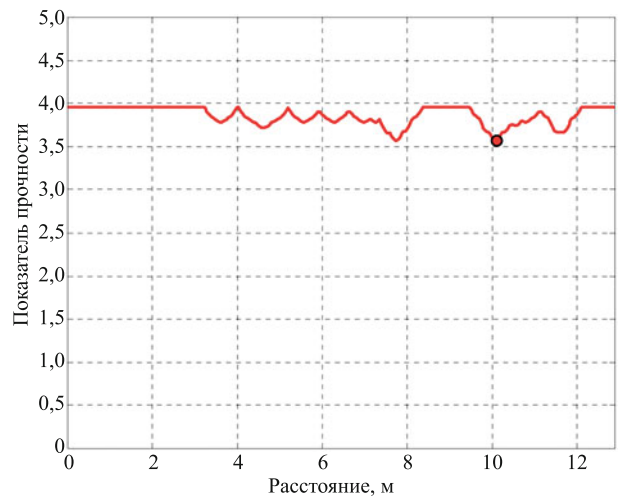


**Рис. 5.** Перемещение измерительной головки вдоль провода с помощью автономного самоходного устройства

сов и оттяжек опор воздушных линий электропередачи методами неразрушающего контроля с использованием магнитной дефектоскопии”. В этой инструкции перечислены категории ТС, приведены нормы дефектности проводов и тросов, а также даны рекомендации по периодичности проведения магнитной дефектоскопии. В соответствии с категорией ТС грозотросов и проводов ВЛ рекомендуется назначать следующие сроки проведения их последующего диагностирования: “рабочее состояние” (ПС до 11%) – через 6 лет; “ухудшенное состояние” (ПС от 11 до 20%) – через 3 года. Если ТС квалифицировано как “предаварийное состояние” (ПС более 20% или число обрывов



**Рис. 6.** Дефектограммы по каналам ПС (а) и ЛД (б) сердечника сталебронзового провода БС 185/43



**Рис. 7.** Распределение показателя прочности по длине участка провода БС 185/43

проволок троса или сердечника провода превышает нормы браковки), то решение о производстве ремонтно-восстановительных мероприятий следует принимать незамедлительно.

Оценка деградации несущей способности (прочности) проводов/грозотросов является важной составляющей проблемы диагностирования их ТС. Информация, получаемая при мониторинге ТС методом магнитной дефектоскопии, сама по себе не позволяет судить о степени изменения прочности объектов контроля. Однако диагностические параметры (ПС и/или число ЛД на определённой длине) могут быть использованы в качестве входных данных при определении методами механики материалов и конструкций на основе соответствующей механической модели расчётной оценки несущей способности проводов/грозотросов. Такой подход к использованию результатов магнитной дефектоскопии позволяет определить ряд прочностных показателей, по которым можно делать обоснованные выводы о ТС обследованных объектов.

Традиционные методы прочностного расчёта неизолированных проводов ВЛ разработаны достаточно хорошо [10]. Биметаллический провод рассматривается как набор независимо работающих прямолинейных стальных проволок сердечника и проволок повива (алюминиевого или бронзового). При этом все результаты получаются в “стержневом приближении”. На основании подобных оценок сформулированы требования к прочности проводов в ПУЭ [11] и других действующих нормативных документах.

Для более точных расчётов на прочность и жёсткость грозотрос и/или биметаллический провод следует рассматривать как спиральный канат, т.е. как механическую конструкцию, состоящую из разнородных упругих винтовых элементов, которые деформируются совместно вдоль продоль-

ной оси [12]. Уравнения механического состояния каната связывают осевое усилие  $T$  и крутящий момент  $M$  с обобщёнными деформациями растяжения  $\varepsilon$  и кручения  $\theta$  соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} T &= C_{11}\varepsilon + C_{12}\theta; \\ M &= C_{12}\varepsilon + C_{22}\theta, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $C_{11}$ ,  $C_{12}$  и  $C_{22}$  – эффективные коэффициенты жёсткости каната как гетерогенной структуры.

