

DOI 10.30898/1684-1719.2020.4.12

УДК 53.083.2

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ЭЛЕКТРОПОЛЕВОЙ ТОМОГРАФИИ: ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТЕСТОВОГО ОБЪЕКТА ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

П. А. Кобрисев, А. В. Корженевский, С. А. Сапецкий, Т. С. Туйкин
**Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии
наук, 125009, Москва, ул. Моховая, 11-7**

Статья поступила в редакцию 14 апреля 2020 г.

Аннотация. Электрополевая томография (ЭПТ) – метод электромагнитной квазистатической томографии, с помощью которого можно бесконтактно получать информацию о пространственном распределении электрических свойств исследуемого объекта, зондируя его переменным электрическим полем. Переключая последовательно источник переменного напряжения между пространственно распределенными электродами, можно проводить сбор информации об изменениях фазы поля с помощью остальных электродов и осуществлять визуализацию пространственного распределения электрических свойств объекта путем решения обратной задачи для уравнений, описывающих электрическое поле в неоднородной среде. Основной проблемой при реализации ЭПТ является выделение полезного сигнала (сдвига фазы), обусловленного релаксацией Максвелла-Вагнера в исследуемом объекте, из суммарного измеряемого изменения фазы сигнала. Создана ЭПТ система с дифференциальными возбуждением и регистрацией поля, позволяющими существенно уменьшить влияние погрешностей и прочих помех на результаты измерений. Для этого была использована многоканальная круговая система, работающая в режиме униполярной электрополевой томографии, на которой ранее была успешно выполнена визуализация тестовых объектов. Алгоритм её работы был существенно модернизирован для работы в дифференциальном режиме генерации и сбора данных для программного вычисления фазы и амплитуды разностного сигнала между двумя смежными электродами. На основе экспериментальных данных успешно проведена визуализация методом

дифференциальной электрополевой томографии по сдвигу фаз и по изменению амплитуд тестового объекта, расположенного в центре системы.

Ключевые слова: квазистатическая электромагнитная томография, электрическое поле, визуализация, релаксация Максвелла-Вагнера.

Abstract. Electric field tomography (EFT) is a method of quasistatic electromagnetic tomography enabling contactless investigation of the spatial distribution of the electrical properties in the object, when probing it with an alternating electric field. By switching the alternating voltage source sequentially between spatially distributed electrodes, it is possible to collect information on changes of the field phase using the remaining electrodes and to visualize the spatial distribution of the electrical properties of the object by solving the inverse problem for equations describing an electric field in an inhomogeneous medium. The main problem in the implementation of the EFT is the extraction of a useful signal (phase shift) caused by the Maxwell-Wagner relaxation in the object from the total measured change of the phase. An EFT system has been created with differential excitation and field measuring, which can significantly reduce the effect of measurement errors and noise on the results. A multichannel circular measuring system was used to implement this. A multichannel circular system was used, operating in the unipolar electric field tomography mode, on which visualization of test objects was previously successfully performed. The algorithm of its operation has been modified significantly to operate in the differential mode of excitation and data collection. The phase and amplitude of the difference signal between two adjacent electrodes was calculated programmatically. Successful visualization of the test object placed in the center of the system was achieved experimentally by the differential electrical tomography system using both phase and amplitude measurements.

Keywords: quasistatic electromagnetic tomography, electric field, imaging, Maxwell-Wagner relaxation.

Введение

Электрополевая томография (ЭПТ) – метод электромагнитной квазистатической томографии, с помощью которого можно бесконтактно

получать информацию о пространственном распределении электрических свойств исследуемого объекта, зондируя его переменным электрическим полем. При наличии системы пространственно распределенных электродов, переключая последовательно источник переменного напряжения между ними, можно, проводить сбор информации об изменениях фазы поля с остальных электродов и осуществлять визуализацию пространственного распределения электрических свойств объекта путем решения обратной задачи для уравнений, описывающих электрическое поле в неоднородной среде. Основной проблемой при реализации ЭПТ является выделение полезного сигнала (сдвига фазы), обусловленного релаксацией Максвелла-Вагнера в исследуемом объекте, из суммарного измеряемого изменения фазы сигнала. В случае дифференциальной ЭПТ для реконструкции изображений могут быть использованы не только измеренные сдвиги фаз возмущенного поля, но и относительные изменения амплитуды регистрируемого сигнала. В последнем случае, однако, будет недоступна информация о релаксационных параметрах среды.

