

Техническое диагностирование оттяжек антенно-мачтовых сооружений



В.Ю. Волоховский,
канд. техн. наук, вед. сотрудник,
volokhovskiy@intron.ru



А.Н. Воронцов,
канд. техн. наук, вед.
сотрудник



А.В. Жирнов,
вед. сотрудник



А.Р. Рудяк,
инженер

ООО «ИНТРОН ПЛЮС», Москва, Россия

В статье рассмотрена практика применения магнитного метода неразрушающего контроля для диагностирования стальных канатов оттяжек антенно-мачтовых сооружений. Дается краткое описание физических основ используемого метода контроля (MFL-метод), основанного на регистрации магниточувствительными датчиками рассеяния магнитного потока, вызванного потерей сечения каната по металлу в ходе эксплуатации из-за коррозии и (или) появлением локальных дефектов типа обрыва проволок от действующих статических и динамических нагрузок. Приводится описание конструкции и комплектующих применяемого диагностического оборудования — измерителя износа стальных канатов (дефектоскопа) ИНТРОС, а также технологии выполнения с его помощью работ по диагностированию канатов оттяжек антенно-мачтовых сооружений. В качестве примеров, иллюстрирующих эффективность применяемой технологии при обследованиях технического состояния оттяжек, приводятся результаты магнитного неразрушающего контроля канатов двух теле- и радиотрансляционных мачт в городах Ясный и Кувандык (филиал РТРС «Оренбургский ОРТПЦ»), срок эксплуатации которых превышал 40 лет.

Ключевые слова: антенно-мачтовые сооружения, магнитный неразрушающий контроль, стальные канаты оттяжек, диагностирование участков с распределенными и локальными дефектами, техническое состояние, остаточная несущая способность.

DOI: 10.24000/0409-2961-2017-10-33-39

Введение

В сети теле- и радиовещания России для размещения антенного и передающего оборудования используются тысячи антенно-мачтовых сооружений (АМС). В частности, ФГУП «Российская телевизионная и радиовещательная сеть» (РТРС) эксплуатирует более 5 тыс. АМС различных типов и высот. Значительная доля этих сооружений (более 2 тыс.) представлена мачтами — высотными сборными металлическими конструкциями ферменного типа. Устойчивость мачт обеспечивается многоярусными оттяжками, элементами которых являются стальные канаты с предварительным натяжением (рис. 1). Около 800 высотных мачт с растяжками было построено до 1985 г., т.е. более 30 лет назад. Нормативный срок службы стальных канатов оттяжек составляет 25 лет. В связи с этим для ранее построенных высотных мачт актуальна проблема обеспечения надежной и безаварийной работы канатов

оттяжек и обоснованного продления их ресурса. При длительной эксплуатации текущее техническое состояние канатов оттяжек определяется целым рядом факторов. Прежде всего это уровень действующих на них механических нагрузок (статических и динамических), особенности климатических воздействий, состав и загрязненность атмосферы и многое другое.

Одной из причин деградации технического состояния (ТС) канатов оттяжек мачт является появление распределенных эксплуатационных дефектов типа потери сечения (ПС) каната по металлу, которая возникает в результате коррозионного и (или) фрикционного износа. Кроме того, в прядях сердечника каната могут изначально присутствовать обрывы проволок (брак при изготовлении). Обрывы проволок появляются также от внешних воздействий на канат и накапливаются в процессе эксплуатации. Эти повреждения принято называть



▲ **Рис. 1. Мачта РТПС с тремя ярусами оттяжек**
 ▲ **Fig. 1. The RTRS mast with three levels of guy wires**

