

# Оценка индивидуального ресурса оттяжек антенно-мачтовых сооружений на основании данных магнитной дефектоскопии



**А.Н. Воронцов,**  
канд. техн. наук, вед.  
сотрудник,  
avorontsov@intron.ru



**В.Ю. Волоховский,**  
канд. техн. наук,  
вед. сотрудник

ООО «ИНТРОН ПЛЮС», Москва, Россия

Рассматриваются два подхода к оценке прочности и остаточного ресурса канатов оттяжек антенно-мачтовых сооружений с использованием данных оперативной магнитной диагностики. Оценка прочности проводится по обобщенному силовому критерию и по напряженному состоянию структурных элементов каната с измеренными дефектами. Индивидуальный ресурс определяется по изменению текущего запаса прочности (несущей способности) оттяжки в процессе эксплуатации. Показано, что расчет прочности по напряжениям дает консервативные оценки ресурса, идущие в запас по надежности. На основании полученных результатов сформулированы рекомендации, касающиеся содержания заключения о техническом состоянии контролируемых оттяжек и действиях обслуживающего персонала.

**Ключевые слова:** антенно-мачтовое сооружение, оттяжка, стальной канат, магнитная дефектоскопия, потеря сечения, обрыв проволоки, коэффициент запаса, несущая способность, ресурс.

DOI: 10.24000/0409-2961-2017-11-36-41

## Введение

Конечная цель дефектоскопии промышленных объектов состоит в оценке их текущих эксплуатационных характеристик. В случае стальных канатов оттяжек антенно-мачтовых сооружений (АМС) подобными характеристиками выступают несущая способность (прочность) и индивидуальный остаточный ресурс (остаточный ресурс), а именно срок службы каната от момента его инспекции до достижения предельного состояния [1].

Источником информации для прогноза остаточного ресурса служат данные текущего (оперативного) поиска дефектов, которые накапливаются в результате наблюдений и измерений во время эксплуатации. Для стальных канатов подобная диагностическая информация может быть получена методом магнитной дефектоскопии в виде количественного описания обнаруженных дефектов [2]. В статье рассматривается методика оценки остаточной прочности и ресурса оттяжек АМС по диагностическим показателям износа, полученным методом измерения магнитных потоков рассеяния.

### Запасы прочности по нагрузке и напряжениям

Стальные канаты оттяжек АМС, работающие на растяжение, подбираются по сертифицированному разрывному усилию  $F$  из условия  $F \geq \max P[n]$ , где  $\max P$  — максимальное проектное расчетное натяжение каната;  $[n]$  — нормативный коэффициент запаса прочности [3]. Разрывное усилие  $F$  («агрегатная»

прочность каната в целом) определяется умножением суммарного разрывного усилия прямолинейных проволок-стержней на коэффициент  $k = 0,83 \div 0,87$ , который приближенно учитывает винтовую структуру каната. Суммарное разрывное усилие проволок каната и разрывное усилие каната в целом указываются в ГОСТах на канаты и в сертификатах заводоизготовителей.

Оценка прочности каната оттяжки может быть сделана по нагрузке и (или) по напряжениям.

Коэффициент запаса прочности по нагрузке определяется отношением предельного натяжения  $P_u$  к рабочему натяжению каната  $P$

$$n_p = P_u / P. \quad (1)$$

Предельное натяжение  $P_u$  является аналогом разрывного усилия  $F$  в нормативном критерии подбора нового каната.

В процессе эксплуатации АМС прочность канатов оттяжек снижается вследствие накопления в проволоках различного рода повреждений. Реальный запас прочности рабочего каната с дефектами определяется отношением

$$\tilde{n}_p = \tilde{P}_u / P. \quad (2)$$

Здесь, по аналогии с (1), усилие  $\tilde{P}_u$  является критическим для изношенной в той или иной степени структуры каната.

При расчете по напряжениям прочность каната характеризуется коэффициентом запаса

$$n_{\sigma} = \sigma_u / \max \sigma, \quad (3)$$

где  $\sigma_u$  — предел прочности на растяжение (временное сопротивление, маркировочная группа) материала проволоки;  $\max \sigma$  — эквивалентное напряжение в наиболее нагруженной проволоке при сочетании в ней деформаций однородного растяжения, изгиба и кручения.