Под действием растягивающего усилия  $T$  грозотросы и провода испытывают преимущественно продольные деформации. Эффектами закручивания (раскручивания), как правило, можно пренебречь. По этой причине доминирующей величиной в соотношениях (1) является коэффициент продольной жёсткости  $C_{11}$ , зависящий от параметров жёсткости проволок и геометрических параметров их винтовой структуры:

$$C_{11} = \sum_{j=1}^J m_j EA_j \cos^3 \alpha_j. \quad (2)$$

Суммирование в выражении (2) производится по слоям проволок ( $j = 1, \dots, J$ );  $m_j$  – число проволок в  $j$ -м слое;  $EA_j$  и  $\alpha_j$ , – жёсткость сечения и угол свивки проволок  $j$ -го слоя относительно оси каната.

В процессе длительной эксплуатации структурные составляющие биметаллических проводов (провода повива и сердечника) постепенно приобретают необратимые деформации. Для учёта данного эффекта выражение (2) для продольной жёсткости  $C_{11}$  следует представлять в виде:

$$C_{11} = \sum_j m_j \frac{EA_j}{1 + EZ_j(\tau)} \cos^3 \alpha_j,$$

где  $Z_j(\tau)$  – эмпирические функции времени  $\tau$  (функции ползучести), различные для стальных и алюминиевых/бронзовых проволок [13, 14].

Деформация  $\varepsilon$  каната (сердечника провода или грозотроса) определяется для заданного натяжения  $T$  и преобразуется в деформации растяжения  $\varepsilon^{(j)}$ , изгиба  $b^{(j)}$  и кручения  $t^{(j)}$  проволок каждого

$j$ -го слоя в системах координат соответствующих винтовых осей:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon^{(j)} &= \varepsilon \cos^2 \alpha_j; \quad b^{(j)} = -\varepsilon \frac{\sin^2 \alpha_j \cos^2 \alpha_j}{r_j}; \\ t^{(j)} &= -\varepsilon \frac{\sin^3 \alpha_j \cos \alpha_j}{r_j}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $r_j$  – радиус свивки  $j$ -го слоя. По деформациям выражения (3) вычисляются нормальные  $\sigma$  и касательные  $\tau$  напряжения. Сложное напряженное состояние в опасной точке наиболее нагруженной проволоки приводится с использованием соответствующего критерия прочности к эквивалентному линейному напряжённому состоянию. Например,

$$\sigma_{\text{экр}} = (\sigma^2 + 4\tau^2)^{1/2}.$$

С инженерной точки зрения деградацию ТС, связанную с потерей несущей способности провода/грозотроса, естественно трактовать как снижение запаса прочности вследствие накопления дефектов по сравнению с начальным (бездефектным) состоянием. Коэффициент запаса прочности может служить параметром оценки ТС провода/грозотроса при текущей наработке. Когда значение запаса прочности становится близким к предельному, то возникает необходимость принятия надлежащих мер для обеспечения безопасной эксплуатации ВЛ.

**Т а б л и ц а 2**

**Результаты мониторинга ТС проводов/грозотросов ВЛ Колпинская-4 и Чудовская-2**

ВЛ	Пролёт между опорами	Объект (провод/грозотрос)	Марка провода грозотроса	Описание обнаруженных дефектов, их параметры	Состояние провода/грозотроса
Колпинская-4	8 – 9	Нижний провод	АС-150/24	Обрывов проволок сердечника не обнаружено. ПС сердечника 9,5% (отметка 131,2 м)	Рабочее
		Средний провод	АС-150/24	Обрывов проволок сердечника не обнаружено. ПС сердечника 8,1% (отметка 2,1 м)	Рабочее
		Верхний провод	АС-150/24	Обрывов проволок сердечника не обнаружено. ПС сердечника 11,1% (на отметке 187,2 м)	Ухудшенное
	8 – 9	Грозотрос	СТ-50	Обрывы двух проволок грозотроса на отметке 139,2 м. ПС грозотроса 14,3% (на отметке 139,2 м)	Ухудшенное
Чудовская-2	44 – 45	Верхний провод	АС-150/19	Обрывов проволок сердечника не обнаружено. ПС сердечника 10,8% (отметка 66,4 м)	Рабочее
		Средний провод	АС-150/19	Обрывов проволок сердечника не обнаружено. ПС сердечника 12,0% (на отметке 65,5 м)	Ухудшенное
		Нижний провод	АС-150/19	Обрывов проволок стального сердечника не обнаружено. ПС сердечника 15,1% (на отметке 88,9 м)	Ухудшенное