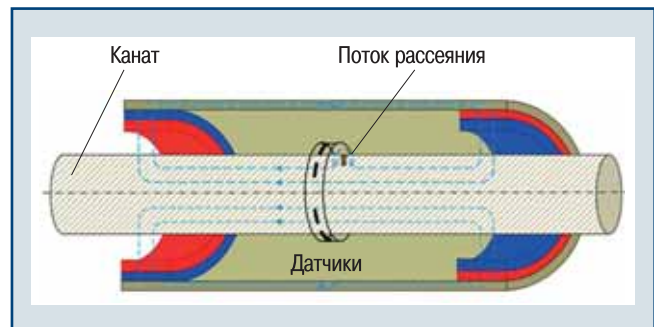
локальными дефектами (ЛД). Появление эксплуатационных распределенных и локальных дефектов приводит к снижению несущей способности (прочности) канатов. Поэтому при обследовании ТС оттяжек очень важно иметь возможность определять и измерять относительную ПС канатов по металлу, а также обнаруживать ЛД типа обрывов проволок.

Согласно действующим нормативным документам и правилам эксплуатации оттяжки АМС подлежат периодическому обследованию, которое до недавнего времени заключалось лишь в визуальном контроле (осмотре) канатов и узлов их крепления, а также в инструментальном измерении натяжения канатов. Основным недостатком визуального метода контроля оттяжек является невозможность количественного определения величины ПС и идентификации обрывов внутренних проволок в прядях и сердечнике канатов. Эти обстоятельства не позволяют достоверно интерпретировать и документировать результаты обследования ТС оттяжек. При наличии результатов дефектоскопии, полученных с помощью соответствующих инструментальных средств, и данных о текущих значениях механических характеристик материала стальных канатов с большим сроком эксплуатации остаточная несущая способность оттяжек АМС может быть определена расчетным путем.

В последнее время при обследованиях ТС стальных канатов оттяжек мачт стал применяться магнитный метод неразрушающего контроля (НК) [1, 2]. Цель диагностирования состоит в определении текущего ТС объекта и принятии решения о его соответствии требованиям безопасной эксплуатации. Применение магнитного НК нашло отражение в отечественных и зарубежных нормативных документах [3–5], а также в практике технического диагностирования конструкций различного назначения [6–8].

МFL-метод и аппаратура

Основанный на измерении магнитных потоков рассеяния метод НК (MFL-метод) находит все более широкое распространение в практике технической диагностики объектов, когда возникает задача контроля ТС изделий из ферромагнитных материалов. Физические основы MFL-метода подробно изложены в [2]. Намагничивающая система, которая состоит из магнитов и магнитопровода, создает в объекте контроля магнитный (основной) поток. Величина магнитной индукции при этом такова, что находящийся внутри намагничивающей системы материал контролируемого изделия пребывает в состоянии магнитного насыщения. Намагничивание материала до состояния насыщения обуславливает наличие над объектом контроля потока рассеяния, величина которого обратно пропорциональна площади поперечного сечения изделия. Измерение магнитной индукции над объектом контроля позволяет оценивать площадь его поперечного сечения. В результате изменения поперечного сечения материала (например, вследствие наличия ПС или ЛД) над поверхностью объекта контроля дефекта появляется дополнительный поток рассеяния, который при сканировании вдоль поверхности регистрируется магниточувствительным датчиком (рис. 2). Аппаратуру, реализующую MFL-метод, разрабатывают и выпускают различные зарубежные (Rosen, Silverwing, NDT Technologies и др.) и отечественные производители (ООО «ИНТРОН ПЛЮС» и ООО НПП «МагнетикДон»).



▲ **Рис. 2. Структурная схема магнитной головки**
 ▲ **Fig. 2. Structural scheme of magnetic head**

Современные магнитные дефектоскопы позволяют диагностировать круглые стальные канаты различных диаметров и конструкций при их про-

изводстве (выходной контроль) и в процессе эксплуатации (контроль ТС) [7, 9]. Двухканальный измеритель износа стальных канатов (дефектоскоп) ИНТРОС [10] состоит из измерительной магнитной головки (МГ), использующей в качестве магниточувствительных элементов датчики Холла, и электронного блока (ЭБ). Применение съемных вкладышей и блоков датчиков Холла позволяет с помощью МГ определенного типа [10] выполнять дефектоскопию плоских и круглых стальных канатов различного диаметра.