Материалы и методы

Для экспериментальной проверки теоретических выкладок и численного моделирования [1] дифференциальной электрополевой томографии была использована многоканальная круговая система (рис. 1), работающая в режиме униполярной электрополевой томографии, на которой была успешно выполнена визуализация тестовых объектов [2, 3] по экспериментальным данным.

Для работы в режиме дифференциальной электрополевой томографии алгоритм работы системы был существенно модернизирован. Добавлены два новых необходимых для выполнения данной работы режима генерации: дипольная (два смежных модуля в противофазе) и полярная (два диаметрально противоположных модуля в противофазе) генерация. В программу для обмена с измерительной системой и прошивку микроконтроллеров добавлен параметр «режим генерации». В зависимости от него модули с адресами, геометрически соответствующими дипольной и полярной генерации, синхронно с основным

генератором производят генерацию сигнала.

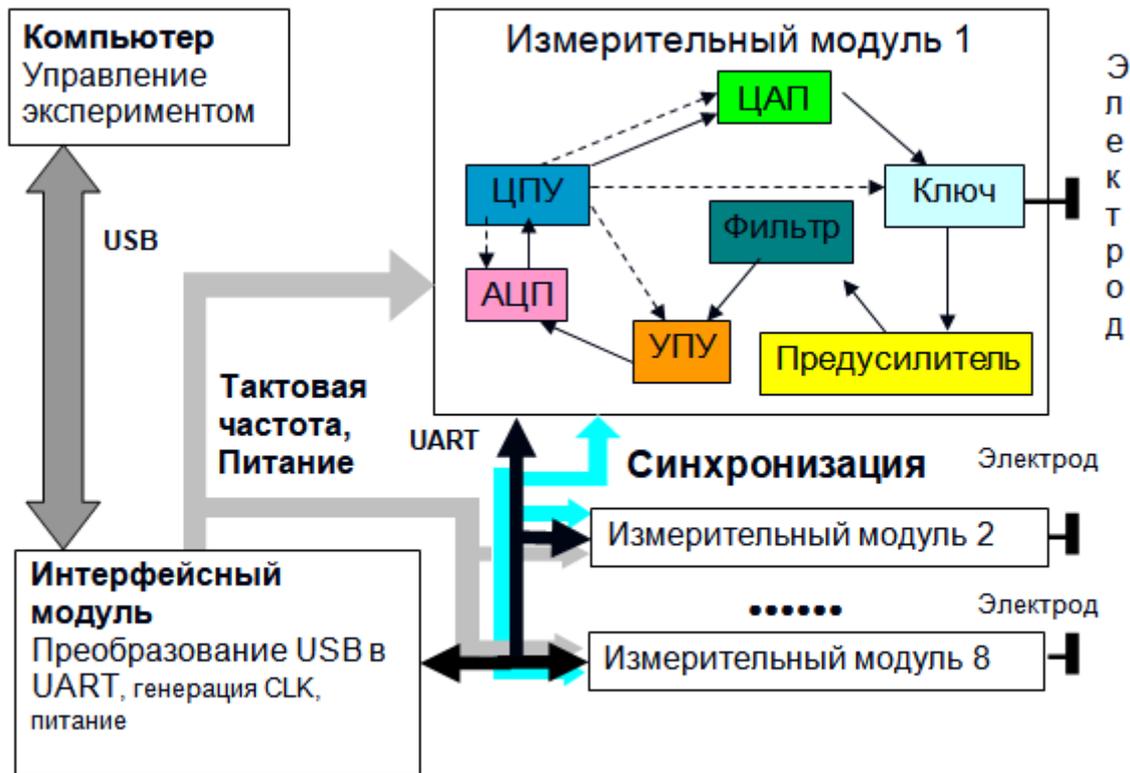


Рис. 1. Блок-схема многоканальной круговой измерительной системы.

