

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.3.2>

УДК: 53.083.9

**СИСТЕМА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ
ПАРАЗИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ИНТЕГРАЛЬНЫХ МУЛЬТИПЛЕКСОРОВ
ДЛЯ ЭЛЕКТРОИМПЕДАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ**

Т.С. Туйкин, А.В. Корженевский

**ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
125009, Москва, ул. Моховая, 11, корп.7**

Статья поступила в редакцию 10 октября 2023 г.

Аннотация. Фактические параметры мультиплексоров влияют на измерения, проводимые для реализации электроимпедансной томографии. Для биологических объектов наибольшее влияние оказывают ёмкости каналов и разброс между ними. Типовое значение десятки пикофарад. Производители интегральных микросхем обычно не нормируют этот параметр, указывая типовое значение, то есть фактическая ёмкость может отличаться на несколько десятков процентов от партии к партии. Подобранные по параметрам аналоговые ключи позволяют проводить более качественное измерение или компенсировать погрешности программно. Ток утечки так же оказывает значительное влияние на измерение. В частности, мультиплексоры, поврежденные статическим электричеством, могут увеличивать токи утечки на порядки. Разработана программно-аппаратная система для тестирования основным параметром аналоговых высоковольтных ключей: факт коммутации каналов, инжекция заряда при переключениях, сопротивления каналов, ёмкости и токи утечек. Точность измерения ёмкости канала 1 пФ, следует учитывать паразитную ёмкость измерительных колодок

и опорного мультиплексора. Сопротивление канала порядка 1 Ома, инжекция заряда – 1 пКл, токи утечки порядка 100 пА. Для тестирования используется опорный мультиплексор с известными параметрами, генератор ток и таймер для измерения времени разряда-заряда, прецизионный усилитель и герконовое реле для измерения малых напряжений. Сменные колодки для тестирования аналоговых ключей позволяют тестировать не только мультиплексоры 1 в 16, но и любые другие конфигурации с меньшим кол-во каналов, микросхемы в различных корпусах и даже с более низким напряжением питания при использовании понижающих стабилизаторов на колодке. Система позволяет проверить работоспособность ключей, подобрать в измерительную систему микросхемы с одинаковыми параметрами, улучшать качество выборкой “удачных” по параметрам или компенсировать измерения с учётом фактической ёмкости измерительного канала.

Ключевые слова: электроимпедансная томография, аналоговые высоковольтные ключ, тестирование параметров.

Автор для переписки: Туйкин Тимур Салаватович [for_subscribe tt@mail.ru](mailto:for_subscribe_tt@mail.ru)

Введение

Для реализации высокоточных, многоканальных измерений полезно знать фактические значения основных параметров аналоговых мультиплексоров. Зачастую точности, указанной в документации производителя как допустимый разброс параметров или типовой значение, недостаточно. В частности, для нашей области, электроимпедансной томографии биологических объектов, очень важна фактическая ёмкость измерительного канала и инжекция заряда при переключении мультиплексора. При небольших отклонениях и не идеальностях можно использовать калибровку системы для компенсации погрешностей через матрицу неидеальности измерительных ключей и неравномерности параметров между каналами [1]. Значительный разброс и отклонение параметров мультиплексоров, в сочетании с высоким контактным сопротивлением кожи

биологического объекта, может сделать невозможным проведение электроимпедансной томографии.

Наряду с усилителями, источниками тока качество получаемым данных и последующей реконструкции обусловлено коммутаторами [2] и качеством, однородностью и стабильностью контактов электродов с исследуемым объектом. Поэтому следует уделять внимание фактическим параметрам, особенностям и погрешностям измерительных систем электроимпедансной томографии, особенно в том, что касается коммутации и обеспечения контакта.

Предложен программно-аппаратный комплекс для оценки работоспособности и основных параметров аналоговых мультиплексоров: емкость, сопротивления, инжекция заряда. Он позволяет проводить входную оценку фактических параметров мультиплексоров, сортировать, разбраковывать их по параметрам, компенсировать значения для улучшения точности и качества измерений. Так же система помогает подобрать наилучшую замену вышедшего из строя ключа в системе или при необходимости внести индивидуальные корректировки согласно параметрам канала.