Соответствующий коэффициент запаса рабочего каната с дефектами вводится как

$$\tilde{n}_{\sigma} = \sigma_u / \max \tilde{\sigma}, \quad (4)$$

где  $\max \tilde{\sigma}$  — максимальное эквивалентное напряжение среди всех оставшихся целых (или частично поврежденных) проволок.

#### Сравнение двух подходов к оценке прочности канатов оттяжек по данным дефектоскопии

Магнитный дефектоскоп фиксирует два типичных вида износа каната оттяжек АМС: потерю сечения по металлу вследствие коррозии, истирания проволок и т.п., а также локальные дефекты (обрывы проволок).

Для оперативного силового контроля прочности каната с дефектами может быть использован упрощенный метод оценки коэффициента запаса  $\tilde{n}_p$  по следующей схеме:

по дефектограммам определяется сечение каната с наиболее неблагоприятным сочетанием указанных типов дефектов;

в выбранном опасном сечении вычисляется суммарная процентная потеря площади по металлу  $\Delta S_{\Sigma}$  (при этом оборванными считаются проволоки внешнего слоя прядей);

оценивается относительная остаточная прочность сечения

$$\eta = 1 - \Delta S_{\Sigma} / 100; \quad (5)$$

в предположении, что  $\tilde{P}_u = \eta P_u$ , на основании определений (1) и (2) оценивается коэффициент запаса

$$\tilde{n}_p = \eta n_p. \quad (6)$$

Следует иметь в виду, что показания дефектоскопа дают лишь обобщенные характеристики износа, т.е. конкретное распределение дефектов по прядям и проволокам остается неизвестным. Зависимость прочности от картины износа приходится анализировать статистическим моделированием расположения дефектов в каждом сечении каната после обработки соответствующих дефектограмм. Выборочные реализации представляют случайное количество оставшихся целых проволок или несущих

фрагментов проволок в прядях, которые и определяют агрегатные коэффициенты жесткости поврежденного каната. Подобный подход требует анализа прочности конструкции каната с точки зрения напряженного состояния его элементов с показателем запаса прочности (4).

Расчеты по теории стальных канатов [4, 5] показывают, что напряжения в проволоках распределены неравномерно по сечению канатов, причем тем заметнее, чем сложнее их конструкции. Наиболее напряженными являются центральные проволоки сердечников. После расплетения отбракованных оттяжек установлено, что чаще всего рвутся проволоки именно сердечников. Анализ диаграмм деформирования канатов в крупном масштабе свидетельствует, что первые проволоки обрываются при меньшей нагрузке, чем при предельном значении  $\tilde{P}_u$ , которое соответствует разрушению каната в целом. Дополнительным фактором, влияющим на агрегатную разрывную прочность, выступает неоднородное распределение дефектов по прядям и слоям проволок в прядях [6]. Перечисленные особенности деформирования и разрушения канатов оттяжек могут быть описаны на основании анализа напряженного состояния всех структурных элементов.

Коэффициент запаса по напряжениям  $n_{\sigma}$ , будучи меньше коэффициента запаса по нагрузке  $n_p$ , косвенно учитывает влияние на прочность изменчивости свойств материала, случайного разброса реальных нагрузок (в том числе, динамических) относительно проектного значения  $P$ , условий закрепления оттяжки, ограничений расчетной модели, погрешностей измерения и обработки данных диагностики и др. Руководствуясь приведенными выводами, методика оценки остаточного ресурса канатов оттяжек АМС с использованием данных дефектоскопии разработана на основе расчета по напряжениям. Далее с учетом этого замечания индекс  $\sigma$  у всех показателей опущен.

#### Принципы оценки прочности и остаточного ресурса стальных канатов с дефектами

Последовательность операций прочностного расчета сводится к следующим шагам. По теории стальных канатов определяются показатели прочности трех моделей каната: целого без дефектов, каната с заданным распределением потери сечения  $\Delta S$  и каната с заданным числом  $A$  локальных дефектов (обрывов проволок). В механической модели каната учитывается способность оборванных проволок воспринимать натяжение при удалении от места обрыва. Влияние множественных обрывов на прочность каната в заданном сечении оценивается с помощью принципа суперпозиции.