Управление дефектоскопом и визуализация данных диагностики осуществляются с помощью ЭБ, имеющего встроенную память. Результаты диагностики в виде дефектограмм по каналам ПС и ЛД записываются в память ЭБ и могут быть переписаны на внешнее устройство регистрации и обработки данных с помощью специального программного обеспечения. Магнитная головка оснащена счетчиком метража, регистрирующим ее положение на канате, поэтому обнаруженные дефекты получают точную пространственную привязку.

Технология выполнения работ

Выполнение дефектоскопии канатов оттяжек АМС проводится бригадой специалистов по магнитному НК и промышленных альпинистов. Специалисты НК, осуществляющие монтаж, настройку оборудования и запись дефектограмм (дефектоскописты первого уровня квалификации), должны быть обучены правилам эксплуатации конкретного типа магнитного дефектоскопа. Расшифровку дефектограмм и подготовку заключений по результатам диагностики канатов выполняет аттестованный специалист не ниже второго уровня квалификации по НК.

В целях диагностирования оттяжки МГ дефектоскопа вместе с ЭБ устанавливается на канат выше соответствующего нижнего анкера. Магнитная головка дефектоскопа для записи дефектограмм по каналам ПС и ЛД должна быть перемещена вдоль доступного контролю участка каната оттяжки. Обычно МГ перемещается вдоль каната с помощью прикрепленного к ней капронового троса (рис. 3, а) или с использованием движителя — автономного, дистанционно управляемого самоходного устройства (рис. 3, б).

Руководством по эксплуатации дефектоскопа ИНТРОС предписывается проводить работы по диагностированию канатов оттяжек с применением магнитных дефектоскопов при температуре от $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$, скорости ветра до 10 м/с, отсутствии снега и дождя. Перед инструментальным контролем оттяжек необходимо выполнить их осмотр, чтобы убедиться в отсутствии препятствий перемещению МГ вдоль каната оттяжки. Такими препятствиями являются установленные на канаты виброгасители и распорки, которые для проведения дефектоскопии должны быть демонтированы. Кро-

ме того, перемещению МГ мешают выступающие концы оборванных проволок, большие комки затвердевшей смазки и т.п. Для визуального контроля канатов оттяжек по всей длине используют бинокль или подзорную трубу, либо осмотр выполняют промышленные альпинисты.



▲ Рис. 3. Перемещение дефектоскопа вдоль каната оттяжки АМС

▲ Fig. 3. Moving the flaw detector along the rope of the guy wire of the AMS

Обработку и расшифровку дефектограмм по каналам ПС и ЛД осуществляют на персональном компьютере с использованием специальных программных средств, например программы Wintros (Свидетельство № 2005611017 от 27 апреля 2005 г.). Основной трудностью при обработке записанных дефектограмм является выделение сигналов от дефектов на фоне помех и шумов высокой интенсивности, вызываемых влиянием электромагнитных полей от установленной на АМС приемопередающей аппаратуры.

Для снижения влияния внешних высокочастотных электромагнитных полей на работу электронных систем управления работой МГ и ЭБ дефектоскопа на период проведения диагностики осуществляется временное отключение или снижение мощности передающих устройств. Кроме того, при компьютерной обработке дефектограмм приме-

няются программные методы фильтрации записей сигналов.

Данные о диагностированных дефектах служат входной информацией для механической модели поврежденного каната, на базе которой расчетным путем могут быть получены оценки его остаточной несущей способности и ресурса [11–14].

