**ТТ и ТП на Стенд для ЭТТ 16х16**

Список сокращений:

ЭТТ – электротермотренировка;

ИКБ – измерительно-коммутационный блок;

КУ – контактирующее устройство;

ПК – персональный компьютер;

АБ – аккумуляторная батарея;

ПО – программное обеспечение;

УП – установочная плата;

АЦП - аналого-цифровое преобразование;

ЦАП - цифро-аналоговое преобразование;

ИТ - источник тока;

ОУ - операционный усилитель.

Стенд ЭТТ (далее Стенд) предназначен для проведения кратковременных испытаний конденсаторов при подаче испытательного напряжения и повышенной рабочей температуре (Электро Термо Тренировка). По результатам, полученным в ходе ЭТТ, можно делать выводы о надёжности испытываемой партии конденсаторов. В отличие от традиционной методики ЭТТ, с предварительным, перед началом ЭТТ и конечным, после окончания ЭТТ контролем заданных параметров, разрабатываемый Стенд позволяет контролировать два основных параметра: ток утечки и ёмкость конденсатора, периодически, в соответствии с программой испытаний, в течение всей процедуры ЭТТ, или произвольно, по команде оператора.

**Состав Стенда:**

Стенд должен состоять из измерительно-коммутационного блока (ИКБ) и контактирующего устройства (КУ). Также для проведения ЭТТ необходима камера тепла и холода и ПК с установленным на нём ПО.

ИКБ соединяется USB кабелем с персональным компьютером (ПК), на котором должна быть установлена программное обеспечение для управления Стендом (ПО). КУ соединяется с ИКБ шлейфами с помощью разъёмов. КУ во время испытаний находится в камере тепла и холода. Количество одновременно испытываемых конденсаторов должно быть равно 256, образуя квадратную матрицу 16х16. Для подключения к КУ служат два шлейфа, подключение производится соответственно, двумя разъёмами D-SUB DB-25. Разъёмы обязательно должны быть с позолоченными контактами. Применение данного типа разъёмов обусловлено возможностью использовать разъёмы как для пайки проводом (для высокотемпературного провода типа МГТФ, 180°С), так и накалываемые на плоский шлейф (до 105°С). Необходимость применения двух раздельных жгутов вызвана стремлением уменьшить токи утечки между проводниками рядов (напряжение питания) и столбцов (приём тока) матрицы.

Для различения разъёмов рядов и столбцов шлейф имеет на одной стороне вилку (DBM), на другой розетку (DBF). Таким образом, обеспечивается однозначность подключения (например, столбцы папа, ряды мама). На столбцы подаётся испытательное напряжение, с рядов считывается ток. В связи с ограниченным до 105°С рабочим температурным диапазоном разъёмов D-SAB, для испытаний при большей, чем 105°С температуре, шлейф из провода МГТФ паяется непосредственно к установочной плате, без разъёма.

Дополнительные проводники в шлейфе предназначены для подключения термодатчика, расположенного на УП и проводников заземления.

**Требования к Стенду:**

Стенд должен позволять проводить испытания безвыводных многослойных керамических конденсаторов, не повреждая их контактов, в то же время, снаряжение КУ испытываемыми конденсаторами и освобождение, не должно быть трудоёмким и должно занимать минимальное время. КУ должно обеспечивать надёжный прижим испытываемых конденсаторов к контактам установочной платы (УП) в течение всего времени снаряжения, испытания и освобождения УП.

Стенд должен обеспечивать подачу стабилизированного напряжения в диапазоне от 0 до 250 В на испытываемые конденсаторы, соединённые в матрицу, состоящую из 16 групп (рядов) по 16 штук (столбцов) одного номинала, заданного для испытания, ограничение тока зарядки и разрядки конденсаторов на безопасном уровне.

Стенд должен обеспечивать непрерывное измерение группового тока утечки для каждой из 16 групп по 16 конденсаторов (ряда).

