

УДК 621.3.078:620.9

МЕТОД И ПРИБОР ДЛЯ ОЦЕНКИ КОРРОЗИИ АНКЕРНЫХ КРЕПЛЕНИЙ ОПОР ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ

Ю.В. Дёмин, М.С. Микитинский, А.И. Мозилов, А.А. Чураков

ФГОУ ВПО «Новосибирская государственная академия водного транспорта», г. Новосибирск

E-mail: alexander.churakov@rambler.ru

Описаны метод оценки коррозии анкерных креплений опор высоковольтных линий и его аппаратная реализация. Приводятся данные по электрическому сопротивлению 35-мм анкерных болтов на частоте 1,6 МГц.

Ключевые слова:

Коррозионное состояние опор ЛЭП, анкерные болты, оценка коррозии, высокочастотный коррозиметр.

Бурное развитие электроэнергетики, начавшееся полвека назад, привело во всех промышленно развитых странах к появлению на линиях высокого напряжения опор с оттяжками. Подземные крепления оттяжек представляют анкерное соединение U-образного болта и полукруглой петли, приваренной к стальной арматуре железобетонной плиты.

Несмотря на то, что нормативный срок службы подземных креплений, как и опоры в целом, определён в 50 лет, на некоторых линиях уже через 18–30 лет наблюдаются «выдёргивания» U-образных болтов, приводящие во многих случаях к падению самой опоры. В результате происходит нарушение энергоснабжения, и возникает необходимость внеплановых ремонтных работ. Эти весьма неприятные для эксплуатации явления присущи, как показывает статистика, таким странам, как Россия, США, Мексика, Финляндия. Причиной аварий, как было установлено, являются коррозионные повреждения анкерных креплений оттяжек на опорах высоковольтных линий (220...500 кВ).

В настоящее время применяют способы косвенных оценок состояния узла крепления оттяжек электрических опор. Визуальная проверка натяжения тросов крепления и различные способы исследования поверхности грунта вокруг опоры не затрагивают глубинных слоев, 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 «выдёргиваний» 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 проверок выбран метод электрического сопротивления, который применялся в коррозионной 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 размерах сечения проводящего элемента в несколько см² электрическое сопротивление составит десятки 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 определять 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 Ом. Преодоление этой погрешности для получения приемлемого результата вынуждает обратиться к явлению скин-эффекта, состоящему в том, что электрический ток высокой частоты распространяется не по всей глубине сечения проводника, а сосредоточен вблизи поверхности.

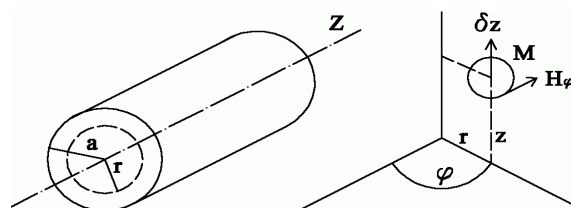


Рис. 1. Продольная компонента δ_z плотности тока и угловая компонента H_ϕ магнитной напряжённости в цилиндрических координатах (r, ϕ, z) точки M

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 напряжённости магнитного поля $\mathbf{H}$ и электрической напряжённости $\mathbf{E}$:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \delta = \gamma \mathbf{E}$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = -(d\mathbf{B} / dt) = -\mu(d\mathbf{H} / dt),$$

а после исключения вектора $\mathbf{E}$:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \delta, \text{rot } \delta = -\gamma\mu(d\mathbf{H} / dt). \quad (1)$$

Если в проводнике протекает синусоидальный ток, зависимость от времени векторов δ и $\mathbf{H}$ выражается комплексным множителем $e^{j\omega t}$ (ω – круговая частота, $j=(-1)^{1/2}$, t – момент времени):

$$\delta(r, t) = \delta(r)e^{j\omega t}, H(r, t) = H(r)e^{j\omega t}. \quad (2)$$

Отсутствие зависимости от угловой координаты φ и продольной координаты z объясняется тем, что точки проводника симметричны относительно его оси, а длина проводника значительно больше его поперечного размера. Учитывая зависимость только от радиальной координаты r , далее её опускаем. Дифференцирование $d\mathbf{H}/dt$ выделяет множитель $j\omega$, и подстановка (2) в (1) после сокращения на $e^{j\omega t}$ даёт:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \delta, \text{rot } \delta = -j\omega\gamma\mu\mathbf{H}. \quad (3)$$