1. Задача

Занимаясь многоканальными измерениями для реализации нескольких видов квазистатической электромагнитной томографии, а именно: электрополевой [3], электроимпедансной [4], магнитоиндукционной [5], мы и ранее сталкивались с неидеальностью параметров высоковольтных (выше 10 В) аналоговых мультиплексоров, повреждением статическим электричеством в составе системы, отказами и даже дефектными экземплярами микросхем. Во время пандемии коронавируса качество доступных компонентов резко упало, обострив проблемы. В 2022 году ситуация с поставками продолжила ухудшаться.

Ранее мы сталкивались с проблемой разброса параметров ёмкостей каналов у аналоговых мультиплексоров. В частности, Analog Device – производитель одних из лучших аналоговых высоковольтных

ключей ADG406BPZ в технической документации указывает лишь типовое значение ёмкости как 60 пФ. В своё время он отказался удовлетворить нашу просьбу о замене партии ключей с ёмкостью 90 пФ, аргументировав это тем, что для них это значение соответствует типовому значению 60 пФ, указанному в технической документации. При этом уровень сигнала, получаемый с биологических объектов через два каскада таких аналоговых ключей, меняется значительно. Так же приходилось сталкиваться со значительными токами утечки в каналах мультиплексоров.

Для оценки ёмкости, сопротивления и факта коммутации для аналогового ключа ранее мы использовали колодку с замкнутыми адресными входами. В колодку помещался исследуемый ключ и тестировался 0-й канал мультиплексора. К ней подключались RLC измеритель, мультиметр и, при необходимости, осциллограф с генератором для оценки уровня ослабления сигнала.

Позже мы изготовили макет-печатную плату с колодкой, джамперами и клеммами, позволяющий выбрать и протестировать любой интересующий канал с помощью подключаемого оборудования.

Также мы столкнулись с более экзотической проблемой: чрезмерной инъекцией заряда при переключении мультиплексоров, которую не выявляли стандартные тесты, включая измерения на фантоме биологического объекта см. рис. 1 и 2. Проблема была обнаружена только при измерениях непосредственно на биологических объектах см рис. 3, у которых есть кожа – поверхностный слой с низкой электропроводностью относительно высокой ёмкостью.

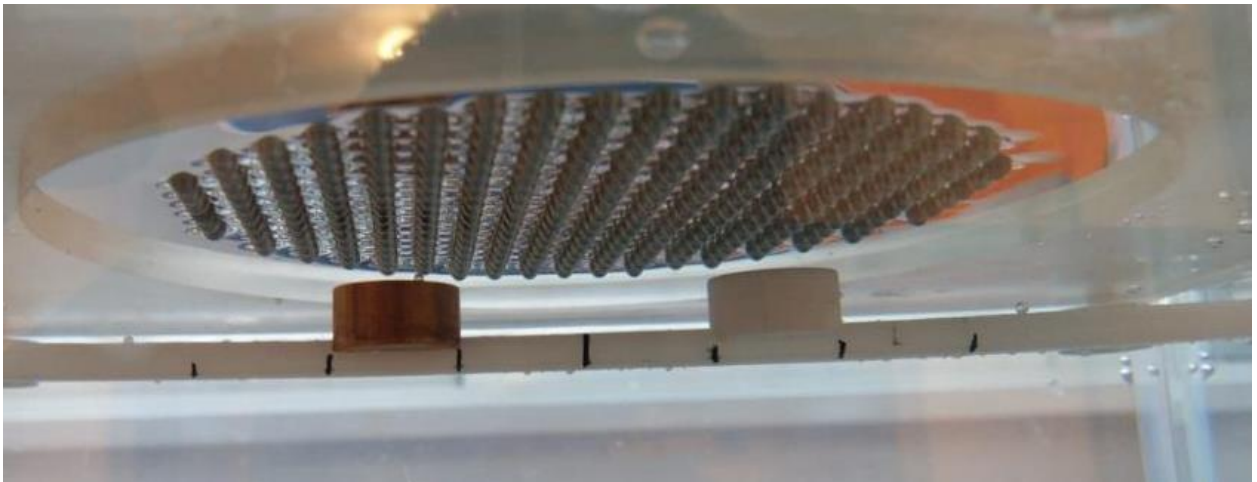


Рис. 1. Измерение фантома биологического объекта: в растворе удельной электропроводностью 0,1 См/м шайбы диаметром 2 см из латуни и пластика.