Стенд должен обеспечивать запуск цикла индивидуальных измерений по заданному программой графику, по заданному условию (например, по увеличившемуся сверх заданного предела току утечки ряда конденсаторов), или по команде оператора. Для этого Стенд должен обеспечивать:

* одновременный разряд всех конденсаторов в безопасном режиме в течение 10 с;
* выключение разрядных ключей;
* измерение тока утечки без подачи напряжения (калибровка нулевого значения тока);
* подачу на любой один выбранный столбец линейно нарастающего с определённой (рассчитанной исходя из ёмкости испытываемых конденсаторов) скоростью напряжения, и далее заданного фиксированного рабочего, при гарантированном нулевом значении напряжения на всех остальных;
* измерение тока зарядки индивидуально всех 16 конденсаторов, подключённых к выбранному столбцу, при воздействии линейно нарастающего напряжения (проводится несколько измерений с усреднением и, при необходимости, отбрасыванием крайних измерений);
* размыкание оптоэлектронных ключей;
* фиксацию индивидуально тока утечки каждого из 16 конденсаторов после 10 с зарядки (проводится несколько измерений с усреднением и отбрасыванием, в случай необходимости, начальных измерений);
* повторение процесса со следующим столбцом, при достижении последнего, подачу напряжения на все столбцы для продолжения ЭТТ;
* сохранение полученных данных с привязкой ко времени в памяти микроконтроллера;
* передачу данных на ПК;
* на основе полученных данных ПО на ПК должно произвести вычисление ёмкости конденсатора и удостовериться в наличии контакта в КУ;
* максимальное время проведения цикла индивидуальных измерений токов зарядки и утечки всех 256 конденсаторов не должно превышать 6 минут (10 с разрядка, 10 с зарядка, 2 с на измерения в каждом из 16 каналов).

Стенд должен обеспечивать непрерывный контроль температуры УП в КУ в течение всего цикла испытания (например, фиксировать в протоколе все изменения температуры на 5°С с привязкой ко времени, или фиксировать значения температуры в заданные моменты времени).

Наличие контакта испытываемого конденсатора в КУ проверяется расчётом значения ёмкости, измеряя ток зарядки конденсатора при заданной скорости нарастания напряжения на конденсаторе. Соответствие расчетного значения ёмкости установленному значению с требуемой точностью означает наличие контакта.

Скорость изменения напряжения должна быть автоматически вычислена ПО на ПК, в зависимости от ёмкости испытываемых конденсаторов, с условием попадания тока зарядки конденсатора в диапазон уверенного измерения тока зарядки конденсатора, или может быть задана оператором.

Максимальная скорость изменения напряжения на выходах стабилизаторов ограничена, - 10 В/мс, при этом ток зарядки конденсатора ёмкостью 10 пФ будет 0,1 мкА. Так как соединительные шлейфы имеют значительную ёмкость, предварительно должна быть проведена процедура калибровки с конкретными шлейфами и пустой УП, чтобы далее программно компенсировать эту ёмкость.

Реальный нижний предел измерения ёмкости и точность измерений в зависимости от ёмкости должны определяться экспериментально, хотя предварительно можно обозначить 10 пФ.

Возможность индикации наличия контакта или значения ёмкости испытываемых конденсаторов должна быть предусмотрена в ПО на ПК.

Пределы измерения тока должны составлять диапазон от 1 нА до 3 мкА (задаётся разрядностью АЦП 12 бит, могут быть скорректированы вверх или вниз простым изменением коэффициента усиления трансимпедансных усилителей).

Рекомендуется проводить испытания всех конденсаторов только одного типономинала. Но, в случае необходимости, если такая возможность будет предусмотрена в ПО на ПК, можно будет проводить испытания конденсаторов с разной емкостью, но с одинаковым рабочими напряжениями. Одновременно могут проводиться испытания конденсаторов только одного типоразмера.