Для канатов с дефектами проводится статистическое моделирование распределения диагностических показателей  $\Delta S$  и  $A$  по проволокам и прядям в каждом сечении каната на контролируемом участ-

ке. На основе полученных выборочных реализаций независимо определяются статистические средние оценки коэффициентов запаса по напряжениям  $\langle n_{\Delta S} \rangle$  и  $\langle n_A \rangle$ .

Относительными показателями снижения прочности сечения каната, ослабленного, с одной стороны, частичной потерей площади по металлу  $\Delta S$ , с другой — обрывами проволок числом  $A$ , являются параметры

$$\chi_{\Delta S} = 1 - \frac{\langle n_{\Delta S} \rangle}{n};$$

$$\chi_A = 1 - \frac{\langle n_A \rangle}{n}.$$

Они соответствуют наиболее вероятным распределениям дефектов для измеренных величин  $\Delta S$  и  $A$ . Здесь  $n$  — коэффициент запаса целого (бездефектного) каната.

Показатели снижения прочности  $\chi_{\Delta S}$  и  $\chi_A$  определяются независимо. Результирующая потеря прочности  $\chi(x)$  в сечении каната с продольной координатой  $x$  оценивается как мера суммарного повреждения от двух разнородных причин

$$\chi(x) = \chi_{\Delta S}(x) + \chi_A(x).$$

Параметр остаточной прочности каната с дефектами вводится как

$$\eta(x) = 1 - \chi(x).$$

Данный показатель аналогичен по смыслу прямой оценке (5) остаточной прочности в упрощенной методике расчета по нагрузкам.

В качестве характеристики технического состояния сечения рабочего каната с координатой  $x$  принимается обобщенный показатель прочности

$$\tilde{n}(x) = \eta(x)n. \quad (7)$$

За коэффициент запаса прочности рабочего каната при его наработке  $t$  принимается минимальное значение параметра (7) на контролируемом участке. Условие надежного функционирования каната выражается требованием

$$\min_x \tilde{n}(x, t) \geq n_*. \quad (8)$$

Здесь  $n_*$  — предельно допустимый минимальный запас прочности (живучести) (допустимый запас прочности), который отражает приемлемый риск эксплуатации оттяжки с учетом износа. Он назначается исходя из практического опыта или согласно нормативным показателям дефектности [7–9]. Нарушение условия (8) означает отказ каната. Под отказом понимается ситуация, когда канат с дефектами теряет работоспособность, и оттяжка требует замены.

Задачи прогнозирования работоспособности и долговечности конструкций, как правило, имеют вероятностный характер [1]. Однако из-за отсутствия статистической информации о предельном состоянии канатов оттяжек АМС в конкретных условиях, а также априорных вероятностных оценок механических свойств и нагрузок в статье используется детерминистический прогноз остаточного ресурса [10]. Теоретический прогноз эксплуатационных возможностей каната на основе анализа его прочностной истории сводится к ответам на следующие вопросы: какой остаточный ресурс каната ожидается при текущей наработке  $t$ ; прекращать или продолжать эксплуатацию каната при полученной оценке его остаточного ресурса; если продолжать, то для какого значения наработки необходимо проводить следующее диагностирование и какой при этом ожидается коэффициент запаса  $\tilde{n}$ ?

Применяемый алгоритм прогноза ориентируется на среднюю скорость снижения прочности каната, интервалы между инспекциями, характер изменения скорости деградации каната, близость коэффициента запаса  $\tilde{n}$  к допустимому значению  $n_*$  и ряд других факторов, которые учитывают ближайшую прочностную историю и текущий запас прочности [11].

