DOI: 10.17117/na.2015.09.695

<http://ucom.ru/doc/na.2015.09.695.pdf>

Поступила (Received): 29.09.2015

Дёмин Ю.В., Микитинский М.С. Высокочастотный коррозиметр подземных креплений опор линий напряжением 330 кВ

Dyomin Y.V., Mikitinskiy M.S.
High frequency corrosimeter for underground
bindings of 330 kV lines supports

В статье рассматривается явление скин-эффекта для контроля коррозии анкерных креплений опор высоковольтных линий. Статья содержит расчёт электрического тока в проводнике круглого сечения и T-образную мостовую схему измерительного прибора. В статье анализируются результаты полевых испытаний опытного образца коррозиметра. Статья предназначена для работников электросетевых предприятий и разработчиков измерительной аппаратуры

Ключевые слова: высоковольтная линия, подземные крепления, контроль коррозии

The article considers skin phenomenon for corrosion control of high voltage lines anchor bindings. The article contains electric current evaluation for round bar and T-bridge scheme of measurement apparatus. The article analysis results of experience model field examinations. The article intends for electric network enterprises workers and elaborate measurement apparatus workers

Key words: high voltage line, underground bindings, corrosion control

Дёмин Юрий Васильевич

Доктор технических наук, профессор
Сибирский Государственный Университет водного транспорта
г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33

Dyomin Yuriy Vasilyevich

Doctor of Technical Sciences, Professor
Siberian State University of water transport
Novosibirsk, Schetinkin str., 33

Микитинский Марк Самойлович

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Сибирский научно-исследовательский институт энергетики
г. Новосибирск, ул. Кленовая, 2

Mikitinskiy Mark Samoylovich

Candidate of Technical Sciences, Senior research worker
Siberian research institute of power engineering
Novosibirsk, Klenovaya str., 2

Для высоковольтных линий электропередачи обычно установлен нормативный срок службы в 50 лет. Однако уже через 18 – 30 лет эксплуатации наблюдаются «выдёргивания» U-образного болта, приводящие нередко к падению самой опоры. Причиной аварий, как было установлено, являются коррозионные повреждения анкерных креплений оттяжки опоры.

С точки зрения ранней диагностики косвенные оценки состояния узла крепления оттяжек опор малоэффективны. Визуальная проверка натяжения тросов крепления и различные способы исследования поверхности грунта во-

круг опоры не затрагивают глубинных слоёв, где находится обследуемый анкерный узел. При проектировании линий производятся вертикальные зондирования с определением удельного сопротивления грунта на различной глубине. Однако прямой зависимости между коррозией металла и свойствами грунтовой среды пока не установлено. Неразрешимой остаётся проблема влияния на процесс коррозии заводских дефектов и различных нарушений в ходе строительства.

Вскрытия анкерных креплений в Северокавказском регионе показали, что причина выдергивания U-образного болта – в коррозионном повреждении анкерной петли. При этом в месте стыковки петли с болтом наблюдались такие же повреждения на самом болте. Поскольку «хвосты» U-образного болта выходят на поверхность, можно подключить измерительный прибор, не производя откопок.

Целью и предметом проведённых исследований является определение убыли сечения в нижней части анкерного болта вследствие замещения металла продуктами коррозии. В качестве способа коррозионного контроля выбран метод электрического сопротивления, который применялся в диагностике трубопроводов с нефтегазовыми продуктами.

Электрический ток в поверхностном слое проводника

Измерение на постоянном токе сопротивления датчиков, помещённых в агрессивную среду, имеет серьёзный недостаток. При размере сечения проводящего элемента в несколько сантиметров электрическое сопротивление составляет десятые доли ома. Поскольку коррозионный процесс затрагивает не всё сечение проводника, а лишь поверхностный слой, изменение сопротивления в результате коррозии составит тысячные доли ома. Коррозионная диагностика датчиками электрического сопротивления с помощью высокочувствительных мостов позволяет определить скорость коррозии (временной ход) при непрерывном подключении датчика к измерительному прибору [1].

При определении степени коррозии (глубины поражения), если измерять электрическое сопротивление даже высокочувствительным прибором, нужный результат не может быть достигнут: контактное сопротивление при подключении измерительного прибора к объекту превышает сотые доли ома. Преодоление этой погрешности для получения приемлемого результата вынуждает обратиться к явлению скинэффекта, состоящему в том, что электрический ток высокой частоты распространяется не по всему сечению проводника, а сосредоточен вблизи поверхности.

