

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. Оpubл. 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 T-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-

ме того, для получения томографических изображений необходимо проводить измерения с повышенной точностью.

Первая причина, которая порождает ошибки формирования выходного тока – нелинейность характеристики преобразования «напряжение – ток». Величина этой нелинейности определяется выбранной схемой и качеством используемых компонентов. Если используются схемы с обратной связью на основе операционных усилителей (ОУ), то нелинейность будет зависеть от коэффициента усиления ОУ без обратной связи и коэффициента подавления синфазной составляющей. Так как эти параметры резко ухудшаются с ростом частоты, то источник, имеющий малую нелинейность преобразования на постоянном токе, на частоте 50...100 кГц будет вносить значительные нелинейные искажения. Выход из этой ситуации – обеспечить работу ОУ в преобразователе с нулевым или близким к нему напряжением между входами и в режиме максимально глубокой отрицательной обратной связи.

Второй существенный фактор, ухудшающий качество источника тока – конечное выходное сопротивление $R_{вых}$. В идеале при изменении сопротивления нагрузки ток, создаваемый источником, должен оставаться неизменным, но на самом деле существует зависимость между током, отдаваемым в нагрузку, и напряжением на этой нагрузке. Отношение изменения напряжения на нагрузке к изменению тока и есть величина эквивалентного выходного сопротивления источника тока $R_{вых} = \Delta U_H / \Delta I_H$.

В идеальном случае ΔI_H равно нулю, и выходное сопротивление бесконечно. В практических схемах выходное сопротивление всегда ограничено, поэтому важно определить минимально допустимую величину $R_{вых}$. Эта величина будет зависеть от диапазона изменений сопротивления нагрузки и требуемой точности формирования тока ΔI_H . В общем случае $R_{вых}$ должно быть таким, чтобы сопротивление нагрузки составляло долю, не превышающую допустимой погрешности. Например, при 0,01 % точности сопротивления нагрузки должно быть в 10^4 раз меньше $R_{вых}$. Элементарные расчеты показывают, что при сопротивлении нагрузки до 1 кОм и требуемой точности задания тока не хуже 0,01 % выходное сопротивление должно быть не менее 10 МОм.

С учетом этих требований были сформулированы следующие технические условия для источника зондирующего тока:

- выходной переменный ток частотой 30...300 кГц;
- диапазон изменения сопротивления нагрузки 50...1000 Ом;
- выходное сопротивление ≥ 10 МОм;
- отсутствие постоянной составляющей на выходе;
- нелинейность тока нагрузки ≤ 1 %.

В разработанной схеме источника тока в качестве базового элемента используется стабилизатор постоянного тока на основе операционного усилителя и транзистора (рис. 1, 2). Ток в нагрузке равен

току через резистор $R1$ и определяется соотношением $I_H = U_{cm1} / R1$.

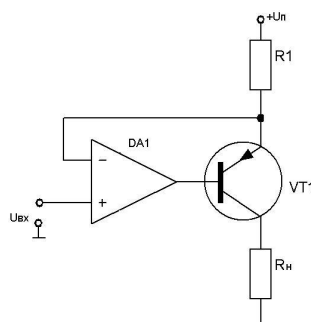


Рис. 1. Стабилизатор постоянного тока на основе ОУ

Соединяя два таких стабилизатора, можно получить двухполярный источник тока, выходной ток в котором равен разности токов, задаваемых каждым стабилизатором (рис. 2).

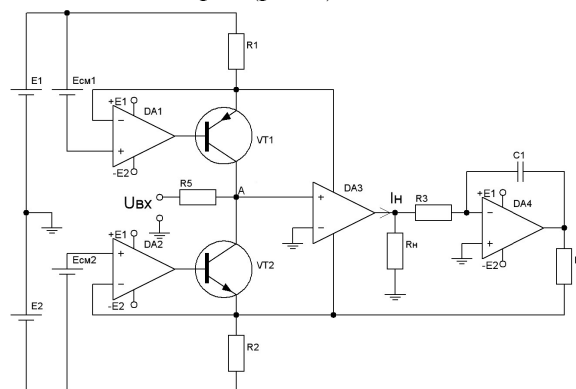


Рис. 2. Источник тока для электроимпеданного томографа

В отсутствие входного сигнала, постоянный ток коллектора транзистора VT1 определяется током резистора $R1$ и равен $I_{cm1} = E_{cm1} / R1$; аналогично задается ток через транзистор VT2. При равенстве этих токов ток через резистор $R5$ не течет, поскольку сумма токов в узле (точка A на схеме) равна нулю. На входе операционного усилителя DA3 устанавливается нулевой потенциал – коллекторы транзисторов соединены с виртуальной землей. Выходное напряжение операционного усилителя DA3 равно нулю, соответственно ток через нагрузку не протекает.