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

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

По правилам векторного анализа

$$\text{rot rot } \delta = -\Delta\delta \quad (5)$$

при условии, что плотность тока на входе и выходе любого участка рассматриваемого проводника остаётся одной и той же (Δ – оператор Лапласа). Соотношения (4) и (5) дают уравнение $\Delta\delta = j\omega\gamma\mu\delta$, или, раскрывая оператор Δ в цилиндрической системе координат (зависимость от координат φ и z отсутствует), приходим к уравнению Бесселя для комплексной переменной $\delta(r)$:

$$d^2\delta / dr^2 + (1/r)(d\delta / dr) + q^2\delta = 0, (q^2 = -j\omega\gamma\mu). \quad (6)$$

Решением уравнения (6) является цилиндрическая функция нулевого порядка $J_0(qr)$, а продольная компонента плотности тока

$$\delta = \delta_z = AJ_0(qr), \quad (7)$$

где комплексную постоянную A можно оставить неопределённой. Рассмотрим второе уравнение в связке (3), откуда с учётом (6) $\mathbf{H}=(1/q^2)\text{rot}\delta$.

Поскольку $\delta=(0,0,\delta_z)$, проекция $\text{rot}\delta$ на ось φ равна $\text{rot}_\varphi\delta_z=-(d\sigma_z/dr)$. Тогда проекция вектора $\mathbf{H}$ на ось φ :

$$H_\varphi = -(1/q^2)(d\delta_z / dr). \quad (8)$$

Произведём дифференцирование δ_z по r , используя решение (7):

$$d\delta_z / dr = A[dJ_0(qr) / d(qr)][d(qr) / dr] = Aq[dJ_0(qr) / d(qr)] = -AqJ_1(qr) \quad (9)$$

(в теории цилиндрических функций показано $dJ_0(qr)/d(qr)=-J_1(qr)$, где $J_1(qr)$ – цилиндрическая функция первого порядка). Подставив производную $(d\sigma_z/dr)$ плотности тока δ_z из выражения (9) в формулу (8), получим для магнитной напряжённости:

$$H_\varphi = (A/q)J_1(qr). \quad (10)$$

Для дальнейших расчётов модуль b функции $J_1(qr)=be^{j\beta}$ взят из таблицы.

Таблица. Модуль и аргумент функции $J_1(qr)$

$r(\omega\gamma\mu)^{1/2}$	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

Используем закон полного тока $2\pi H_\varphi(r)=I(r)$ для силы тока $I(r)$ внутри окружности радиуса r ; $2\pi r H_\varphi(a)=I(a)$ для силы тока $I(a)$ внутри окружности радиуса a . Отношение токов, согласно (10):

$$I(r) / I(a) = (r/a)[J_1(qr) / J_1(qa)], \quad (11)$$

где a , например, 15 мм, r – радиус внутреннего объёма этого проводника (например, 10 мм). Параметр $(\omega\gamma\mu)^{1/2}=630$ при частоте тока 500 Гц ($\omega=2\pi\cdot 500$), удельной проводимости стали $\gamma=10^7$ и относительной магнитной проницаемости 10 ($\mu=10\cdot 4\pi\cdot 10^{-7}$). При $a=15$ мм: $a(\omega\gamma\mu)^{1/2}=9,5$ – модуль функции $J_1(qa)$ равен $b=110$; при $r=10$ мм: $r(\omega\gamma\mu)^{1/2}=6,3$ – модуль функции $J_1(qr)$ равен $b=14$. Подставим числовые значения в отношение токов (11):

$$I(r) / I(a) = (10/15) \cdot (14/110) = 0,67 \cdot 0,12 = 0,085 \text{ (8,5 \%)}.$$

Этот расчёт показывает, что на частоте 500 Гц 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.

Строго говоря, приведенный расчет справедлив для проводника с полированной поверхностью, однако последующая экспериментальная проверка показала, что ничего принципиально не меняется и в случае, если поверхность проводника изъязвлена коррозией.

Мостовой Т-образный измеритель высокочастотных сопротивлений

При измерениях электрического сопротивления на частотах выше нескольких кГц 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 измеритель-

ная цепь помещается в металлический 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 равновесия моста (отсутствие напряжения на выходе). Это исключает возможность плавной настройки по частоте и создаёт необходимость применения фиксированной частоты измерения. С учётом глубины проникновения измерительного тока в исследуемый объект (5...10 мм) выбрана частота 1,6 МГц.