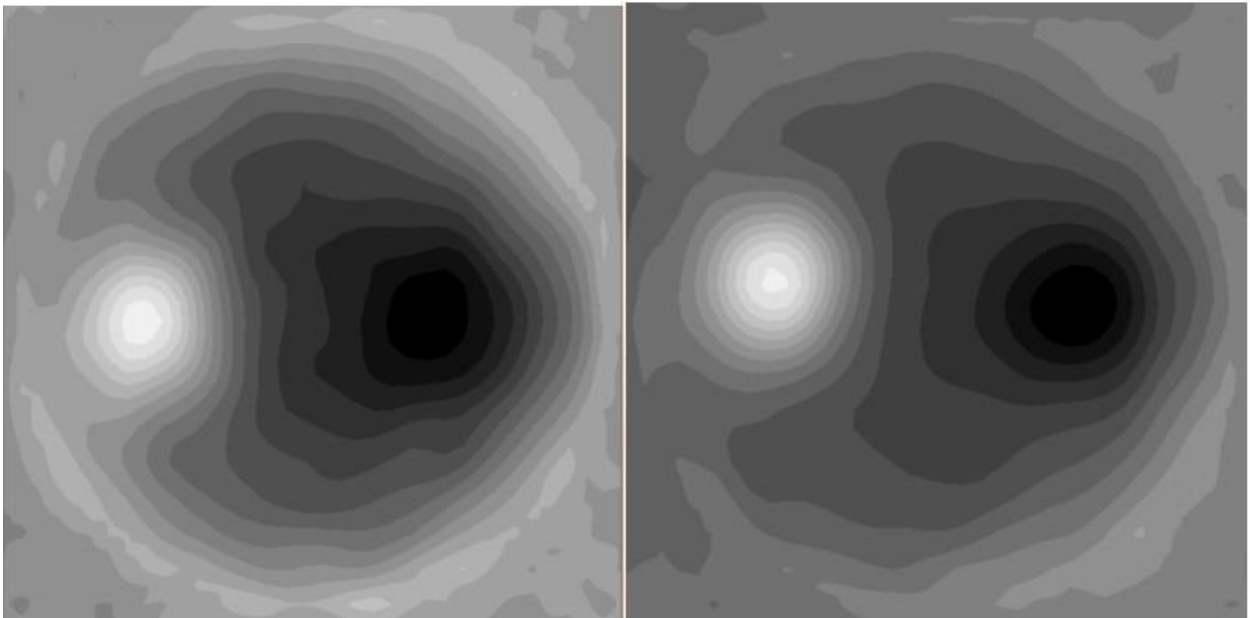


Рис. 2. Электроимпедансная томограмма срез на глубине 1,8 см. Слева изображение, полученное посредством мультиплексоров с аномально высоким уровнем инъекцией заряда при коммутации. Визуализации схожи и соответствуют положению объектов внутри фантома, больше зависит от вторичных факторов: глубина погружения электродов и положение объектов.