Рис. 8. Переход ВЛ 110 кВ Куделинская – Шубинская и Росляковская – Приобская – Шубинская через р. Обь

Последовательность прочностного расчёта грозотроса состоит из нескольких шагов. Сначала по результатам диагностирования (после расшифровки дефектограмм, полученных по каналам ПС и ЛД магнитного дефектоскопа) формируются “карты дефектности” грозотроса – набор исходных данных, характеризующих параметры и местоположение распределённых и локальных дефектов. “Карты дефектности” являются частью входной информации – исходных данных для программы *CoreStrength* (свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ 2009615284 от 24.09.2009). Расчёты на прочность выполняются для трёх случаев: грозотроса без дефектов, грозотроса с диагностированной ПС и грозотроса с ЛД (обрывами проволок). При этом для каждого случая сначала из уравнений (1) вычисляются продольные деформации грозотроса в целом, а затем по формулам (3) определяются деформации растяжения, изгиба и кручения в проволоках и соответствующие напряжения. Наконец, по подходящему критерию прочности находят максимальные эквивалентные напряжения в наиболее напряжённой проволоке и рассчитывается коэффициент запаса прочности:

$$n = \frac{\sigma_B}{\max \sigma_{\text{экв}}}. \quad (4)$$

где  $\sigma_B$  – временное сопротивление материала проволок на растяжение. Относительные параметры потери прочности  $R_{\text{ПС}}$  и  $R_{\text{ЛД}}$ , ассоциируемые с двумя типами дефектов – ПС и ЛД, могут быть введены как

$$R_{\text{ПС}} = 1 - \frac{n_{\text{ПС}}}{n_0}; \quad R_{\text{ЛД}} = 1 - \frac{n_{\text{ЛД}}}{n_0}, \quad (5)$$

где  $n_{\text{ПС}}$  и  $n_{\text{ЛД}}$  – коэффициенты запаса прочности каната с дефектами;  $n_0$  – коэффициент запаса нового каната в состоянии поставки (теоретически, без дефектов). Параметры  $R_{\text{ПС}}$  и  $R_{\text{ЛД}}$  определяются независимо согласно гипотезе о накоплении повреждений в механике конструкций. Результирующая потеря прочности  $R$  в поперечном сечении определяется суперпозицией

$$R = R_{\text{ПС}} + R_{\text{ЛД}}. \quad (6)$$

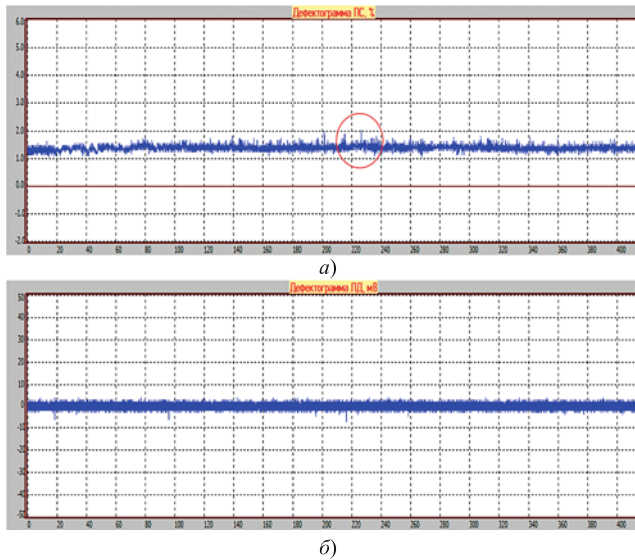
Коэффициент запаса прочности провода и/или грозотроса находится из выражения

$$n = n_0(1 - \max R), \quad (7)$$

где  $\max R$  – максимальная потеря прочности на диагностируемом участке. Коэффициент запаса прочности  $n$  на протяжении всего срока эксплуатации должен оставаться выше минимально допустимого значения  $n^*$ , т.е.  $n \geq n^*$ . В противном случае провод или грозотрос с накопленными повреждениями подлежит замене.