Результаты контроля

Впервые в России контроль ТС канатов оттяжек АМС с применением метода магнитной дефектоскопии выполнен специалистами лаборатории неразрушающего контроля (ЛНК) ООО «ИНТРОН ПЛЮС» в августе 2013 г. Работы проводились на двух объектах филиала РТРС «Оренбургский ОРТПЦ» (АМС в городах Ясный и Кувандык). Срок эксплуатации этих АМС без замены канатов оттяжек превышал 40 лет. Поэтому для данных объектов вопрос оценки остаточной несущей способности канатов оттяжек и аргументированного продления срока их службы сверх нормативного был весьма актуальным. В период 2013–2016 гг. специалисты ЛНК ООО «ИНТРОН ПЛЮС» в филиалах РТРС и ПАО «Ростелеком» выполнили работы по магнитной дефектоскопии канатов оттяжек на восьми мачтах со сроком эксплуатации 30–40 лет и более (табл. 1).

В ходе работ по диагностированию оттяжек мачты на одном из объектов филиала РТРС «Оренбургский ОРТПЦ» (АМС в г. Ясный) были выявлены недопустимые эксплуатационные дефекты канатов оттяжек первого и третьего ярусов северо-восточного направления. Канаты диаметром 45,5 и 50,5 мм изготовлены по ГОСТ 3068–55 и установлены на АМС в 1971 г. По данным магнитной дефектоскопии, обнаруженные эксплуатационные дефекты идентифицированы как обрывы проволок прядей и сердечника каната [15]. Техническое состояние этих канатов признано предаварийным. Они непригодны к дальнейшей эксплуатации и рекомендованы к замене. В табл. 2 приведены результаты дефектоскопии канатов оттяжек первого и третьего яруса северо-восточного направления. В качестве примера представлены дефектограммы по каналам ПС (рис. 4, а, где ось x — длина проконтролированного участка, м; ось y — относительная потеря сечения, %) и ЛД (рис. 4, б, где ось x — длина проконтролированного участка, м; ось y — величина сигнала по каналу ЛД, мВ) дефектоскопа ИНТРОС, записанные при дефектоскопии каната оттяжки первого яруса северо-восточного направления.