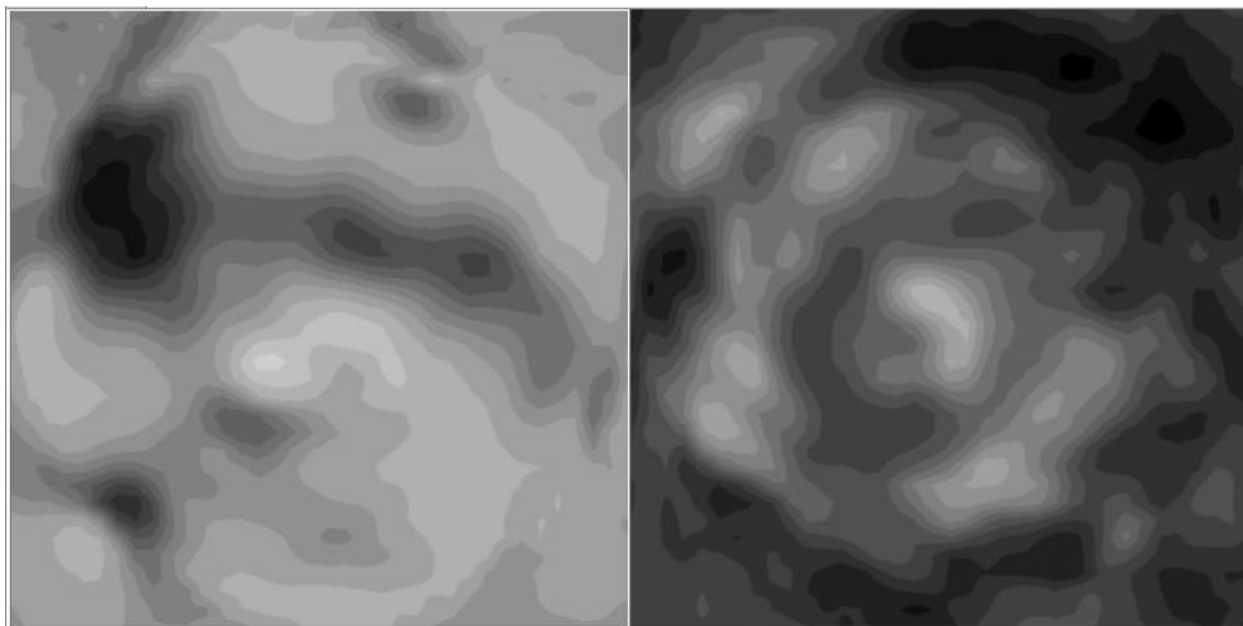


Рис. 3. Электроимпедансная томограмма срез на глубине 1,8 см молочной железы. Слева изображение, полученное посредством мультиплексоров с аномально высоким уровнем инъекцией заряда при коммутации, не прослеживается структура. Справа видна структура биологического объекта.

2. Система

Оценить инъекцию заряда при переключении каналов для высококачественного аналогового ключа затруднительно без специального стенда, поскольку: типовая инъекция заряда составляет единицы пКл, а собственная ёмкость канала – десятки пФ. Это побудило разработать программно-аппаратную систему для автоматического и ручного тестирования параметров аналоговых ключей топологии «16в1», используемых нами для электроимпедансной томографии [4].

Первая версия системы позволяла выставлять адреса с помощью переключателей, тестировать факт коммутации и ёмкость ключей. Обнаруживать токи утечки и инъекцию заряда на порядок превосходящие максимально допустимые параметры мультиплексора (20 нА и 8 пКл).

Для более точной оценки токов утечки и инъекции заряда мы спроектировали вторую версию системы, добавив герконовое реле для уменьшения паразитной ёмкости и утечек. Его использование позволило подключать выход тестируемого ключа или к измерителю ёмкости на основе

таймера разряда-заряда или к аналоговому измерителю, исключив их паразитное влияние друг на друга.

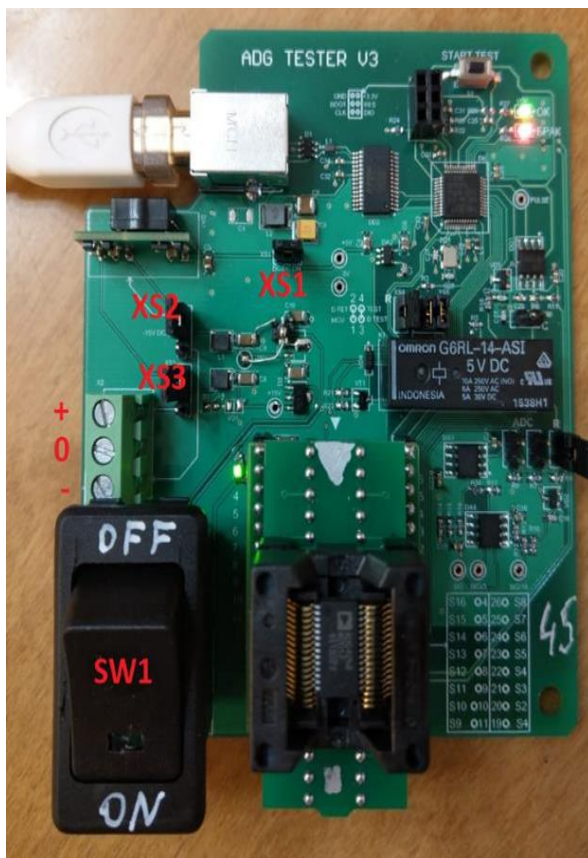


Рис. 4. Третий вариант системы для автоматического тестирования.

Но и этого оказалось недостаточно для оценки инъекции заряда. В третьей версии для решения этой задачи были:

- добавлены прецизионные усилители, для более высокой точности оценки параметров токов утечки и инъекции заряда;
- оптимизирована разводка и стабилизация питания;
- добавлена возможность запитать стенд от лабораторного источника питания для лучшей точности измерений.

Позже возникла задача оценить сопротивление каналов аналоговых ключей в других корпусах и иной конфигурации, система была модернизирована и доработана колодками, переходниками для тестирования аналоговых ключей в других корпусах и схемой мультиплексирования 1в8 и 2х1в4.