Прочностной расчёт проводов типа АС производится по той же схеме, что и для грозотросов, с оценкой параметров напряжённого состояния методами, принятыми для комбинированных конструкций. Текущие значения прочностных показателей  $n$  или  $R$  предлагается использовать при оценке ТС провода/грозотроса с дефектами.

В качестве примера (аналогично [3]), приведём результаты расчёта остаточной прочности участка



**Рис. 9.** Дефектограммы по каналам ПС (а) и ЛД (б) сердечника нижнего провода в пролёте между опорами № 46 – 45 на переходе ВЛ 110 кВ Куделинская – Шубинская через р. Обь

сталебронзового провода БС 185/43, который эксплуатировался на переходе ВЛ 35 кВ Ладожская-3 через Неву. Дефектограммы по каналам ПС и ЛД сердечника отрезка провода длиной  $l = 13$  м, полученные с использованием дефектоскопа «ИНТРОС» (МГ 20-40), представлены на рис. 6. Обработка (расшифровка) дефектограмм производится при помощи программы Wintros (свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ 2005611017 от 27.04.2009).

Дефектограмма рис. 6, а показывает, что на этом участке максимальная потеря сечения сердечника провода равна 18%, а дефектограмма ЛД (рис. 6, б) свидетельствует о наличии обрывов проволок сердечника. Критерием наличия обрывов проволок стального сердечника биметаллического провода (в данном случае сталебронзового БС 185/43) является форма сигнала по каналу ЛД (в милливольтгах), а также превышение амплитудой уровня шума и порога, соответствующего обрыву одной проволоки.

### Таблица 3

**Результаты расчётного показателя относительной потери прочности диагностированных проводов на ВЛ 35 кВ Ладожская-3, -4**

ВЛ	Контролируемый объект (провод фазы)	Максимальная величина ПС сердечника провода, %	Относительная потеря прочности провода, %
ВЛ 35 кВ Ладожская-3	Нижний	19,7	17,6
	Средний	18,1	16,1
	Верхний	20,3	21,2
ВЛ 35 кВ Ладожская-4	Нижний	28,4	24,4
	Средний	35,9	27,5
	Верхний	36,3	27,7

Распределение значений коэффициента запаса прочности  $n$  вдоль продиагностированного участка провода, полученное расчётным путём, проиллюстрировано на рис. 7.

При вычислении этого показателя прочности номинальное натяжение провода было принято  $T = 30$  кН. Красная точка на отметке  $l^* = 10,1$  м соответствует минимальному значению  $n = 3,57$ . Данный минимум можно считать фактическим коэффициентом запаса прочности провода  $n$  на рассмотренном участке. Провалы на графике соответствуют влиянию ЛД (обрывов проволок) стального сердечника провода. Используемая механическая модель дефектного провода [12, 15] позволяет учесть способность оборванных проволок воспринимать натяжение при удалении от места обрыва вследствие трения. Снижение запаса прочности относительно начального значения  $n_0 = 4,23$  обусловлено влиянием распределённой потери сечения из-за коррозии и фрикционного износа проволок сердечника.

Полученные оценки согласуются с положениями ПУЭ-7 [11], где требования по прочности сформулированы в терминах “допустимых напряжений”, а именно, напряжения в проводе не должны превышать допустимого значения, которое назначается в зависимости от типа и марки провода, а также от характерных условий эксплуатации. Например, для проводов типа АС и “среднегодовой температуры” принимается, что  $[\sigma] = 0,3\sigma_{в}$ . В механике конструкций подобное соотношение записывают в виде  $[s] = \sigma_{с}/[n]$ , где параметр  $[n]$  имеет смысл нормативного коэффициента запаса прочности. Допустимое натяжение нового провода назначается из условия  $n_0 \geq [n] = 3,3$ .