При появлении положительного входного сигнала напряжение на выходе микросхемы DA3 будет увеличиваться, вызывая протекание тока через нагрузку. Точно такой же ток будет потребляться по положительной цепи питания микросхемы DA3, уменьшая ток коллектора транзистора VT1 (поскольку $I_{R1} = I_{cVT1} + I_{+U}$, где I_{cVT1} – ток коллектора транзистора VT1; I_{+U} – ток положительной цепи питания микросхемы DA3). Напряжение на выходе микросхемы DA3 возрастает до тех пор, пока ток нагрузки не станет равен току через резистор $R5$. Аналогичные процессы протекают при отрицательном входном сигнале. Таким образом обеспечивается отрицательная обратная связь по току. Выходной

ток источника полностью определяется током резистора $R5$, независимо от сопротивления нагрузки: $I_n = U_{ax} / R5$ (при условии работы операционных усилителей в ненасыщенном состоянии). Коэффициент преобразования задается единственным резистором $R5$ и легко поддается регулировке.

Постоянная составляющая выходного тока будет равна нулю при равенстве токов через резисторы $R1$ и $R2$. Этого можно достичь либо точной подстройкой резисторов, либо введением узла компенсации постоянной составляющей. Выходное напряжение интегратора на основе микросхемы DA4 формируется пропорционально интегралу от выходного тока устройства. Этим напряжением задается дополнительный постоянный ток, который суммируется с током в эмиттерной цепи транзистора VT2 таким образом, что компенсирует разницу постоянных токов транзисторов. Постоянная интегрирования выбирается много больше максимального периода колебаний входного сигнала для того, чтобы переменная составляющая выходного тока не оказывала влияния на работу интегратора. Тем самым осуществляется стабилизация постоянной составляющей выходного тока на нулевом уровне.

Работа схемы была промоделирована в среде Multisim 8.0. Выходной каскад операционного усилителя DA3 был смоделирован в виде отдельных транзисторов для учета потребления по цепям питания. Также были учтены паразитные емкости. По результатам моделирования выходное сопротивление источника тока составило около 100 МОм на частоте 100 кГц при изменении сопротивления нагрузки от 10 Ом до 10 кОм. Нелинейность тока в нагрузке составила 0,1 % при амплитуде тока до 2 мА.

При макетировании схемы не удалось получить точное значение выходного сопротивления, поскольку при высоких значениях выходного сопротивления трудно разделить погрешности измерения и погрешности, вносимые самой схемой, вызванные в основном паразитными емкостями выходного каскада и емкостью монтажа. Тем не менее, на лабораторном макете удалось добиться устойчивого выходного сопротивления более 10 МОм на частоте до 100 кГц. При этом не было необходимости в какой-либо дополнительной подстройке или использовании элементов с высоким уровнем точности. Полученные характеристики схемы позволили успешно использовать ее в качестве источника зондирующего тока [3] в разработанном образце электроимпедансного томографа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Griffiths H., Zhang Z. A dual-frequency electrical impedance tomography system // Phys. Med. Biol. – 1989. – V. 34. – № 10. – P. 1465–1476.
2. Пеккер Я.С., Бразовский К.С., Усов В.Ю., Плотников М.П., Уманский О.С. Электроимпедансная томография. – Томск: Изд-во «НТЛ», 2004. – 192 с.
3. Пат. на ПМ 71455 РФ. МПК⁸ G05F 1/625. Биполярный источник тока / К.С. Бразовский, Я.С. Пеккер, О.С. Уманский, А.В. Фокин. Заявлено 06.08.2007; Опубл. 10.03.2008. Бюл. № 7. – 5 с.: ил.

Поступила 07.10.2008 г.