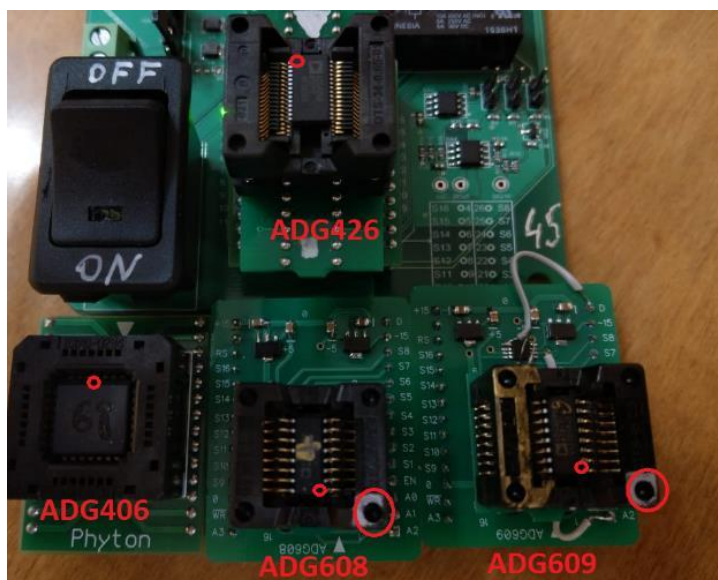


Рис. 5. Переходники для разных корпусов, конфигураций ключей и питания.

3. Реализация измерения

Для оценки ряда параметров (коммутации, утечки, сопротивления) каждого канала использует эталонный мультиплексор, подключенный встречно к тестируемому мультиплексору. Это позволяет передать тестовый сигнал на любой канал и отключать каналы.

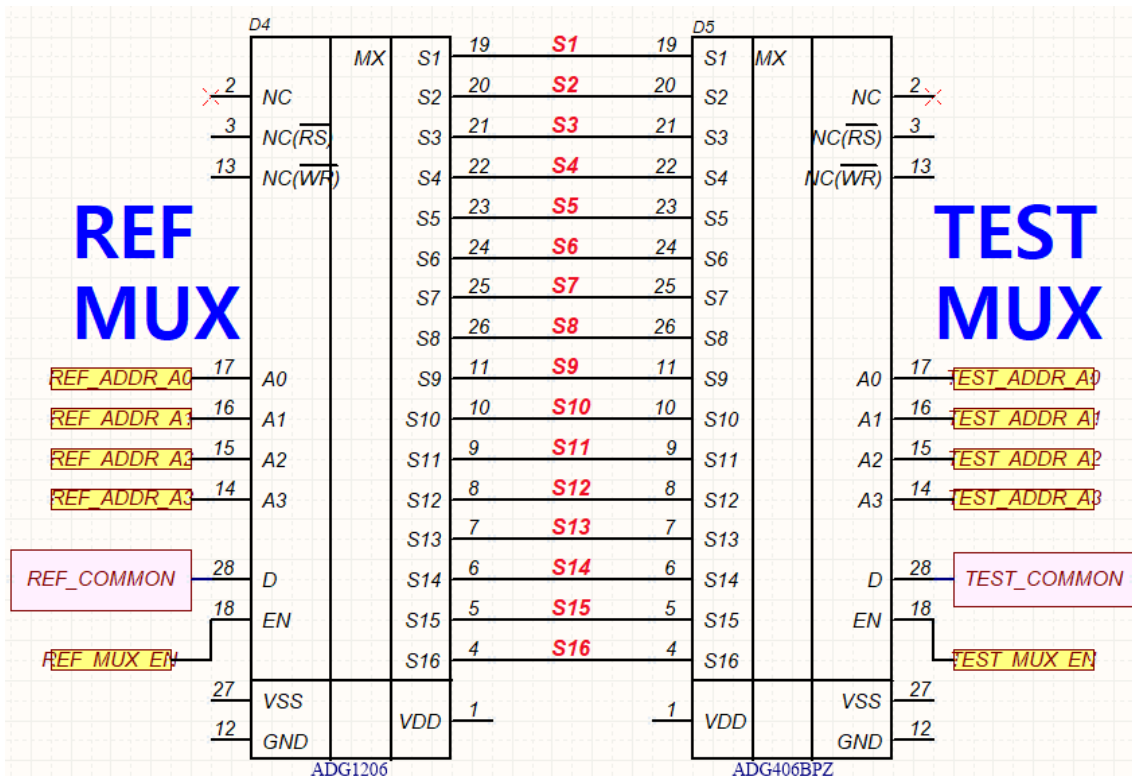


Рис. 6. Подключение опорного мультиплексора и тестируемого в системе.