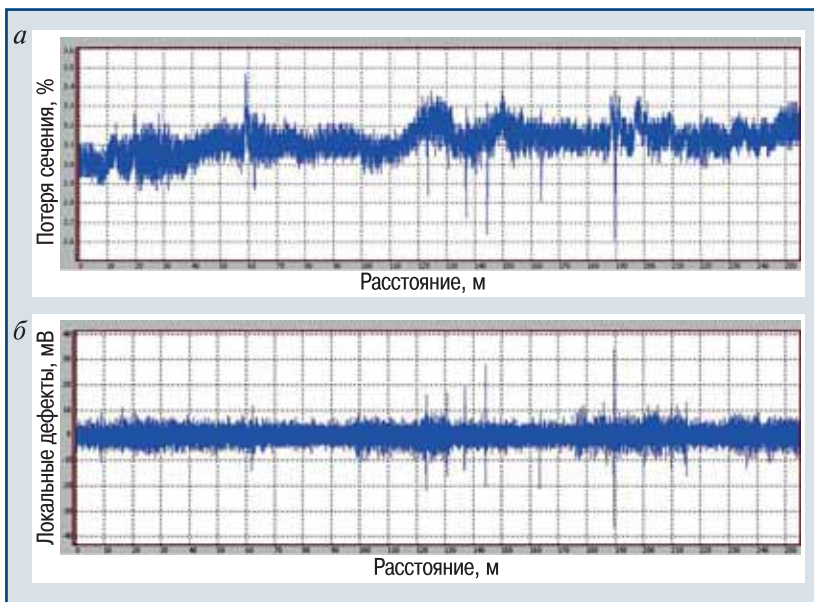
### Пример расчета остаточного ресурса оттяжек АМС

Остаточный ресурс определялся для канатов пяти ярусов оттяжек северного направления АМС (г. Кувандык) по данным трех инспекций, которые проведены 11.08.2013, 29.09.2014 и 16.09.2015 дефектоскопом ИНТРОС с магнитной головкой МГ24-64. Расчетные данные о разрушающих нагрузках канатов в целом взяты из каталога стальных канатов ГОСТ 7669—80 для маркировочной группы проволок 1370 МПа [12]. Оценки коэффициентов запаса прочности и остаточного ресурса выполнены для проектных расчетных усилий в оттяжке при наиболее неблагоприятном сочетании нагрузок. Коэффициенты запаса новых (бездефектных) канатов относятся к 1979 г., когда мачта была введена в эксплуатацию.

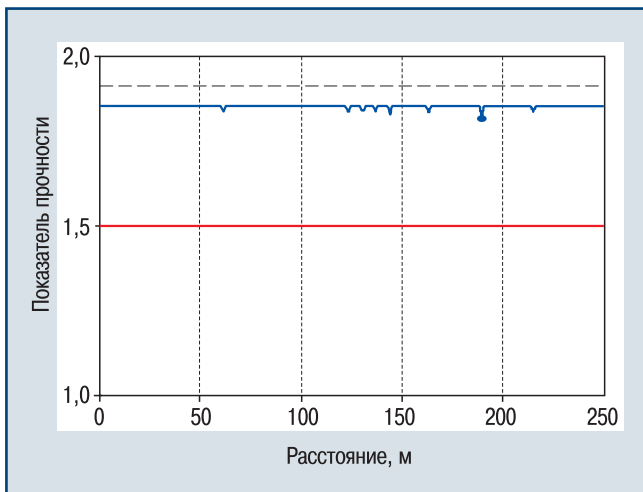
Наиболее изношенным оказался один из канатов пятого яруса. В 2013 г. на контролируемой длине 254,4 м выявлены следующие дефекты: по одному обрыву на отметках 62,2; 123,5; 130,8; 163,3 и 215,1 м; обрывы двух проволок на отметке 144,4 м и обрыв трех проволок на отметке 189,7 м. За указанный период контроля число обрывов не увеличилось, но максимальная частичная потеря сечения изменилась с 3,2 до 3,9 % на участке каната с тремя обрывами.

На рис. 1, а, б приведены дефектограммы соответственно потери сечения и локальных дефектов, полученные в ходе инспекции 29.09.2014 на канате пятого яруса оттяжек северного направления.

На рис. 2 показано соответствующее распределение показателя прочности по напряжениям  $\tilde{n}$  на



▲ Рис. 1. Дефектограммы потери сечения и локальных дефектов каната пятого яруса оттяжек северного направления  
 ▲ Fig. 1. Defectograms of section loss and local defects of the rope of the fifth tier of guy lines of the northern direction



▲ Рис. 2. Распределение показателя прочности на участке контроля каната пятого яруса оттяжек северного направления  
 ▲ Fig. 2. Distribution of the strength indicator at the control section of the rope of the fifth tier of guy lines of the northern direction

участке контроля каната пятого яруса оттяжек северного направления. Минимальное значение 1,82, принимаемое за коэффициент запаса остаточной прочности каната оттяжки, имеет место в сечении с координатой 189,7 м (обозначено кружком). Пунктирной линией отмечен запас прочности нового каната, равный 1,91, согласно проектному расчету. Красная линия соответствует принятому значению допустимого запаса прочности  $n_*$  оттяжки с дефектами.