Отметим некоторые проблемы и особенности расчётной оценки остаточной прочности проводов и грозотросов с выявленными эксплуатационными дефектами. Эта оценка должна проводиться с учётом изменения прочностных характеристик соответствующих конструкционных материалов в процессе длительной эксплуатации. К сожалению, достоверных и систематизированных данных, касающихся длительной прочности биметалличе-



ских проводов (типа АС и др.) крайне мало. Актуальность и целесообразность проведения таких исследований не вызывают сомнений.

Как показывают результаты расчётов, потеря прочности биметаллических проводов оказывается меньше величины ПС сердечника вследствие того, что часть нагрузки воспринимается проволоками повива. Расчёт провода или грозотроса по модели спирального каната [12], в отличие от “стержневого приближения” [10], учитывает неравномерное распределение напряжений по поперечному сечению, которое обусловлено растяжением, изгибом и кручением проволок. Он даёт большее значение потери прочности, чем расчёт по предельным нагрузкам в “стержневом приближении”. По той же причине потеря прочности грозотросов в процентном отношении выше, чем соответствующая потеря сечения по металлу. Чем сложнее конструкция сердечника, тем сильнее отличаются запасы прочности новых проводов и проводов с дефектами при сопоставимой нагрузке.

**Результаты мониторинга ТС проводов и грозотросов ВЛ в сетях ПАО “Россети” с применением магнитной дефектоскопии.** Далее на примере работ по мониторингу ТС проводов и грозотросов, выполненных в ПАО “Ленэнерго” (филиал ПАО “Россети”), проиллюстрирована эффективность применения магнитной дефектоскопии при обследованиях ВЛ с длительным сроком эксплуатации (35 – 40 лет и более). Особое внимание эксплуатационного персонала филиалов ПАО “Ленэнерго” было уделено контролю ТС ВЛ напряжением 35 – 110 кВ на переходах через водные преграды (реки Нева, Волхов, Вуокса и др.). Перечень обследованных переходов приведён в табл. 1.

Фазные провода были проконтролированы на 26 ВЛ 35 – 110 кВ в 27 пролётах, грозотросы – в 15 пролётах. В ряде случаев на проконтролированных ВЛ были выявлены значительные эксплуатационные дефекты грозотросов и сердечников проводов. Так, на восьми из десяти переходов ВЛ через водные преграды, которые обследовались в филиале ПАО “Ленэнерго” “Гатчинские электрические сети”, ТС проводов и грозотросов было диагностировано как “рабочее”. Срок их эксплуатации был продлён на 6 лет. Очередной контроль рекомендовано произвести в 2019 г. Состояние же проводов и грозотроса на ВЛ Колпинская-4 (в пролёте между опорами № 8 – 9) и проводов на ВЛ Чудовская-2 (в пролёте между опорами № 44 – 45) диагностировано как “ухудшенное”. Результаты диагностирования этих переходов ВЛ приведены в табл. 2.

Срок эксплуатации проводов АС-150/24 и грозотроса СТ 50 на ВЛ Колпинская-4 и проводов АС-150/19 на ВЛ Чудовская-2 был продлён на 3 года.

При обследовании ВЛ Северная-10 на переходе через р. Вуокса по всей длине грозотроса (СТ 50)

обрывов проволок обнаружено не было, но был выявлен значительный коррозионный износ. Максимальная потеря сечения грозотроса составляла 14,6%, а относительная потеря несущей способности  $R = 15,33\%$ . Техническое состояние грозотроса диагностировано как “ухудшенное”, но он был признан пригодным к дальнейшей эксплуатации. На фазных проводах (АС-120/19) этой ВЛ обрывов проволок сердечников обнаружено не было, но был выявлен их значительный коррозионный износ. Максимальное значение потери сечения сердечника провода ПС = 12,8% (на отметке 36,2 м), а расчётная относительная потеря прочности  $R = 6,41\%$ . ТС проводов диагностировано как “ухудшенное”, но провода пригодны к дальнейшей эксплуатации. Очередной контроль ТС проводов и грозотросов на этом переходе было рекомендовано провести через 3 года.