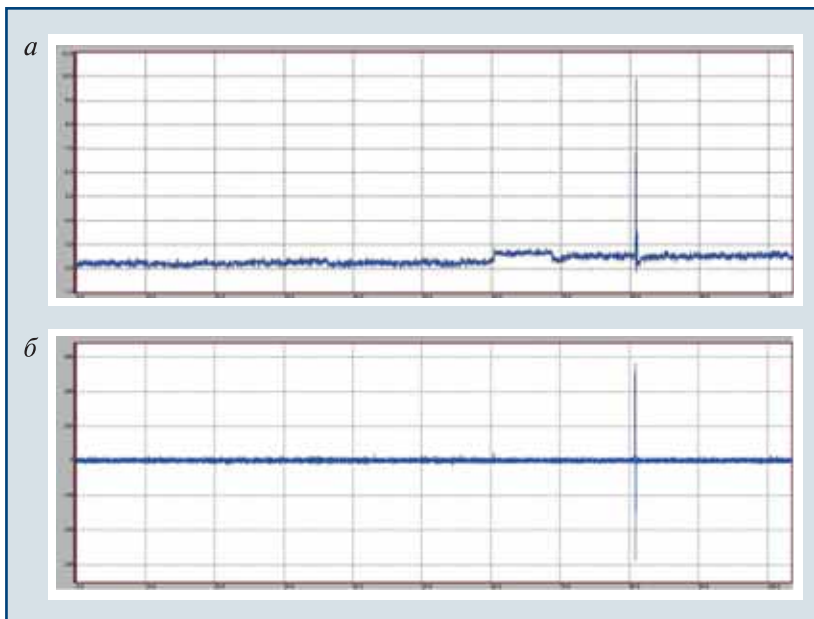
Таблица 1

Филиал РТРС, ПАО «Ростелеком»	Расположение АМС	Высота мачты, м	Число ярусов (канатов), шт.	Год ввода в эксплуатацию	Срок эксплуатации канатов, лет	Даты контроля
Оренбургский ОРТПЦ	г. Ясный	235,0	3 (12)	1971	42	29.07–08.08.2013
Оренбургский ОРТПЦ	г. Кувандык	245,9	5 (20)	1979	34	09.08–13.08.2013
Санкт-Петербургский ОРТПЦ	г. Подпорожье	184,0	4 (12)	1968	46	15.05–20.05.2014
Брянский ОРТПЦ	г. Унеча	220,0	3 (12)	1971	42	14.07–18.07.2014
Воронежский ОРТПЦ	г. Бобров	331,0	4 (32)	1976	38	20.07–26.07.2014
Ивановский ОРТПЦ	г. Родники	331,5	4 (32)	1972	44	07.06–07.12.2016
ОРТПЦ Республики Татарстан	с. Шемордан	252,5	5 (20)	1995	21	30.11–07.12.2016
Удмуртский филиал ПАО «Ростелеком»	г. Ижевск	182,0	3 (27)	1960	53	02.09–19.09.2014

Таблица 2

Объект контроля	ГОСТ	Диаметр каната, мм	Длина проконтролированного участка каната, м	Описание обнаруженных дефектов каната	Оценка ТС каната
Канат оттяжки 1-го яруса северо-восточного направления	ГОСТ 3068–55	50,5	103,6	Максимальное значение ПС каната 9,9 % на отметке 80,9 м	Канат не пригоден к дальнейшей эксплуатации
				Обрыв сердечника на отметке 80,9 м, отсутствие одной проволоки на участке 60,3–68,7 м	
				Питтинговая коррозия проволок прядей каната	
Канат оттяжки 3-го яруса северо-восточного направления	ГОСТ 3068–55	45,5	226,5	Максимальное значение ПС каната 6,9 % на отметке 14,8 м	Канат не пригоден к дальнейшей эксплуатации
				Обрывы проволок сердечника на отметках 9,6 и 14,8 м	
				Питтинговая коррозия проволок прядей каната	

На дефектограмме ПС (см. рис. 4, а) видно увеличение уровня сигнала, которое соответствует утрате одной проволоки пряди каната на участке 60,3–68,7 м. На обеих дефектограммах имеет место всплеск сигнала на отметке 80,9 м, который соответствует обрыву сердечника каната. По результатам дефектоскопии ТС этого каната, а также правого каната оттяжки третьего яруса, на котором диагностированы обрывы проволок сердечника на отметках 9,6 и 14,8 м, квалифицировано как неработоспособное. В выводах технического отчета о проведении работ [15] эти канаты рекомендованы к замене. Остальные канаты оттяжек АМС в г. Ясный признаны ограниченно годными к дальнейшей эксплуатации. Их очередной контроль рекомендовано провести в 2018 г. По решению руководства ОАО «Оренбургский ОРТПЦ» в конце 2014 г. оттяжки мачты в г. Ясный были заменены.



▲ Рис. 4. Дефектограммы ПС (а) и ЛД (б) каната оттяжки первого яруса северо-восточного направления на АМС в г. Ясный

▲ Fig. 4. Defectograms of the cross loss (a) and the local defects (b) in the rope of the first level northeastern guy wire at the AMS in Yasny town

Представление результатов дефектоскопии оттяжек

Заключение по каждому канату, проконтролированному методом магнитной дефектоскопии, составляется и оформляется в соответствии с РД 03-348—00 [3]. В содержание протокола контроля и заключение по канату оттяжки АМС включается следующая информация:

- объект контроля — наименование контролируемого объекта, его местонахождение, высота мачты, тип и диаметр канатов оттяжек;

- дата контроля;

- метод контроля со ссылкой на нормативные документы;

- применяемое оборудование;

- инспектирующая организация;
- программное обеспечение и нормативно-технические документы, на основании которых проводился прочностной расчет;

- соотношение выявленных дефектов с нормами браковки канатов;

- выводы о ТС каната и возможностях его дальнейшей эксплуатации, рекомендация относительно срока очередной инспекции;

- иллюстративные материалы — распределение показателя прочности на участке контроля, изменение запаса прочности в процессе наработки каната, изменение прогнозируемого остаточного ресурса каната.