Должен быть предусмотрен режим автономной работы Стенда при отключении кабеля USB или питания управляющего компьютера. Ёмкость АБ должна обеспечивать автономную работу в течение не менее 24 часов.

Протокол передачи данных должен поддерживать обозначение позиционного номера конденсатора в КУ, значение тока утечки и отметки времени проведения каждого измерения, статус контакта (есть (ёмкость)/нет). Температуру протоколировать независимо, например, при изменении на 5°С, с отметкой времени.

**Технические требования к ИКБ:**

ИКБ должно представлять собой устройство с питанием от управляющего компьютера через USB-кабель;

* с возможностью питания от встроенного автономного источника питания (встроенный аккумулятор);
* при подключении к внешнему источнику питания должна обеспечиваться зарядка встроенного аккумулятора с индикацией состояния зарядки;
* на передней панели ИКБ должны быть расположены светодиоды (предположительно): сеть, рабочий режим, обмен USB (примерно как на роутере);
* вся работа ИКБ должна проходить под управлением микроконтроллера;
* ИКБ должно содержать одноканальный программируемый источник стабильного напряжения с 16-канальным коммутатором и 16-канальный трансимпедансный усилитель;
* источник напряжения должен управляться с помощью ЦАП встроенного микроконтроллера;
* считывание значений напряжений на выходах трансимпедансных усилителей производится последовательно, с помощью мультиплексора и АЦП встроенного микроконтроллера;
* должна быть обеспечена безопасная разрядка и зарядка испытываемых конденсаторов;
* должно действовать ограничение тока до безопасного значения как при штатной зарядке и разрядке конденсаторов, так и при аварийных ситуациях, например, пробое конденсатора при испытании;
* должно производиться периодическое считывание значений напряжения АБ и напряжения на выходе стабилизатора;
* должно периодически считываться значение температуры УП, с помощью установленного на ней термодатчика;
* встроенный микроконтроллер должен иметь часы реального времени (RTC), для привязки по времени считанных данных (timing);
* должна быть предусмотрена возможность автономной работы минимум в течение суток, с сохранением данных в памяти и передачей данных в ПК при очередном подключении к нему;
* управление и обмен данными производятся через USB интерфейс с помощью ПО, установленного на ПК;

**Требования к КУ:**

КУ представляет собой металлическое основание (алюминиевый лист и раму, обеспечивающую необходимую жёсткость), на неё через дистанционные прокладки (гребёнка, дистанционные втулки), образующие воздушную полость, и уплотнительные прокладки (силикон) ставится установочная плата (УП), изготовленная печатным методом.

Стеклотекстолит для УП должен быть повышенной теплостойкости, например, FR4HiTg. УП содержит контактные площадки, покрытые последовательно медью, никелем и золотом, для обеспечения надёжного контакта. А также разводку и разъёмы для подключения шлейфов. УП имеет большие размеры, чем основание, так как разъёмы вынесены за его пределы.

Между металлическим основанием и УП образуется полость, которая шлангом через штуцер подключается к вакуумной магистрали. На УП расположены сквозные отверстия, предназначенные для создания вакуумного прижима устанавливаемых конденсаторов. Вакуумный прижим необходим только для временной фиксации устанавливаемых компонентов на УП, и облегчает процесс установки.

Сверху на УП крепится сменная полиимидная сетка – кондуктор, предназначенная для облегчения позиционирования испытываемых конденсаторов. Сетка – кондуктор для каждого типоразмера конденсаторов устанавливается индивидуальная, по размеру посадочного места конденсатора. Для надёжного прижима толщина плёнки, из которой изготавливается сетка-кондуктор, должна быть меньше минимальной толщины испытываемых конденсаторов для каждого типоразмера. Далее, на установленные конденсаторы ложится последовательно защитная полиимидная плёнка (электрическая изоляция), коврик из вспененной силиконовой резины (или иной упругий и распределяющий нагрузку элемент) и накрывается крышкой, аналогичной по конструкции основанию.