Более тревожными оказались результаты контроля проводов ВЛ 35 кВ Ладожская-3, -4 на переходе через р. Нева. При строительстве ВЛ в пролёте между опорами № 42 – 43 были навешены сталебронзовые провода БС-185 (диаметр провода 19,6 мм, диаметр стального сердечника 8,4 мм). Срок эксплуатации этих проводов к моменту диагностирования их текущего ТС составлял более 45 лет. При проведении дефектоскопии по всей длине обследованных участков проводов была диагностирована значительная величина ПС по металлу сердечников, вызванная коррозией, а также многочисленные обрывы проволок сердечников. Результаты дефектоскопии проводов (в пролёте между опорами № 42 – 43) и расчётная величина относительной потери прочности приведены в табл. 3.

Техническое состояние проводов ВЛ Ладожская-3, -4 на переходе через р. Нева было диагностировано как “предаварийное”. По результатам проведённого обследования службой линий ПАО “Ленэнерго” было принято решение о замене старых сталебронзовых проводов БС-185 неизолрованными проводами современных типов.

Одними из последних работ по определению текущего ТС токонесущих проводов ВЛ с применением метода MFL, проведённых специалистами ЛНК ООО “ИНТРОН ПЛЮС”, были работы на ВЛ 110 кВ в сетях ОАО “Тюменьэнерго”. В апреле 2019 г. было обследовано состояние проводов на переходах ВЛ Куделинская – Шубинская и ВЛ Росляковская – Приобская – Шубинская через р. Обь (рис. 8).

Обе линии были введены в эксплуатацию в 2002 г. В пролётах ВЛ на спецпереходах навешены провода марки АЖС500/336. Результаты выполненного диагностирования свидетельствуют о том, что провода на обоих переходах после продолжительной эксплуатации (более 16 лет) находятся в работоспособном ТС. Обрывов проволок сердечников проводов не зафиксировано. Макси-

мальные значения ПС сердечников проводов лежат в пределах 1,8 – 2,1%.

В качестве примера на рис. 9 показаны дефектограммы ПС и ЛД нижнего фазного провода на переходе ВЛ 110 кВ Куделинская – Шубинская через р. Обь (в пролёте между опорами № 46 – 45).

Длина проконтролированного участка провода  $l = 415,7$  м. Максимальное значение ПС сердечника – 2,0% на отметке  $l^* = 226,5$  м (начальная точка “0 м” находится за виброгасителем около опоры № 46).

В рамках мониторинга ТС линейного оборудования этих ВЛ очередную магнитную дефектоскопию проводов на переходах рекомендуется провести через 6 лет.

## Выводы

1. Магнитная дефектоскопия является эффективным методом неразрушающего контроля и диагностики технического состояния линейного оборудования ВЛ – биметаллических (типа АС и др.) неизолированных проводов, стальных грозотросов и оттяжек опор. Данный метод неразрушающего контроля находит всё более широкое применение в филиалах ПАО “Россети” в практике обследований ВЛ напряжением 35 – 110 кВ, проводимых с целью оценки текущего технического состояния линейного оборудования.

2. Результаты работ по контролю ТС проводов/грозотросов с применением магнитной дефектоскопии в ряде случаев сигнализируют об ухудшенном или предаварийном состоянии проконтролированных объектов, а в ряде других позволяют продлить срок безопасной эксплуатации, что экономит значительные финансовые затраты на ремонтно-восстановительные работы или замену соответствующего оборудования ВЛ.

3. Параметр состояния провода/грозотроса – коэффициент запаса остаточной прочности, рассчитанный с учётом результатов дефектоскопии, может служить дополнительным аргументом при принятии эксплуатационным персоналом соответствующих решений. Периодическое обследование с применением технологии магнитной дефектоскопии позволяет оценить темпы старения проводов и грозотросов, а также разработать на этой основе метод количественной оценки их остаточного срока службы.