Противофазность генерируемых сигналов достигается с помощью переключения таблицы кодов сигналов во времени, загружаемых на ЦАП в процессе генерации. Синхронизация достигается с помощью опорного сигнала, передаваемого на все модули, и системы синхронизации модулей, осуществляемой путем ввода их в спящий режим, пробуждение по общему синхроимпульсу с синхронным сбросом таймеров. Добавлены таблицы коэффициентов усиления входных усилителей АЦП для разных режимов генерации. Поддерживается прежняя логика работы с коэффициентами усиления: возможность их автоматического подбора, использование фиксированных значений для каждой комбинации генератора и модуля приёмника с целью получения оптимальной амплитуды сигнала при оцифровке. Добавлены дополнительные таблицы коэффициентов для дифференциальных режимов генерации. Добавлена возможность выполнения усреднения

результатов измерений непосредственно на процессорах модулей и расширены возможности передачи данных с них. Добавлена возможность передачи «сырых» данных (отсчетов) с АЦП, вычисленных квадратур, можно исключать из обработки несколько первых периодов сигнала для уменьшения влияния переходных процессов.

В процессе модернизации пришлось изменить и прежнюю логику работы системы, в противном случае удовлетворительная работа в режиме дифференциальной электрополевой томографии была бы невозможной. Изменена логика назначения мастер-модуля и унифицирована встроенная программа (прошивка) для всех модулей. В системе имеется один мастер-модуль, который задаёт импульсы синхронизации для всех остальных модулей системы. Ранее он отличался прошивкой от других модулей, что делало сложной доработку и выполнение дифференциальных измерений. Сейчас модуль с адресом 0x00 является мастером. Адрес модуля задается аппаратно при помощи перемычек, установленных на его плате в соответствии с физическим положением модуля в системе.

Доработана система синхронизации модулей. Ранее синхронизация достигалась за счет того, что процессоры уходили в спящий режим, потом мастер выводил их из режима сна с помощью синхроимпульса, и ожидал необходимое время для синхронизации с исполнительными модулями, поскольку код выполнялся линейно и занимал фиксированное количество времени. В процессе доработок код стал нелинейным с нефиксированным временем выполнения, выполнять синхронизацию стало затруднительно. Для решения этой проблемы были использованы дополнительные циклические таймеры, запускаемые в каждом модуле по выходу из спящего режима. Далее процессы настройки и переход к генерации и измерениям осуществлялась по циклам этих таймеров. Таким образом, модули оказывались синхронизированными независимо от времени выполнения кода в них.

Для увеличения стабильности напряжения питания применён более мощный источник питания, усилены фильтры в цепях питания каждого модуля,

а также всей системы, чтобы позволило уменьшить вероятность сбоя и повысить качество получаемых данных.

Для дифференциальных измерений необходимо измерять фазу разностного сигнала между двумя смежными электродами. Однако в использованной в экспериментах системе модули измеряют фазу и амплитуду независимо каждый на своём электроде. Для более корректной работы измерительной системы желательно было бы доработать входные каскады усилителей, с тем, чтобы каждый модуль оцифровывал разностный сигнал между двумя ближайшими к нему электродами. Однако для получения предварительных результатов и экспериментальной оценки реализуемости метода в описываемой работе мы ограничились программным синтезом необходимых дифференциальных фаз и амплитуд по результатам однополярных измерений. Для его реализации нужно знать не только униполярные фазы, измерившиеся ранее, но и амплитуды с учетом коэффициентов усиления входных АЦП. Эти данные позволяют вычислить «униполярные» квадратуры сигналов с каждого электрода. Дифференциальные квадратуры получаются простым вычитанием друг из друга соответственно униполярных, измеренных на двух смежных модулях. Из полученных квадратур легко вычислить фазу и амплитуду, необходимые для реконструкции изображения в дифференциальном электрополе томографе.