В целях сравнения остаточный ресурс рассчитывают с использованием двух вышеупомянутых подходов.

В табл. 1 содержатся оценки, полученные по структурной механической модели стального каната, т.е. по напряжениям, при различных значениях допустимого запаса прочности  $n_*$ . Расчеты сделаны с использованием программного обеспечения

RopeStrength, которое зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ от 24.09.2009, № 2009615284. На снижение запаса остаточной прочности каната пятого яруса после третьей инспекции повлияло статистическое моделирование распределения по проволокам измеренной потери сечения (3,9 %). Выборочный износ центральных проволок сильнее сказывается на потере прочности, чем аналогичный износ на периферии сечения, поэтому осредненный запас прочности оказывается заниженным.

Для наиболее напряженного каната пятого яруса выполнены два расчета остаточного ресурса: консервативный — на допустимый запас прочности 1,5 (результат — 1,6 года) и рискованный — на допустимый запас прочности 1,3 (результат — 4,2 года).

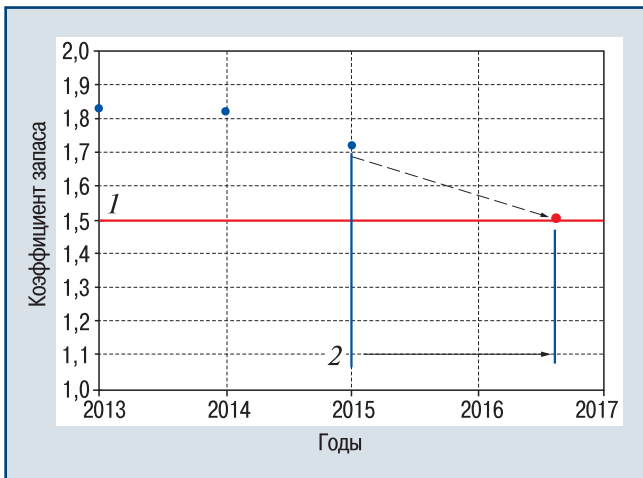
На рис. 3 (здесь 1 — допустимый запас прочности; 2 — остаточный ресурс 1,6 года) представлена схема расчета остаточного ресурса. Проиллюстрирован консервативный прогноз методом среднеквадратичной экстраполяции коэффициента запаса остаточной прочности на допустимое значение  $n_* = 1,5$ .

Таблица 1

Ярус (диаметр каната)	Проектное расчетное усилие в оттяжке, Н	Коэффициенты запаса остаточной прочности по нагрузке по годам				Допустимый запас прочности каната	Остаточный ресурс, лет
		1979	2013	2014	2015		
I (45,5)	224 020	4,48	4,31	4,30	4,29	3,0	Более 100
II (45,5)	338 000	2,97	2,87	2,86	2,84	2,5	17
III (45,5)	394 100	2,54	2,38	2,37	2,35	2,0	15
IV (45,5)	393 000	2,55	2,45	2,44	2,43	2,0	37
V (52,0)	665 300	1,91	1,83	1,82	1,72	1,5*	1,6*
	665 300	1,91	1,83	1,82	1,72	1,3**	4,2**

\* Консервативный расчет.

\*\* Рискованный расчет.



▲ Рис. 3. Схема расчета остаточного ресурса  
▲ Fig. 3. Scheme of residual resource calculation

Точками отмечены расчетные значения (см. табл. 1), равные соответственно 1,83; 1,82; 1,72.

В табл. 2 приведены результаты вычисления остаточного ресурса по упрощенной схеме расчета (5), (6).