Для возможности оценки параметров опорного мультиплексора сделана дополнительная система коммутации джамперами, позволяющая менять ролями тестируемый и опорный мультиплексор.

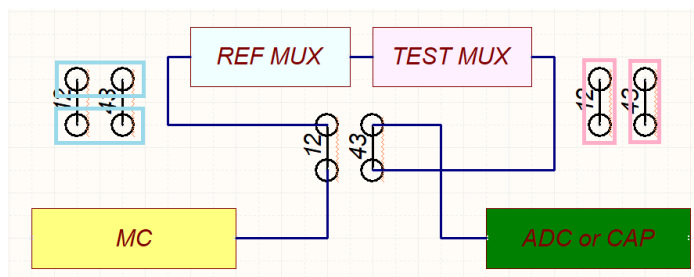


Рис. 7. Система коммутации, меняющая ролями тестируемый и опорный мультиплексоры.

4. Измерения параметров

Для оценки инжекции заряда используется резистор с большим сопротивлением 20-100 МОм, прецизионное электромеханическое реле для коммутации общего канала мультиплексора и усилительный каскад с прецизионным усилителем, имеющим высокое входное сопротивление, низкие токи утечки и маленькое напряжение смещения. Выходной сигнал усилителя оцифровывается.

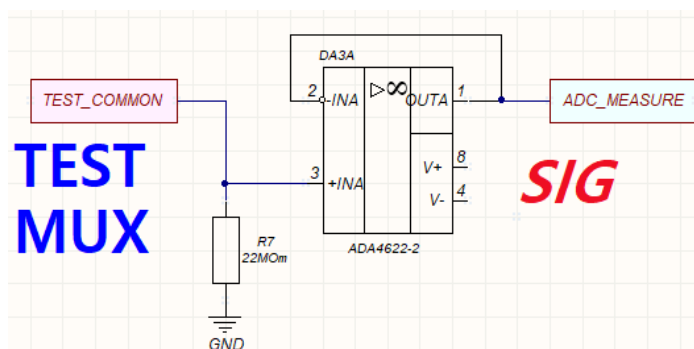


Рис. 8. Схема для измерения инжекции заряда и тока утечки.

Чувствительность системы зависит от собственной ёмкости мультиплексора, для ёмкости канала 60 пФ она казалась порядка 100 пКл на 1 В, что позволяло бы оценивать уровень инжекции заряда, в зависимости от разрешения АЦП и усиления в каскаде, с точностью до долей пКл. Однако, практика показала, что результаты сильно зависят от условий контакта микросхемы в колодке, включая контакты питания. С учетом этого, удается

оценивать только порядок параметра, так как при переустановке микросхемы значения могут меняться на десятки процентов. Этого оказывается достаточно для правильной разбраковки микросхем электроимпедансного томографа.

Для измерения емкости происходит подключение общего выхода тестируемого мультиплексора с помощью электромеханического реле к измерителю ёмкости, выполненному на таймере-осцилляторе TS555, и отключение опорного мультиплексора. Измерение ёмкости происходит путем оценки времени заряда и разряда эталонным током. Точность измерений выше 1 пФ. При измерении необходимо учитывать собственную ёмкость системы, емкости колодок, переходников, дополнительных мультиплексоров и выключенного опорного мультиплексора.

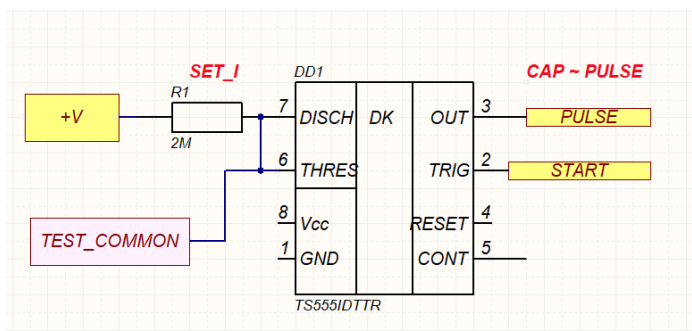


Рис. 9. Схема измерения ёмкости.