Схема моста содержит генератор синусоидальных колебаний G , индикатор нуля (вольтметр) V , двоянный конденсатор переменной ёмкости C и потенциометр R (рис. 2). Катушка индуктивности L , имеющая также и небольшое активное сопротивление r , служат для начального баланса мостовой схемы. Исследуемый объект (U-образный болт) присоединяется в точках m – n последовательно с элементами моста L и r . В силу малого активного сопротивления катушки активное сопротивление ветви цепи практически полностью определяется сопротивлением U-образного болта. Тоже можно сказать и об индуктивности ветви – индуктивность болта будет пренебрежимо мала по сравнению с индуктивностью катушки и, в основном, будет определяться последней.

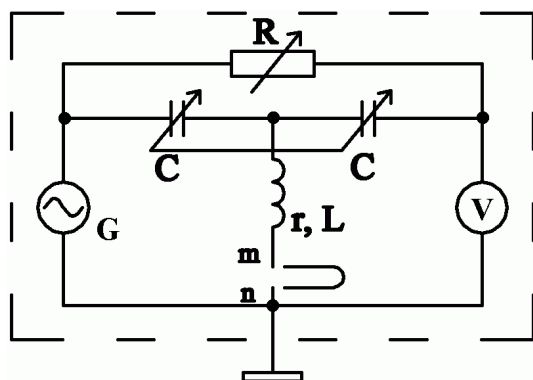


Рис. 2. Электрическая схема высокочастотного коррозиметра

Немаловажным достоинством выбранной схемы являются простые формулы для измеренного активного сопротивления, что существенно облегчает градуировку прибора. В канонической форме уравнение баланса имеет вид:

$$Z_1 Z_2 + Z_4 (Z_1 + Z_2 + Z_3) = 0.$$

где, согласно схеме: $Z_1 = Z_2 = 1/(j\omega C)$, $Z_3 = R$, $Z_4 = r + j\omega L$. Разделяя и приравнявая нулю вещественную и мнимую части уравнения, получим два соотношения: $rR + 2L/\omega C = 1/(\omega^2 C^2)$ и $2r/\omega C = \omega LR$, откуда, исключив r , находим, что $L(1 + (\omega^2 C^2 R^2)/4) = 1/(2\omega^2 C)$. При частоте, меньшей 10 МГц ($\omega < 2\pi \cdot 10^7$), $R < 40$ Ом,

$C < 500$ пФ выражение упрощается: $L = 1/(2\omega^2 C)$, а после подстановки L в соотношение $2r/\omega C = \omega LR$ круговая частота ω и ёмкость C полностью исключаются. В результате имеем простую формулу для определения активного сопротивления: $r = R/4$.

Продукты коррозии, покрывающие болт, имеют сравнительно низкую проводимость, поэтому токами утечки по земле можно пренебречь в силу их незначительности.

При градуировке прибора измерительные зажимы (точки m – n) переключаются медной пластиной («нулевое» сопротивление), а вся шкала сопротивлений содержит реперные точки 1, 2, 3, 4, 5 Ом, соответствующие номиналам прецизионных резисторов. Ниже показано, что данный диапазон сопротивлений может интерпретироваться как отсутствие коррозии, слабая либо сильная коррозия. Питание прибора осуществляется встроенными аккумуляторами, а общий вес (порядка 5 кг) допускает ручной перенос от опоры к опоре [4].

Электрическое сопротивление и степень коррозии (35-мм болты)

В интерпретации измерений электрического сопротивления U-образных анкерных болтов применён статистический подход. Была проведена серия измерений в разных местах трассы линии напряжением 330 кВ [5]. Измеренные сопротивления разделились на две группы примерно равного объёма: $1,5 \pm 0,5$ и $4,0 \pm 0,5$ Ом.

Последующие вскрытия (по 3 в каждой группе) показали, что эти данные могут быть интерпретированы как отсутствие коррозии в первом случае и как слабая коррозия во втором. Также были измерены сопротивления болтов на складах до начала строительства: общая длина болта – 7 м, длина части болта при измерениях – 5 м, сопротивления – (1,37; 1,37; 1,35; 1,35) Ом и 1,40 Ом для болтов из первой и второй партий соответственно.

Таким образом, отсутствие коррозии может быть интерпретировано достаточно надёжно. Слабую и сильную коррозию можно интерпретировать, исходя из наблюдений, глубиной коррозионного поражения 2,5 и 5 мм (рис. 3).