Ярус (диаметр каната)	Проектное расчетное усилие в оттяжке, Н	Коэффициенты запаса остаточной прочности по нагрузке по годам				Допустимый запас прочности каната	Остаточный ресурс, лет
		1979	2013	2014	2015		
I (45,5)	224 020	4,82	4,64	4,63	4,62	3,0	Более 100
II (45,5)	338 000	3,20	3,10	3,09	3,08	2,5	58
III (45,5)	394 100	2,74	2,57	2,56	2,53	2,0	17,5
IV (45,5)	393 000	2,75	2,64	2,63	2,62	2,0	62
V (52,0)	665 300	2,15	2,04	2,03	2,02	2,0	2,0

Как отмечено выше, расчет по напряжениям дает заниженные оценки безопасного срока службы оттяжек с дефектами, идущие в запас по надежности. Следующую инспекцию оттяжек этой мачты рекомендовано провести в 2017 г. К середине 2017 г. замена какой-либо оттяжки не проводилась.

При составлении заключения о дефектоскопии каната оттяжки АМС и формулировании выводов-рекомендаций специалист-дефектоскопист анализирует техническое состояние каната по следующим критериям: коэффициент запаса остаточной прочности на участке контроля в сравнении с допустимым значением; текущий запас остаточной прочности в сопоставлении с аналогичными показателями за предшествующий период диагностики; относительная прочность каната — отношение текущего коэффициента запаса остаточной прочности к аналогичному показателю нового каната; тенденция снижения прочности каната на протяжении нескольких инспекций в количественном и качественном смысле.

Порядок действий на будущее определяется следующими факторами: остаточный ресурс каната; рекомендуемая наработка к очередной инспекции и ожидаемый при этом запас прочности.

**Заключение**

Полученные результаты свидетельствуют, что расчет по напряжениям дает более консервативные оценки остаточного ресурса, чем расчет по нагрузкам. При назначении допустимого запаса прочности каната остаточный ресурс возрастает, однако объективно увеличивается и риск прогноза.

Расчетные прогнозы остаточного ресурса каната носят рекомендательный характер. Вместе с тем, наряду с картиной изменения прочности, они дают дополнительную информацию, которая может быть полезной для службы эксплуатации при принятии окончательного решения о работоспособности оттяжки и планируемых ремонтно-восстановительных мероприятиях.

**Список литературы**

1. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. — М.: Машиностроение, 1984. — 312 с.
2. Sukhorukov V., Slesarev D., Vorontsov A. Electromagnetic inspection and diagnostics of steel ropes: technology, effectiveness and problems// Materials Evaluation. — 2014. — Vol. 72. — № 8. — P. 1019–1027.

Таблица 2

3. СП 16.13330.2011. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23–81\*. — М.: Минрегион России, 2011. — 178 с.
4. Глушко М.Ф. Стальные подъемные канаты. — Киев: Техника, 1966. — 328 с.
5. Малиновский В.А. Стальные канаты. В 2 ч. — Одесса: Астропринт, 2001. — Ч. 1. — 188 с.
6. The effect of wire break distribution on the breaking strength if a wire rope/ J.M. Teissier, I.M.L. Ridge, J.J. Evans, M. Fournier// OIPEEC Conference. — La Rochelle, 2017. — P. 267–293.
7. РД РОЭСК 012–97. Канаты стальные. Контроль и нормы браковки. — М.: РОЭСК, 1997. — 49 с.
8. Non-destructive testing of steel wire ropes and their discard criteria/ S. Kashyap, G. Laxminarayana, S. Tewathri, A. Sinha// The 8th International Conference on Non-Destructive Testing in Engineering. — Portoroz, 2005. — P. 229–235.
9. Weischedel H.R. Wire Rope Roughness (WRR), a new indicator for the quantitative characterization of wire rope deterioration// OIPEEC Conference. — Oxford, 2013. — P. 55–76.
10. 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. 35. — 9 p.
11. Prediction of operating time of steel wire ropes using magnetic NDT data/ A. Vorontsov, V. Volokhovskiy, J. Halonen, J. Sunio// OIPEEC Conference. — Johannesburg, 2007. — P. 145–154.
12. ГОСТ 7669–80. Канаты стальные. Сортамент. — М.: Изд-во стандартов, 1996. — 192 с.

avorontsov@intron.ru

Материал поступил в редакцию 12 июля 2017 г.