После закрепления крышки по периметру винтами - фиксаторами (с необходимым натягом, для обеспечения прижима), можно отключиться от вакуумной магистрали и перенести КУ в камеру тепла и холода.

**Требования к ПО Стенда.**

Включение Стенда должно происходить автоматически, при подключении USB-кабеля к разъёму на корпусе ИКБ. При включении Стенда на всех столбцах должно быть нулевое напряжение.

Работа Стенда в должна следовать следующему алгоритму:

* при запуске ПО на ПК должна быть проведена процедура авторизации оператора;
* при подключении ИКБ к ПК с открытой программой управления и установления связи с ПО на ПК должен зажечься соответствующий светодиод на ИКБ, в окне программы должно выйти приглашение начать работу;
* в начале работы оператор устанавливает рабочее напряжение и ёмкость испытываемых конденсаторов, график циклов измерений, критерии внеочередного включения цикла измерений по аварийному изменению группового тока, и общую продолжительность ЭТТ;
* при включении испытательного режима на все столбцы матрицы подаётся заданное программой испытания рабочее напряжение;
* с рядов матрицы непрерывно считывается значение суммарного тока утечки группы из 16 конденсаторов, результаты измерений передаются в ПК, при автономной работе сохраняются в памяти только изменения значений с привязкой ко времени;
* по графику измерений, по аварийному изменению группового тока утечки, а также по команде оператора инициируется запуск цикла индивидуальных измерений тока;
* результаты передаются в ПК, при автономной работе значения измерений с привязкой ко времени сохраняются в памяти;
* при автономной работе Стенда все данные передаются в ПК при очередном подключении ИКБ к ПК.

ПО на ПК должно обеспечивать:

* контроль доступа персонала к управлению Стендом (парольный вход);
* регистрацию новых сотрудников;
* удобный интерфейс управления Стендом (ТЗ на ПО);
* возможность аудио- и визуальных сообщений о событиях;
* протоколирование событий;
* формирование форм отчётов.

**Алгоритм измерения ёмкости.**

Измерение ёмкости конденсатора производится методом измерения тока зарядки конденсатора, напряжение на котором линейно растёт с заданной скоростью. Так как предусмотрено измерение только положительного значения тока, измерения на спаде напряжения не производятся. Для повышения точности измерения необходимо, чтобы ток зарядки конденсатора составлял не менее 10% и не более 70% от максимального значения измеряемого тока, а скорость возрастания напряжения должна задаваться программно. Первый раз это должно происходить путём вычисления оптимального значения тока зарядки исходя из ёмкости конденсатора. Далее используется найденное оптимальное значение.

Моделирование в среде Multisim принципиальной схемы стабилизатора напряжения даёт максимальную скорость нарастания напряжения на выходе стабилизатора порядка 10 В/мс, что даёт для ёмкости 100 пф (минимальная ёмкость, включающая в себя и ёмкость монтажа) значение тока зарядки 1 мкА, что удовлетворяет условию точности измерения. При этом реально возможно будет измерить ёмкость порядка 10 пФ. Для больших значений ёмкости конденсатора устанавливается, соответственно, меньшее значение скорости нарастания.

Дополнительно, данный метод позволяет измерять ёмкость при любом рабочем напряжении на конденсаторе, от ноля до максимального, следовательно, получать зависимость ёмкости конденсатора от напряжения на нем.

Иногда при операции АЦП возникает корреляция между порядковым номером считанного значения и ошибкой. Для уменьшения этого явления интервалы времени между моментами установки значения напряжения на выходе стабилизатора не должны совпадать или быть кратными с интервалами времени между считыванием значения тока, для предотвращения возможных ошибок АЦП при равномерном ступенчатом изменении напряжения на выходе стабилизатора. Интегрирование значений тока, считанных с иным, в отличие от периода записи данных в ЦАП стабилизатора напряжения, позволит от этих ошибок избавиться.