Пусть материал проводника характеризуется удельной проводимостью γ и магнитной проницаемостью μ . Определим, какая часть тока в проводнике сосредоточена в поверхностном объёме между радиусами r и a , где a – радиус проводника (рис.1). При расчёте воспользуемся решением уравнений электромагнитного поля с учётом осевой симметрии цилиндрического проводника [2]

Как в любой электродинамической задаче, используется связка уравнений Максвелла для векторов $\vec{H}$ и $\vec{E}$:

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{\delta} = \gamma \vec{E} ; \text{rot} \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt} = -\mu \frac{d\vec{H}}{dt} . \quad (1)$$

Решение этих уравнений позволяет найти плотность электрического тока $\vec{\delta}$ в зависимости от расстояния r точки сечения от оси проводника. Из первого уравнения выразим $\text{rot} \vec{\delta} = \gamma \text{rot} \vec{E}$, откуда $\text{rot} \vec{E} = \frac{1}{\gamma} \text{rot} \vec{\delta}$, подставив во второе уравнение $\frac{1}{\gamma} \text{rot} \vec{\delta} = -\mu \frac{d\vec{H}}{dt}$, получим

$$\text{rot} \vec{\delta} = -\gamma \mu \frac{d\vec{H}}{dt} . \quad (2)$$

Рис.1. Продольная компонента δ_z плотности тока и угловая компонента H_φ магнитной напряжённости в цилиндрических координатах (r, φ, z) точки M

Мы рассматриваем проводник, длина которого значительно превышает его радиус. Кроме того, в силу осевой симметрии, отсутствует зависимость от угловой координаты φ , а в силу протяжённости проводника, отсутствует зависимость от продольной координаты z . Таким образом, в цилиндрических координатах: $\vec{\delta} = \delta_z$ и $\vec{H} = H_\varphi$. Что касается зависимости от времени (t), то в случае синусоидального тока:

$$\delta(r, t) = \delta(r) e^{j\omega t} ; H(r, t) = H(r) e^{j\omega t} \quad (3)$$

где ω – круговая частота, $j = \sqrt{-1}$.

Учитывая зависимость только от радиальной координаты r , далее её опускаем. Дифференцирование $\frac{dH}{dt}$ выделяет множитель $j\omega$, и подстановка (3) в (2) после сокращения на $e^{j\omega t}$ даёт:

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{\delta} ; \text{rot} \vec{\delta} = -j\omega \gamma \mu \vec{H} . \quad (4)$$

Произведя операцию rot во втором из этих уравнений и подставив в первое уравнение, получим:

$$\text{rot} \text{rot} \vec{\delta} = -j\omega \gamma \mu \text{rot} \vec{H} = -j\omega \gamma \mu \vec{\delta} . \quad (5)$$

По правилам векторного анализа, $\text{rot} \text{rot} \vec{\delta} = \text{grad} \text{div} \vec{\delta} - \nabla^2 \vec{\delta}$ и $\text{div} \vec{\delta} = 0$ для установившегося режима. В результате

$$-\nabla^2 \vec{\delta} = -j\omega \gamma \mu \vec{\delta} . \quad (6)$$

Поскольку продольная компонента плотности тока $\vec{\delta} = \delta_z$ зависит только от радиальной координаты

$$r \left(\frac{d\delta_z}{d\varphi} = \frac{d\delta_z}{dz} = 0 \right), \nabla^2 \delta = \frac{d^2 \delta}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\delta}{dr}, \quad (7)$$

и в результате соотношений (5), (6), (7) приходим к уравнению:

$$\frac{d^2 \delta}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\delta}{dr} = j\omega\gamma\mu\delta,$$

в котором перенесём правую часть в левую часть уравнения

$$\frac{d^2 \delta}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\delta}{dr} - j\omega\gamma\mu\delta = 0.$$

Обозначив $-j\omega\gamma\mu = q^2$, получим дифференциальное уравнение плотности тока δ :

$$\frac{d^2 \delta}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\delta}{dr} + q^2 \delta = 0. \quad (8)$$

Решение $\delta = A J_0(qr)$ представляет специальную функцию нулевого порядка, а постоянный коэффициент A можно оставить неопределённым. Применим это решение ко второму уравнению связи (4):

$$\vec{H} = \frac{1}{-j\omega\gamma\mu} \text{rot} \vec{\delta} = \frac{1}{q^2} \text{rot} \vec{\delta} \quad (9)$$

Если вектор плотности тока $\vec{\delta}$ имеет только продольную проекцию δ_z , то вектор магнитной напряжённости $\vec{H}$ имеет только угловую проекцию H_φ :

$$H_\varphi = \frac{1}{q^2} \text{rot}_\varphi \vec{\delta}_z = -\frac{1}{q^2} \frac{d\delta_z}{dr}, \quad (10)$$

где использована формула векторного анализа. Произведём дифференцирование δ_z по r , используя $\delta_z = A J_0(qr)$. В этом случае

$$\frac{d\delta_z}{dr} = A \frac{dJ_0(qr)}{d(qr)} \frac{d(qr)}{dr} = Aq \frac{dJ_0(qr)}{d(qr)}. \quad (11)$$

В теории функций показано $\frac{dJ_0(qr)}{d(qr)} = -J_1(qr)$, где $J_1(qr)$ функция первого порядка.