Рекомендации о порядке действий эксплуатационного персонала на будущее определяются соотношением выявленных дефектов и соответствующих нормативных показателей, остаточным ресурсом каната по отношению к допустимому значению, а также планируемой наработкой к очередной инспекции.

Заключение

Обследование ТС стальных канатов с использованием магнитного дефектоскопа ИНТРОС позволяет определять и измерять наружные дефекты и не заметные при визуальном осмотре внутренние дефекты прядей и проволок. Этим обусловлена эффективность магнитной дефектоскопии — современного метода НК и диагностики ТС стальных канатов различного назначения. Обследование канатов оттяжек АМС с помощью данного метода основано на получении объективных данных о величине ПС канатов и протяженности зон коррозионного поражения, а также о месторасположении и числе ЛД типа обрывов проволок.

Необходимость применения метода магнитной дефектоскопии для контроля ТС канатов оттяжек должна быть отражена в нормативно-технических документах, регламентирующих технологию обследований АМС.

В последние годы метод находит все более широкое применение на практике в разных регионах страны. Расширение применения магнитной дефектоскопии канатов оттяжек АМС на основе единой методики измерений и обработки данных диагностики вместе с формированием и пополнением базы диагностической информации позволит выявить вероятностные характеристики накопления эксплуатационных дефектов при различных условиях эксплуатации и характере внешних воздействий. Подобный материал станет основой для определения остаточного ресурса и продления сроков безопасной эксплуатации канатов АМС.

Рассчитанный с использованием результатов магнитной дефектоскопии коэффициент запаса остаточной прочности каната вносит в данные НК принятый в механике конструкций инженерный смысл. При вынесении организационно-технических решений значения этого коэффициента могут быть рассмотрены в качестве дополнительного аргумента, позволяющего сократить существенные расходы на ремонтно-восстановительные работы или замену канатов оттяжек.

Список литературы

1. *ГОСТ 18353—79*. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-18353-79> (дата обращения: 10.07.2017).
2. *Неразрушающий контроль*: Справочник. В 8 т. Т. 6/ под ред. В.В. Клюева. — М.: Машиностроение, 2006. — 842 с.
3. *РД-03-348—00*. Методические указания по магнитной дефектоскопии стальных канатов. Основные положения// Промышленная безопасность при эксплуатации грузоподъемных кранов: Сб. док. — Сер. 10. — Вып. 7. — 4-е изд., испр. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2017. — С. 14—35.
4. *ASTM E1571—11*. Standard practice for electromagnetic examination of ferromagnetic steel wire rope// ASTM Book of Standards. Vol. 03.03. — West Conshohocken: ASTM International, 2011. URL: <https://www.astm.org/Standards/E1571.htm> (дата обращения: 10.07.2017).
5. *ISO 4309:2010*. Cranes — Wire ropes — Care, Maintenance, Installation, Examination and Discard. — Berlin: Beuth Verlag, 2010. URL: <https://www.iso.org/standard/43597.html> (дата обращения: 10.07.2017).
6. *Gronau O., Belitsky S., Sukhorukov V.* NDT of steel ropes with magnetic flaw detectors: documentation and interpretation of test results// Proceedings of the 15th World Conference on NDT. — Roma, 2000. — P. 15—21.
7. *Sukhorukov V.* Steel wire ropes NDT: new instruments// Proceedings of the 6th International Conference of the Slovenian Society for Non-destructive Testing. — Portorož, 2001. — P. 225—230.
8. *Sukhorukov V.V., Slesarev D.A., Vorontsov A.N.* Electromagnetic inspection and diagnostics of steel ropes: technology, effectiveness and problems// Materials Evaluation. — 2014. — Vol. 72. — № 8. — P. 1019—1027.
9. *Белицкий С.В., Касимов Г.А., Сухоруков В.В.* Дефектоскоп стальных канатов ИНТРОС// В мире неразрушающего контроля. — 2006. — № 2. — С. 21—23.
10. *Магнитный дефектоскоп ИНТРОС*. URL: <http://www.intron.ru/ru/pribory/intros/> (дата обращения: 10.07.2017).
11. *Feyrer K.* Wire Ropes: Tension, Endurance, Reliability. — Berlin: Springer-Verlag, 2007. — 326 p.
12. *Воронцов А.Н., Слесарев Д.А., Волоховский В.Ю.* Прогнозирование индивидуального ресурса стальных канатов// Безопасность труда в промышленности. — 2009. — № 12. — С. 68—73.
13. *Vorontsov A., Volokhovskiy V., Slesarev D.* Combined approach to damaged wire ropes life-time assessment based on NDT results and rope mechanics// Journal of Physics: Conference Series. — 2011. — Vol. 305. URL: <http://iopscience.iop.org/1742-6596/305/1/012114> (дата обращения: 10.07.2017).