Например, основной цикл АЦ преобразований (16 отсчётов) выполнять равномерно, например, по таймеру, а запись значения напряжения чередовать случайным образом внутри 2 - 3 циклов АЦ преобразования, каждый раз вычисляя новое значение ступенчато нарастающего напряжения в зависимости от выбранной позиции ЦА преобразования внутри цикла АЦ преобразований.

В зависимости от заданных в начале работы критериев, выбирается группа данных, на основе которых вычисляется значение ёмкости и делается вывод о наличии или отсутствии контакта конденсатора в КУ.

**Требования к встроенному микроконтроллеру.**

С учётом последовательного характера работы АЦ и ЦА преобразования для плавного нарастания напряжения на выходе стабилизатора, среднее время полного цикла из от 32 до 48 АЦ и одного ЦА преобразований должно быть не более 100 мкс, соответственно, максимальная скорость преобразования должна быть не менее 1 MSPS. Такая скорость необходима только для измерения минимального значения ёмкости конденсаторов (единицы пФ), или для калибровки Стенда.

Реальная требуемая скорость АЦ преобразования будет обратно пропорциональна ёмкости испытываемых конденсаторов, и не требует от микроконтроллера большой производительности. Следовательно, можно исключить арифметические операции с плавающей запятой, DSP-команды.

Требуется:

* 12-бит АЦП 16 каналов контроль тока + 2 канала контроль напряжения;
* 12-бит ЦАП 1 канал установка напряжения стабилизатора;
* максимальная скорость АЦ и ЦА преобразования не менее 1 MSPS;
* интерфейс USB2.0;
* интерфейс SPI;
* интерфейс JTAG/SWD;
* RTC: секундная точность, аппаратный календарь;
* возможность работы в энергосберегающем режиме (автономная длительная работа от АБ)

Вывод: встроенный микроконтроллер должен принадлежать к семейству STM32, ядро ARM 32-бит Cortex™-M3.

Например, подойдёт микроконтроллер STM32L152RBT6:

* Flash - 128КБ,
* RAM - 32КБ,
* EEPROM - 4КБ,

интерфейсы:

* USB2.0 FS,
* 3xUSART,
* 2xSPI,
* 2xI2C,
* 8 таймеров,
* 20-канальный 12-бит АЦП 1мкс,
* компараторы,
* 2х12-бит ЦАП,
* часы реального времени,
* контроллер LCD 4х32.

**Особенности конструкции**

Для ускорения разработки предлагается использовать готовую плату - STM32L152C-DISCO, отладочную плату на базе MCU STM32L152RBT6. Она включает в себя встроенный интерфейс средства отладки ST-LINK / V2, ЖК-дисплей (24 сегмента, 4 общих), светодиоды, кнопки, линейный сенсорный датчик и четыре сенсорные клавиши.

Все необходимые выводы микроконтроллера продублированы на штыревые линейки с шагом 2,54 мм по краям вдоль длинных сторон платы, что позволяет легко встраивать плату в любое изделие. Таким образом, конструктивно ИКБ состоит из основной платы, на которой расположены узлы питания Стенда, стабилизатор и коммутатор напряжения, трансимпедансные усилители. На этой же плате расположены разъёмы для присоединения КУ. Сверху в разъёмы вставляется отладочная плата. Питание и коммуникация с ПК происходят через разъём USB, расположенный на отладочной плате.

**Стабилизатор и коммутатор напряжения.**

К системе питания в целом и к стабилизатору напряжения в особенности, необходимо предъявлять повышенные требования в части экономичности. При сравнительно высоком напряжении 250 В и потребляемом токе, например, 4 мА, потребляемая мощность составит 1 Вт, что очень много для изделия с преимущественно батарейным питанием (требование автономной работы в течении суток).