Подставляя (11) в (10), находим угловую проекцию магнитной напряжённости в виде:

$$H_\varphi = A \frac{1}{q} J_1(qr). \quad (12)$$

Вектор магнитного поля $H_{\varphi}(r)$, который циркулирует вдоль окружности радиуса r , связан с силой тока $I(r)$ внутри этой окружности (закон полного тока):

$$I(r) = 2\pi r H_{\varphi}(r). \quad (13)$$

Пусть, например, радиус проводника $a = 15$ мм, а внутри проводника выделим объём радиуса $r = 10$ мм. Тогда отношение токов, согласно (12), (13):

$$\frac{I(r)}{I(a)} = \frac{2\pi r H_{\varphi}(r)}{2\pi a H_{\varphi}(a)} = \frac{r J_1(qr)}{a J_1(qa)}. \quad (14)$$

(Заметим, что коэффициент q не зависит от радиуса r сечения, через которое протекает ток I). Для дальнейших расчётов модуль b функции

$$J_1(qr) = b e^{j\beta}$$

взяты из таблицы:

$r\sqrt{\omega\mu}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
b	0	0,50	1,04	1,8	3,17	5,81	10,9	20,5	39	75	145
β град	-45	-38	-17	16	54	94	133	173	214	253	294

Параметр $q = \sqrt{\omega\mu} = 630$ при частоте тока 500 герц ($\omega = 2\pi 500$), удельной проводимости стали $\gamma = 10^7$ и относительной магнитной проницаемости 10 ($\mu = 10 \times 4\pi \cdot 10^{-7}$). При $a = 15$ мм: $a\sqrt{\omega\mu} = 9,5$ – модуль функции $J_1(qa)$ равен $b = 110$; при $r = 10$ мм: $r\sqrt{\omega\mu} = 6,3$ – модуль функции $J_1(qr)$ равен $b = 14$. Подставим числовые значения в отношение токов (14):

$$\frac{I(r)}{I(a)} = \frac{10}{15} \frac{14}{110} = 0,67 \times 0,12 = 0,085 (8,5\%)$$

Этот расчёт показывает, что на частоте 500 герц в *поверхностном* слое стального проводника может быть сосредоточено более 90% всего тока, при том, что глубина объёма, примыкающего к поверхности проводника, вдвое меньше глубины *внутреннего* объёма.

Мостовой Т-образный измеритель электрических сопротивлений

При измерениях электрического сопротивления на высоких частотах стоит отдать предпочтение Т-образным мостовым схемам [3]. В этих устройствах источник сигнала на входе и индикатор напряжения на выходе имеют общую точку, к которой может быть присоединён один из полюсов измеряемого объекта. Одновременно вся измерительная цепь помещается в металличе-

ский экран, который заземляется вместе с общей точкой генератора, приёмника и объекта измерения. В таком случае «паразитные» ёмкостные утечки между измерительной цепью и экраном шунтируют выход источника и вход индикатора, оказывая влияние лишь на чувствительность, которая остаётся высокой.

Особенностью Т-образных мостов является высокая чувствительность в узких пределах параметров схемы и рабочих частот вблизи баланса моста (отсутствия напряжения на выходе). Это исключает возможность плавной настройки по частоте и создаёт необходимость применения фиксированных частот. С учётом глубины проникновения измерительного тока в исследуемый объект (5 – 10 миллиметров) выбрана частота 1,6 мегагерц.

Немаловажным достоинством выбранной схемы (рис.2) являются простые формулы для измеренного *активного* сопротивления, что существенно облегчает градуировку прибора. В общей форме уравнение баланса моста имеет вид:

$$Z_1 Z_2 + Z_4 (Z_1 + Z_2 + Z_3) = 0, \quad (15)$$

где, согласно схеме,

$$Z_1 = Z_2 = \frac{1}{j\omega C}, \quad Z_3 = R, \quad Z_4 = r + j\omega L. \quad (16)$$

Рис. 2. Электрическая схема высокочастотного коррозиметра:

***R, C – переменные резистор и конденсатор для приведения моста к балансу;
L, r – индуктивность и сопротивление начального баланса и измеряемого объекта;
m – n – точки присоединения U – образного болта***

Разделяя и приравнявая нулю вещественную и мнимую части уравнения (15) с учётом соотношений (16), получим два уравнения:

$$rR + \frac{2L}{C} = \frac{1}{\omega^2 C^2} \text{ и } \frac{2r}{\omega C} = \omega L R, \quad (17)$$

откуда, исключив r , находим, что

$$L \left(1 + \frac{\omega^2 C^2 R^2}{4} \right) = \frac{1}{2\omega^2 C}. \quad (18)$$

При частоте, меньшей 10 мегагерц ($\omega < 2\pi 10^7$), $R < 40$ ом, $C < 500$ пикофа-
рад выражение упрощается: $L = \frac{1}{2\omega^2 C}$, после подстановки L в соотношение

$\frac{2r}{\omega C} = \omega LR$ круговая частота ω и ёмкость C полностью исключаются. В результа-
те имеем простую формулу $r = \frac{R}{4}$.