iopscience.iop.org/1742-6596/305/1/012114 (дата обращения: 10.07.2017).

14. *Condition assessment of conductors and ground wires of overhead lines using non-destructive testing based on magnetic flux measurements/ V.Y. Volokhovskiy, A.N. Vorontsov, V.V. Sukhorukov et al.*// Cigre Science & Engineering. — 2016. — № 6. — P. 46—54.

15. *Технический отчет о проведении работ по неразрушающей диагностике канатов оттяжек и узлов крепления на АМС в г. Ясный*. — М.: ООО «ИНТРОН ПЛЮС», 2013. — 24 с.

vvolokhovskiy@intron.ru

Материал поступил в редакцию 12 июля 2017 г.

«Bezopasnost Truda v Promyshlennosti»/ «Occupational Safety in Industry», 2017, № 10, pp. 33–39.
DOI: 10.24000/0409-2961-2017-10-33-39

Technical Diagnostics of Guy Wires of Antenna Mast Structures

Information about the Author

V.Yu. Volokhovskiy, Cand. Sci. (Eng.), Lead Specialist,
vvolokhovskiy@intron.ru

A.N. Vorontsov, Cand. Sci. (Eng.), Lead Specialist

A.V. Zhirnov, Lead Specialist

A.R. Rudyak, Engineer

INTRON PLUS, Ltd., Moscow, Russia

Abstract

Monitoring of the technical state of steel ropes of guy wires is important for ensuring safety requirements of the antenna mast structures (AMS) operating. Practical application of magnetic-flaw detection method for diagnostics of steel ropes of guy wires of AMS is considered in the article. Brief description of basic physics of used testing method is given. The method is based on the registration of fluctuations of the magnetic flaw distributions by the Hall effect sensors. Magnetic flaw is caused by the loss of the rope cross section of metal area during operation due to corrosion and the appearance of local defects such as wire breaks from the acting static and dynamic loads. The description of structures and components of the used diagnostic equipment — measuring instrument of the steel ropes wear (flaw detector) INTROS — as well as technology of performing the diagnostics of AMS guy wires are given.

Efficiency of the applied technology of monitoring of technical state of steel ropes of guy wires is illustrated by the results of diagnostics of two objects in the «Orenburg ORTPTs», the branch of FSUE Russian Television and Radio Broadcasting Network (RTRS). The life-time of the masts guy wire ropes in Yasnny and Kuvandyk exceeded 40 years, therefore a problem of the operational lifetime extension longer than the standard service life was urgent. According to the results of diagnostics, some of these ropes were considered as suitable for further operation. On the mast in Yasnny, the rejected operational defects in two ropes of the first and third levels of northeastern guy wires were detected. The defects were diagnosed as broken wires and the rope core. These ropes are considered as unusable for further operation and subjected to replacement.

Key words: antenna mast structures, magnetic-flaw detection method, steel ropes of guy wires, diagnostics of parts with distributed and local defects, technical condition, residual bearing capacity.