При расчёте электрического сопротивления по формуле $R = \rho \cdot (l/S)$ принято: удельное сопротивление продуктов коррозии (окислов железа) $\rho = 5 \cdot 10^{-4}$ Ом·м; площадь кольцевых сечений $S = 2,55 \cdot 10^{-4}$ м² (слабая коррозия) и $S = 4,71 \cdot 10^{-4}$ м² (сильная коррозия); длина поражённой коррозией части болта 2,5 м (рис. 3).

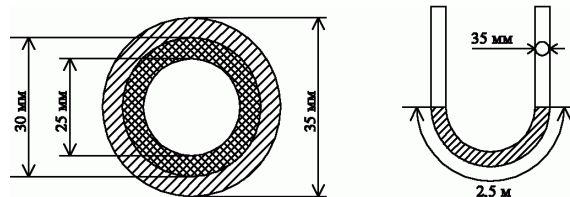


Рис. 3. Слабая (30 мм) и сильная (25 мм) коррозия в сечении 35-мм болта

В этих случаях слабой коррозии соответствует сопротивление 2,5 Ом, сильной коррозии 4,9 Ом. К этим сопротивлениям необходимо добавить 0,75 Ом на неповрежденную часть болта.

Выводы

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коррозия и защита химической аппаратуры. Справочное руководство. Т. 1. – Л.: Химия, 1969. – 482 с.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. – М.: Высшая школа, 1978. – 518 с.
3. А.с. 796742 СССР. Высокочастотный коррозиметр / Ф.Э. Герценштейн, М.С. Микитинский, В.А. Петров. Опубл. 1981.

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 МГц.
3. Проведённые исследования болтов диаметром 35 мм на оттяжках опор линии 330 кВ показали возможность интерпретации степени коррозии (глубины повреждения) электрическим сопротивлением, измеренным на частоте 1,6 МГц.
4. Высокочастотный коррозиметр. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Новосибирск: Сибирская Ассоциация Энергетиков, 1995. – 16 с.
5. Корогод А.А., Микитинский М.С., Морозов С.И. Оценка коррозии анкерных креплений оттяжек опор ВЛ 330 кВ // Энергетик. – 1997. – № 11. – С. 6–17.

Поступила 23.05.2008 г.

УДК 616.831-073.756.8

ИСТОЧНИК ТОКА ДЛЯ ЭЛЕКТРОИМПЕДАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ

А.В. Фокин, К.С. Бразовский

Томский политехнический университет
E-mail: alf@ssmu.ru

Разработана схема источника переменного тока для электроимпедансной томографии. Приведены характеристики, полученные при моделировании в среде MULTISIM 8.0 в исследованиях лабораторного макета, которые показывают, что применение такого схемотехнического решения позволяет повысить стабильность и качество измерений в электроимпедансной томографии.

Ключевые слова:

Электроимпедансная томография, источник тока.

Источник зондирующего тока является важнейшим компонентом электроимпедансной томографии, от его характеристик зависит точность, стабильность, воспроизводимость измерений, частотный и динамический диапазон всего устройства [1].

Зондирующим агентом в электроимпедансной томографии является слабый переменный электрический ток, подводимый через наложенные электроды. При помощи других или тех же самых электродов регистрируется напряжение, появляющееся в результате прохождения тока через объект. По результатам набора таких измерений, при различных комбинациях инжектирующих и измерительных электродов, проводят реконструкцию распределения импеданса. В медицине электроимпедансная томография вызывает большой интерес отсутствием повреждающего воздействия зондирующего агента на биологические ткани при обследовании человека. Это снимает ограничение на ча-

стоту и длительность проведения обследований, при этом возможности современной вычислительной техники позволяют получать изображение в реальном времени с частотой 10...20 кадров/с при помощи персонального компьютера.

При проведении измерений нельзя применять постоянный ток и ток низкой частоты, поскольку в месте контакта электрода с кожей начинаются электрохимические реакции, и проводить измерения становится невозможным. Более того постоянный ток силой более 100 мкА может вызывать серьезные повреждения, в то время как переменный ток частотой 10...100 кГц и силой до 5 мА не вызывает никаких биологических эффектов [2].

Известные схемотехнические решения, применяемые для технических измерений импеданса, не дают удовлетворительных результатов при измерении биоимпеданса, т. к. измерение сопротивления биологических тканей имеет свою специфику, кро-