Пользуясь этим свойством, можно шкалу переменного многооборотного
резистора R отградуировать непосредственно в значениях сопротивления r
измеряемого U-образного болта.

При градуировке прибора измерительные зажимы (точки $m - n$) переми-
каются медной пластиной («нулевое» сопротивление), а вся шкала сопротив-
лений содержит реперные точки 1,2,3,4 ом соответственно «эталонным» плё-
ночным резисторам этих номиналов. Далее показано, что этот диапазон ин-
терпретирует *слабую* и *сильную* коррозию, а также *отсутствие* коррозии. Пи-
тание прибора осуществляется встроенными аккумуляторами, а общий вес до-
пускает ручной перенос от опоры к опоре [4].

Электрическое сопротивление и степень коррозии (36мм болты)

В интерпретации измерений электрического сопротивления U-образных
анкерных болтов применён *статистический* подход. Была проведена серия
измерений в разных местах трассы линии напряжением 330 киловольт [5]. Из-
меренные сопротивления разделились на две группы, примерно, равного объ-
ёма: $(1,5 \pm 0,5)$ ом и $(4,0 \pm 0,5)$ ом.

Последующие откопки до уровня анкерных узлов (по 3 в каждой группе)
показали, что эти данные могут быть интерпретированы как *отсутствие* кор-
розии в первом случае и как *слабая* коррозия во втором. Кроме того, были из-
мерены сопротивления болтов на складах до начала строительства: 1,37 1,37
1,35 1,35 ом (из одной партии), 1,40 ом (из другой партии) (общая длина болта
7 метров, длина части болта при измерении 5 метров: (рис.3а). Таким образом,
отсутствие коррозии можно интерпретировать достаточно надёжно. *Слабую*
и *сильную* коррозию, исходя из наблюдений, можно интерпретировать глуби-
ной коррозионного поражения 2,5мм (рис.3б) и 5мм (рис.3в).

Рис. 3. а) U-образный болт: 2,5 м длина коррозионно-повреждённой части,
б) Слабая коррозия: 3мм глубина коррозионного повреждения,
в) Сильная коррозия: 8мм глубина коррозионного повреждения

При расчёте глубины коррозии по формуле электрического сопротивления

$$r = \rho \frac{l}{S} \quad (19)$$

принято: удельное сопротивление продуктов коррозии (окислов железа) $\rho = 5 \times 10^{-4}$ ом/м; площадь кольцевых сечений $S = 2,55 \times 10^{-4}$ м² (слабая коррозия) и $S = 4,71 \times 10^{-4}$ м² (сильная коррозия); длина коррозионно повреждённой части болта $l = 2,5$ м. В этих случаях *слабой* коррозии соответствует сопротивление 4,9 ома, *сильной* коррозии 2,5 ома. К этим сопротивлениям необходимо добавить 0,75 ома на неповреждённую часть болта.

Выводы

1. Коррозионные повреждения подземных креплений оттяжек опор высоковольтных линий затрагивают оба элемента анкерного узла: как петлю, так и болт. У – образный болт доступен для коррозионного обследования с поверхности земли, без откопок.

2. При оценке степени коррозии нижней части анкерного болта рекомендован метод электрического сопротивления. Для повышения чувствительности использовано явление поверхностного эффекта. Разработан и применён опытный образец Т-образного моста на частоту 1,6 мегагерц.

3. Проведённые исследования болтов диаметром 36 миллиметров на оттяжках опор линии 330 киловольт показали возможность интерпретации степени коррозии (глубины повреждения) электрическим сопротивлением, измеренным на высокой частоте.

Список используемых источников:

1. Коррозия и защита химической аппаратуры. Справочное руководство. Т. 1. Ленинград: Химия, 1969.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. Москва: Высшая школа, 1978. С. 143-145.
3. Герцештейн Ф.Э., Микитинский М.С., Петров В.А. Высокочастотный коррозиметр. Авт. свид. №796742 (СССР), 1981.
4. Высокочастотный коррозиметр. Техническое описание и инструкция по эксплуатации, Сибирская Ассоциация Энергетиков. Новосибирск, 1995.
5. Корогод А.А., Микитинский М.С., Морозов С.И. Оценка коррозии анкерных креплений оттяжек опор ВЛ 330 кВ. // Энергетик. 1997. № 11. С. 16-17.