«Bezopasnost Truda v Promyshlennosti»/ «Occupational Safety in Industry», 2017, № 11, pp. 36–41.  
DOI: 10.24000/0409-2961-2017-11-36-41

## Assessment of the Individual Resource of Guy Lines of Antenna Mast Structures on the Basis of Magnetic Defectoscopy Data

### Information about the Author

A.N. Vorontsov, Cand. Sci. (Eng.), Lead Specialist, avorontsov@intron.uu  
V.Yu. Volokhovskiy, Cand. Sci. (Eng.), Lead Specialist  
INTRON PLUS, Ltd., Moscow, Russia

### Abstract

Two approaches to assessment of strength and individual residual resource of guy lines steel ropes of antenna mast structures with the use of data of the operative diagnostics by the method of Hall effect are considered. The principles of strength assessment of the ropes with defects in the presence of two diagnostic indicators are stated (the distributed loss of the bearing rope section on metal due to corrosion and local breaks of wires). As mechanical model the structural theory of steel ropes is used, which describes their design as the system with two generalized degrees of freedom (linear axial deformation, and the twist angle in relation to the longitudinal axis). Dependence of strength on the picture of wear is analyzed by means of statistical modeling of defects location in each section of the rope after processing of the received defectograms. Individual residual resource is defined by the change history of the current margin of safety (bearing capacity) of the guy lines in relation to maximum permissible minimum margin of safety (survivability) of partially worn-out structure. The example of calculation is given concerning the individual residual resource of fiveguy lines of the retransmitting mast according to the data of three inspections with a year interval. For the most intense rope it is shown that the strength calculation gives the conservative estimates of the resource, which will be referred to reliability margin. On the basis of the received results the recommendations are formulated on the contents of the conclusion about technical condition of the controlled guy lines and the actions of service personnel concerning further operation.

**Key words:** antenna mast structure, guy rope, steel rope, magnetic defectoscopy, loss of section, broken wire, margin of safety, bearing capacity, resource.

### References

1. Bolotin V.V. *Prognozirovanie resursa mashin i konstrukcij* (Forecast of the Resource of Machines and Structures). Moscow: Mashinostroenie, 1984. 312 p.
2. Sukhorukov V., Slesarev D., Vorontsov A. Electromagnetic inspection and diagnostics of steel ropes: technology, effectiveness and problems. *Materials Evaluation*. 2014. Vol. 72, № 8. pp. 1019–1027.
3. *SP 16.13330.2011. Stalnye konstrukcii. Aktualizirovannaja redakcija SNIIP II-23—81\** (SP 16.13330.2011. Steel Structures. Updated Edition of SNIIP II-23—81\*). Moscow: Minregion Rossii, 2011. 178 p.
4. Glushko M.F. *Stalnye podemnye kanaty* (Steel Hoisting Ropes). Kiev: Tehnika, 1966. 328 p.
5. Malinovskij V.A. *Stalnye kanaty* (Steel Ropes). V 2 parts. Odessa: As-troprint, 2001. Pt. 1. 188 p.
6. Teissier J.M., Ridge I.M.L., Evans J.J., Fournier M. The effect of wire break distribution on the breaking strength of a wire rope. *OIPEEC Conference*. La Rochelle, 2017. pp. 267–293.
7. *RD ROJeSK 012—97. Kanaty stalnye. Kontrol i normy brakovki* (RD ROESK 012 — 97. Steel Ropes. Control and Norms of Rejection). Moscow: ROJeSK, 1997. 49 p.
8. Kashyap S., Laxminarayana G., Tewathri S., Sinha A. Non-destructive testing of steel wire ropes and their discard criteria. The 8th International Conference on Non-Destructive Testing in Engineering. Portoroz, 2005. pp. 229–235.
9. Weischedel H.R. Wire Rope Roughness (WRR), a new indicator for the quantitative characterization of wire rope deterioration. *OIPEEC Conference*. Oxford, 2013. pp. 55–76.
10. 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. 35. 9 p.
11. Vorontsov A., Volokhovskiy V., Halonen J., Sunio J. Prediction of operating time of steel wire ropes using magnetic NDT data. *OIPEEC Conference*. Johannesburg, 2007. pp. 145–154.
12. *GOST 7669—80. Kanaty stalnye. Sortament* (GOST 7669 — 80. Steel Ropes. Assortment). Moscow: Izd-vo standartov, 1996. 192 c.