4. Применение метода диагностирования технического состояния линейного оборудования ВЛ (токонесущих биметаллических проводов, стальных грозотросов и оттяжек опор) с применением магнитной дефектоскопии должно найти отражение в нормативно-технических документах, регламентирующих порядок проведения и очередность

контрольно-диагностических работ на эксплуатируемых линиях.

## Список литературы

1. Типовая инструкция по эксплуатации воздушных линий электропередачи напряжением 35 – 800 кВ [Текст]: РД 34.20.504-94. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. – 200 с.
2. Volokhovskiy, V. Assessment of OHL Availability and Residual Life-Time by Using Non Destructive Instrumental Control for Conductors, Steel Wires and Guys [Electronic resource] / V. Volokhovskiy, A. Vorontsov, D. Sukhorukov, V. Mekhanoshin, V. Shkaptsov // CIGRE Session 2010, B2-309. – (<http://www.cigre.org/gb/Events/session.asp>).
3. Волоховский, В. Ю. Оценка технического состояния воздушных линий электропередач методами магнитной дефектоскопии [Текст] / В. Ю. Волоховский, А. Н. Воронцов, В. В. Сухоруков, В. В. Цуканов, В. А. Шкапцов, М. С. Артемьев, В. В. Чернецов // Энергия единой сети. – 2016. – № 2. – С. 42 – 51.
4. Volokhovskiy, V. Y. Condition assessment of conductors and ground wires of overhead lines using non-destructive testing based on magnetic flux measurements [Text] / V. Y. Volokhovskiy, A. N. Vorontsov, V. V. Sukhorukov, V. V. Tsukanov, V. A. Shkaptsov, M. S. Artem'ev, V. V. Chernetsov // Cigre Science and Engineering. – 2016. – No 6. – P. 46 – 54.
5. Неразрушающий контроль [Текст]: в 8 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – Т. 6. – Кн. 1. – 832 с.
6. Методические указания по магнитной дефектоскопии стальных канатов. Основные положения [Текст]: РД-03-348-00. – М.: Гостехнадзор, 2000. – 18 с.
7. Белицкий, С. В. Дефектоскоп стальных канатов ИНТРОС [Текст] / С. В. Белицкий, Г. А. Касимов, В. В. Сухоруков // В мире НК. – 2006. – № 2. – С. 13 – 18.
8. Sukhorukov, V. Electromagnetic inspection and diagnostics of steel ropes: technology, effectiveness and problems [Text] / V. Sukhorukov, D. Slesarev, A. Vorontsov // Materials Evaluation (ME), American Society of Nondestructive Testing. – 2014. – Vol. 72. – No 8. – P. 1019 – 1027.
9. Slesarev, D. Automated magnetic rope condition monitoring: concept and practical experience [Text] / D. Slesarev, D. Sukhorukov, I. Shpakov // Proceedings of the OIPEEC Conference 2017. – P. 295 – 300.
10. Кессельман, Л. М. Основы механики воздушных линий электропередачи [Текст] / Л. М. Киссельман. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 354 с.
11. Правила устройства электроустановок [Текст]. – 7-е изд., стереотипное переиздание. – СПб.: Изд-во ДЕАН, 2008. – 704 с.
12. Глушко, М. Ф. Стальные подъёмные канаты [Текст] / М. Ф. Глушко. – Одесса: Астропринт, 2013. – 336 с.
13. Волоконский, В. Ф. Расчёт на прочность канатов-проводов линий электропередач с учётом ползучести [Текст] / В. Ф. Волоконский, И. М. Чаюн // Стальные канаты. – Киев: Техника. – 1971. – С. 27 – 30.
14. Серенсен, С. В. Несущая способность и расчёты деталей машин на прочность [Текст] / С. В. Серенсен, В. П. Когаев, Р. М. Шнейдерович. – М.: Машиностроение, 1975. – 448 с.
15. Воронцов, А. Н. Механическая модель оценки прочности и ресурса стальных канатов грузоподъёмных машин и по данным диагностики [Текст] / А. Н. Воронцов, В. Ю. Волоховский // Инженерный журнал. – М.: Издательский дом СПЕКТР. – 2012. – № 10(187). – С. 37 – 47.