Приготовление тестового объекта

В общем случае величина сдвига фазы, вызываемая объектом, зависит от частоты, диэлектрической проницаемости среды, проводимости среды, геометрических размеров среды и системы, положения образца в измерительной камере системы [4 - 6]. Поскольку ожидаемые максимальные сдвиги фаз, достигаемые даже вблизи релаксационной частоты среды, очень малы и составляют десятые доли градуса, желательно выбрать рабочую частоту измерительной системы близкой к релаксационной частоте вещества образца. Для приготовления образцов был использован чистый этиловый спирт ($\sigma = 0,08$ мСм/м, $\varepsilon = 26$, $f_{\text{рел.}} = 58$ КГц), который благодаря меньшей, чем у воды

диэлектрической проницаемости, создает большой максимальный сдвиг фаз на своей релаксационной частоте. Выбрана рабочая частота 50 кГц, что близко к релаксационной частоте этилового спирта. Спирт был помещен в баночку с внешним диаметром 40 мм, что составляет почти половину внутреннего диаметра камеры, ограниченной электродами. Тестовый объект был помещен в центр многоканальной круговой измерительной системы, рис. 2.

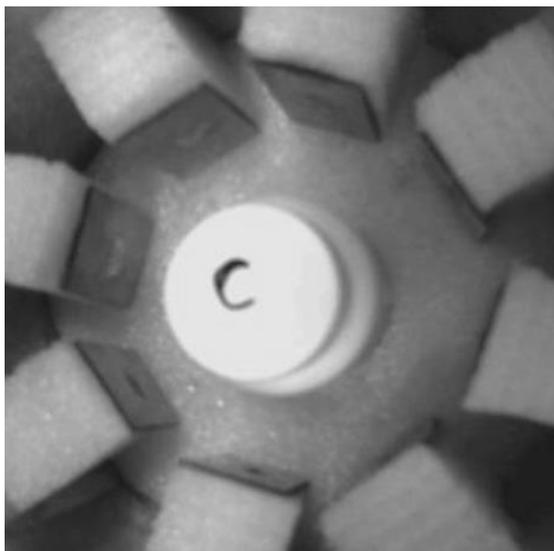
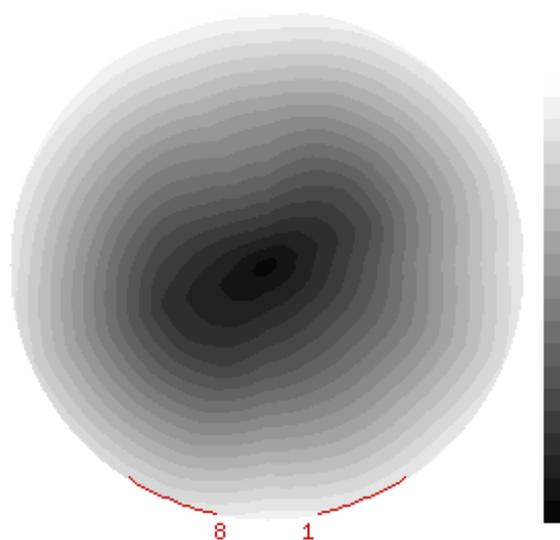


Рис. 2. Тестовый объект, помещенный в измерительную систему.