Измерение сопротивления канала происходит путём подключения общего входа мультиплексора к источнику напряжения через резистор с последующим измерением напряжения и вычислением сопротивления канала. Планируется в следующей версии системы заменить резистор полноценным источником тока малых величин порядка 1 мА.

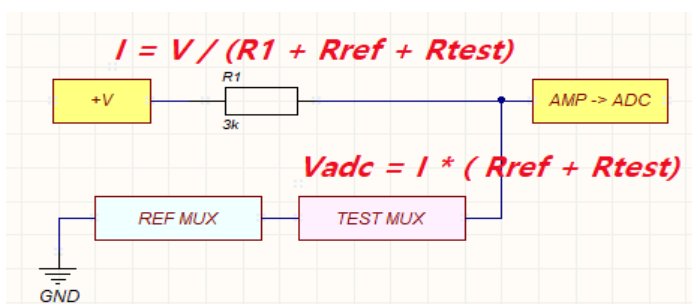


Рис. 10. Схема измерения сопротивления.

Для тестирования факта коммутации каналов мультиплексора и оценки токов утечки использует источник сигнала с высоким импедансом, чтобы с его помощью выявить неидеальности работы канала, мультиплексора. С микропроцессора через резистор с большим сопротивлением от 1 МОм передаются последовательно уровни 0 и 1 через опорный мультиплексор на канал тестируемого мультиплексора. На выходе мультиплексора измеряются потенциалы и определяется, на сколько они отличаются от идеальных значений – напряжения питания процессора (0, 1).

Так же для оценки утечек используют режим, когда опорный мультиплексор отключен, при этом становится видно, какое напряжение возникает на резисторе из-за утечек (необходимо учитывать влияние выключенного опорного мультиплексора, его ток утечки).

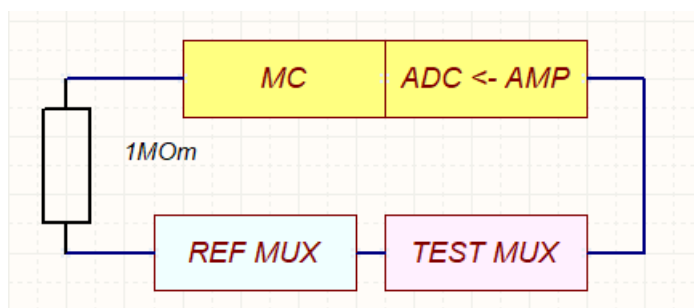


Рис. 11. Схема измерения тока утечки.

5. Программное обеспечение

Система включает микропроцессорную программу с возможностью автономного тестирования микросхем с выдачей интегрального результата тестирования «исправен/нет» с помощью светодиодов, и программу для персонального компьютера, позволяющую визуализировать результаты тестирования всех параметров каждого канала и осуществлять цветное выделение результатов, выходящих за пределы допустимого диапазона для привлечения внимания.