References

1. *GOST 18353—79. Kontrol nerazrushayushchiy. Klassifikatsiya vidov i metodov* (GOST 18353—79. Non-destructive testing. Classification of species and methods). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/gost-18353-79> (accessed: July 10, 2017).
2. *Nerazrushayushchiy kontrol: Spravochnik. V 8 t. T. 6* (Non-destructive Testing: Handbook. In 8 books. Book 6). Moscow: Mashinostroenie, 2006. 842 p.
3. *RD-03-348—00. Metodicheskie ukazaniya po magnitnoy defektoskopii stal'nykh kanatov. Osnovnye polozheniya* (RD-03-348—00. Methodical instructions for magnetic flaw detection of steel ropes. Basic provisions). *Promyshlennaya bezopasnost pri ekspluatatsii gruzopodemnykh kranov: Sb. dok* (Industrial Safety at Operation of Climbing Cranes: Collection of Documents). Ser. 10. Iss. 7. 4-e izd., ispr. Moscow: ZAO NTTs PB, 2017. pp. 14—35.
4. *ASTM E1571—11*. Standard practice for electromagnetic examination of ferromagnetic steel wire rope. ASTM Book of Standards. Vol. 03.03. West Conshohocken: ASTM International, 2011. Available at: <https://www.astm.org/Standards/E1571.htm> (accessed: July 10, 2017).

5. ISO 4309:2010. Cranes — Wire ropes — Care, Maintenance, Installation, Examination and Discard. Berlin: Beuth Verlag, 2010. Available at: <https://www.iso.org/standard/43597.html> (accessed: July 10, 2017).

6. Gronau O., Belitsky S., Sukhorukov V. NDT of steel ropes with magnetic flaw detectors: documentation and interpretation of test results. Proceedings of the 15th World Conference on NDT. Roma, 2000. pp. 15–21.

7. Sukhorukov V. Steel wire ropes NDT: new instruments. Proceedings of the 6th International Conference of the Slovenian Society for Non-destructive Testing. Portorož, 2001. pp. 225–230.

8. Sukhorukov V.V., Slesarev D.A., Vorontsov A.N. Electromagnetic inspection and diagnostics of steel ropes: technology, effectiveness and problems. Materials Evaluation. 2014. Vol. 72. № 8. pp. 1019–1027.

9. Belitskiy S.V., Kasimov G.A., Sukhorukov V.V. Defectoscope of steel ropes INTROS. *V mire nerazrushayushchego kontrolya = NDT World*. 2006. № 2. pp. 21–23.

10. *Magnitnyy defektoskop INTROS* (Magnetic Flaw Detector INTROS). Available at: <http://www.intron.ru/ru/pribory/intros/> (accessed: July 10, 2017).

11. Feyrer K. Wire Ropes: Tension, Endurance, Reliability. Berlin: Springer-Verlag, 2007. 326 p.

12. Vorontsov A.N., Slesarev D.A., Volokhovskiy V.Yu. Forecasting the individual resource of steel ropes. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2009. № 12. pp. 68–73.

13. Vorontsov A., Volokhovskiy V., Slesarev D. Combined approach to damaged wire ropes life-time assessment based on NDT results and rope mechanics. Journal of Physics: Conference Series. 2011. Vol. 305. Available at: <http://iopscience.iop.org/1742-6596/305/1/012114> (accessed: July 10, 2017).

14. Volokhovskiy V.Y., Vorontsov A.N., Sukhorukov V.V., Tsukanov V.V., Shkaptsov V.A., Artemev M.S., Chernetsov V.V. Condition assessment of conductors and ground wires of overhead lines using non-destructive testing based on magnetic flux measurements. *Cigre Science & Engineering*. 2016. № 6. pp. 46–54.

15. *Tekhnicheskij otchet o provedenii rabot po nerazrushayushchey diagnostike kanatov ottyazhek i uzlov krepleniya na AMS v g. Yasnyy* (Technical Report on the Performance of Works on Non-destructive Diagnostics of Ropes of Guy Wires and Attachment Points on the AMS in Yasny town). Moscow: OOO «INTRON PLYUS», 2013. 24 p.