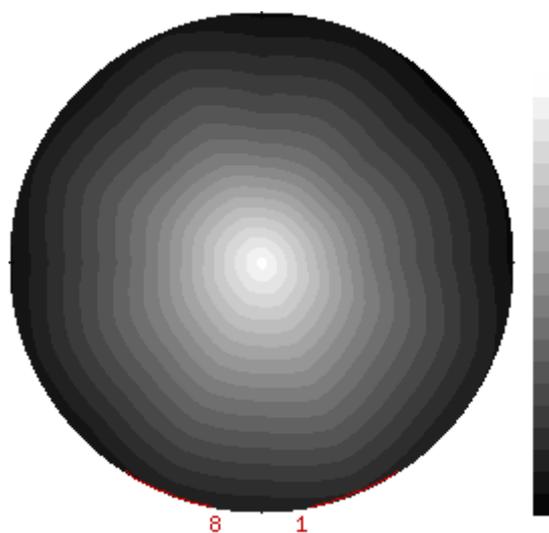
Результаты

С помощью управляющей программы, реализованной на персональном компьютере, в дипольном режиме возбуждения был измерен полный (по всем возможным вариантам электродов источников и измерителей переменного электрического поля) набор квадратур. Каждая из квадратур вычислялась в соответствующем микроконтроллере по нескольким десяткам периодов измеряемого на приемных электродах сигнала, усиленного и оцифрованного встроенным в микроконтроллер АЦП. При этом программой автоматически подбираются коэффициенты усиления для оптимальной работы приемного тракта. Второй (опорный) набор данных был измерен в отсутствии объектов, но с теми же коэффициентами усиления. Полученные два массива данных были скопированы в таблицу Microsoft Excel, где с учетом коэффициентов усиления

были вычислены сдвиги фаз и амплитуды дифференциальных сигналов. По этим данным произведена реконструкция изображений методом свертки и обратной проекции, описанным в [1]. Результаты представлены на рис. 3.



(a)



(б)

Рис. 3. Результаты реконструкции изображения тестового объекта по экспериментально измеренным дифференциальным сдвигам фаз (а) и амплитудам (б).

Заключение

Многоканальная круговая система был существенно модернизирована. Успешно проведена визуализация методом дифференциальной электрополевой томографии крупного тестового объекта, расположенного в центре системы. На

амплитудной томограмме объект виден более отчетливо, правильной формы, что обусловлено большим, чем для фазовых измерений, соотношением сигнал/шум, однако изменения амплитуды несут информации преимущественно о внешних контурах, а не о внутренней структуре объекта. На томограмме, построенной по сдвигам фаз, потенциально обеспечивающим получение информации о внутренней структуре, тестовый объект также хорошо визуализируется, но заметны искажения. Вероятно, существенные систематические погрешности, возникшие при вычислении дифференциальных квадратур, обусловлены большим влиянием разброса коэффициентов усиления измерительных модулей при использовании программного синтеза дифференциальных измерений. В дальнейшем планируется модернизировать измерительные модули, с тем, чтобы дифференциальные измерения выполнялись аппаратно с использованием одного и того же усилителя, подключенного сразу к двум смежным электродам. После этого появится возможность корректно исследовать объекты с более сложной структурой.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-02088.

Литература

1. Корженевский А.В., Гуляев Ю.В., Корженевская Е.В. Дифференциальные измерения в электрополевой томографии: проверка концепции с помощью численного моделирования. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 10. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/oct18/19/text.pdf>. DOI: [10.30898/1684-1719.2018.10.19](https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.10.19)
2. Korjnevsky A.V., Tuykin T.S. Experimental demonstration of electric field tomography. // *Physiol. Meas.* 2010. Vol. 31. P. S127-S134.
3. Гуляев Ю.В., Корженевский А.В., Туйкин Т.С., Черепенин В.А. Визуализация электропроводящих сред методом электрополевой томографии. // *Радиотехника и электроника.* 2010. Т. 55. № 9. С. 1132-1139.

4. Корженевский А.В. Бесконтактная томография электропроводящих сред квазистатическим переменным электрическим полем. // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49. № 6. С. 761-766.
5. Korjenevsky A.V. Maxwell-Wagner relaxation in electrical imaging. // *Physiol. Meas.* 2005. Vol. 26. No. 2. P. S101-S110.
6. Korjenevsky A.V. Electric field tomography for contactless imaging of resistivity in biomedical applications. // *Physiol. Meas.* 2004. Vol. 25. No. 1. P 391-401.

Для цитирования:

Кобрисев П.А., Корженевский А.В., Сапецкий С.А., Туйкин Т.С. Дифференциальные измерения в электролевой томографии: визуализация тестового объекта по экспериментальным данным. Журнал радиоэлектроники. 2020. № 4. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/apr20/12/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.4.12