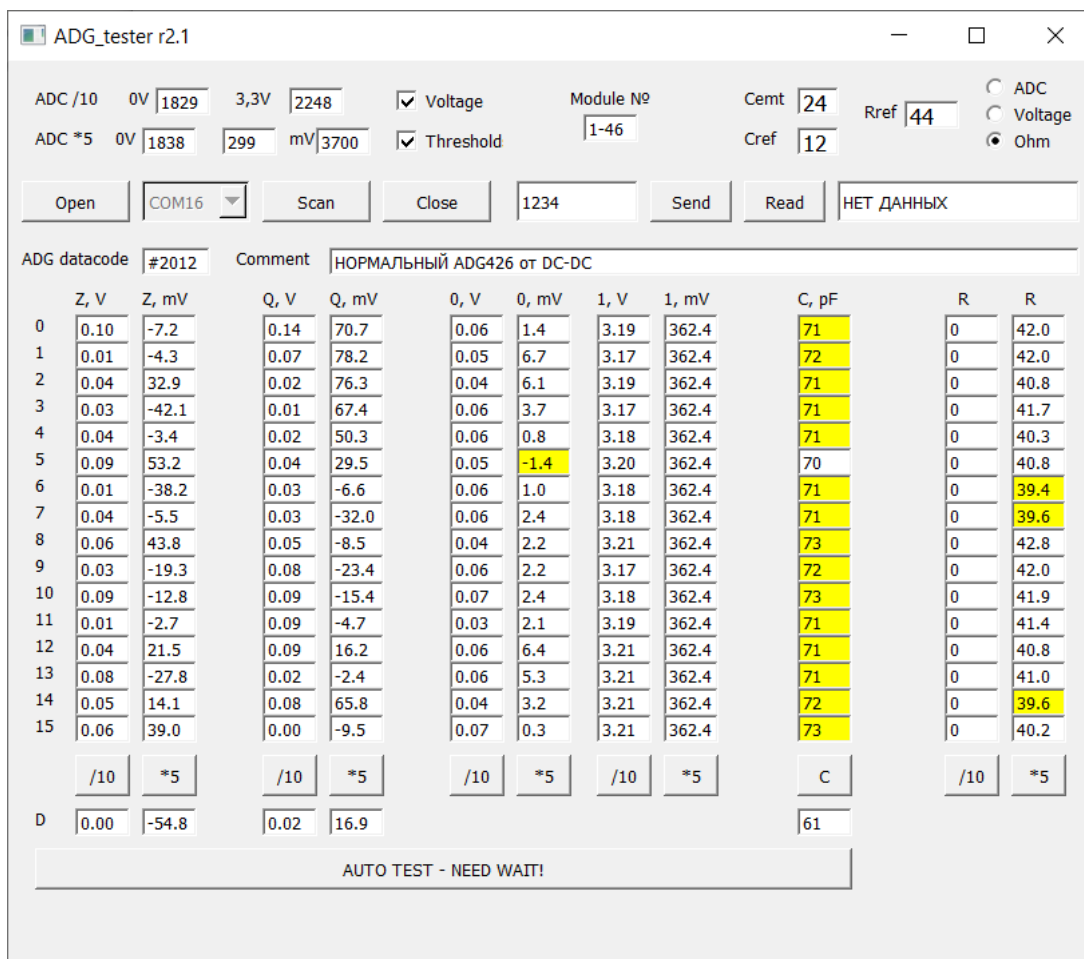


Рис. 12. Окно программы для тестирования аналоговых ключей.

6. Результаты

Разработанная программно-аппаратная система решила для нас задачу подбора и контроля параметров аналоговых ключей для высокоточных измерений в электроимпедансной томографии на биологических объектах.

По результатам работы оказалось довольно критичным качество механического прижима микросхемы в колодке, которое необходимо обеспечивать при измерениях.

Текущая версия системы позволяет оценить следующие параметры аналоговых мультиплексов:

Таблица 1. Точность оцениваемых параметров.

Название параметра	Точность оценки	Единицы
Инжекция заряда	1	пКл
Ёмкости каналов	1	пФ
Сопротивления каналов	1	Ом
Факт коммутации	Да/нет	Факт
Токи утечки	100	пА

Заключение

Программно-аппаратный комплекс позволяет проводить тестирование работоспособности и оценку фактических параметров аналоговых мультиплексоров для высокоточных многоканальных измерений. Это позволяет подбирать наборы мультиплексоров наиболее схожих по параметрам и/или компенсировать влияние реальных параметров ключа на измерения. В частности, измеряются наиболее критичные параметры для электроимпедансной томографии биологических объектов: паразитная ёмкость коммутированного канала и инжекция заряда при переключении каналов.

Литература

1. Barreiro M. et al. Multiplexing error and noise reduction in electrical impedance tomography imaging //Frontiers in Electronics. – 2022. – Т. 3. – С. 848618.
2. Wu Y. et al. Electrical impedance tomography for biomedical applications: Circuits and systems review //IEEE Open Journal of Circuits and Systems. – 2021. – Т. 2. – С. 380-397.
3. Korjenevsky A.V., Tuykin T. S. Experimental demonstration of electric field tomography //Physiological measurement. – 2010. – Т. 31. – №. 8. – С. S127.

4. Cherepenin V.A. et al. Three-dimensional EIT imaging of breast tissues: system design and clinical testing //IEEE transactions on medical imaging. – 2002. – Т. 21. – №. 6. – С. 662-667.
5. Sapetsky S. et al. Development of the system for visualization of electric conductivity distribution in human brain and its activity by the magnetic induction tomography (MIT) method //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2010. – Т. 224. – №. 1. – С. 012038.

Для цитирования:

Корженевский А.В., Туйкин Т.С. Система для экспериментальной оценки паразитных параметров интегральных мультиплексоров для электроимпедансной томографии. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 3 <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.3.2> .