Стабилизатор напряжения двухступенчатый, первая ступень - повышающий DC/DC преобразователь, вторая ступень - линейный стабилизатор с ограничением выходного тока безопасным значением (порядка 1 мА). Стабилизация выходного напряжения аналоговая во второй ступени, опорным служит напряжение, вырабатываемое ЦАП микроконтроллера. Первая ступень на основе импульсного повышающего преобразователя поддерживает перепад напряжения в 10 В на линейном стабилизаторе второй ступени. Одновременно выходное напряжение первой ступени, всегда на 10 В превышающее выходной напряжение стабилизатора, является источником дополнительного питания для верхнего плеча драйверов выходного коммутатора.

Стабилизатор выполнен на ОУ и транзисторах BSS126, BSS127. Транзисторы с индуцированным каналом применены в качестве управляющего и проходного, транзистор со встроенным каналом, - в качестве источника тока (ИТ), - нагрузки управляющего транзистора. В результате собственное потребление стабилизатора не превышает 250 мкА.

Выходной коммутатор состоит из стандартных драйверов полумоста (например, IR2184, IR2104S), и транзисторов BSS126, BSS127. В цепь истока транзистора BSS127 нижнего и верхнего ключа включается ИТ на транзисторе BSS126, ограничивающий ток разрядки конденсаторов безопасным значением 2 мА. Значение тока выбрано из условия безопасного режима транзисторов ключей при любом напряжении питания, вплоть до максимального. Также это значение безопасно для испытываемых конденсаторов.

Данное значение тока достаточно для разрядки, например, 16 конденсаторов 100 мкФ 6,3 В суммарной ёмкостью 1600 мкФ (реально худший вариант). Разряд будет происходить постоянным током 2 мА до остаточного напряжения на конденсаторах 1,8 В (), далее разряд будет происходить на резистивную нагрузку (токозадающее сопротивление 430 Ом + сопротивление каналов двух транзисторов) 0,9 кОм (), за оставшиеся 6,4 с конденсаторы разрядятся до напряжения 0,58 В. Такое остаточное напряжение не повлияет на точность измерения тока утечки. Этот простейший рассечет и послужил причиной выбора времени разрядки - зарядки в цикле индивидуальных измерений равным 10 с. Любые другие меньшие значения ёмкости даже при больших рабочих напряжениях будут разряжаться быстрее.

В аварийной ситуации пробоя во время ЭТТ отдельного конденсатора, ограничителем тока разряда для остальных параллельных ему 15 конденсаторов будет ИТ в истоке верхнего ключа, также ограничивая ток разряда конденсаторов на уровне 2 мА. Так как стабилизированный источник рабочего напряжения питания имеет ограничение по току на уровне 1 мА, разряд конденсаторов будет происходить в итоге разностным значением тока, 1 мА. То есть, через аварийный конденсатор с КЗ будет течь ток 2 мА, ограниченный ИТ в верхнем ключе, из которых 1 мА - это рабочий ток стабилизатора, и ещё 1 мА - ток разряда всех оставшихся 255 конденсаторов. Разряд будет происходить медленно, до достижения конечного напряжения на конденсаторах 0,9 В.

Для обнаружения таких аварийных ситуаций необходимо отслеживать напряжение на выходе стабилизатора рабочего напряжения. Плавное его уменьшение при одновременной перегрузке в одном из каналов мониторинга суммарного тока (в том, где находится аварийный конденсатор) и обнулении показаний в остальных 15 каналах означает КЗ в одном из конденсаторов. Нахождение конкретного пробитого конденсатора сводится к упрощённой процедуре цикла индивидуального измерения тока утечки. Упрощение состоит в том, что после разрядки всех конденсаторов, напряжение подаётся поочерёдно на все столбцы, контролируя при этом значение рабочего напряжения на выходе стабилизатора. Искомый столбец тот, напряжение на котором не поднимется выше 0,9 В. Ряд матрицы (канал мониторинга тока) уже известен.

При дальнейшем продолжении испытания столбец с пробитым конденсатором не включается, и все 16 конденсаторов исключаются из числа прошедших испытаний.

Всего в коммутаторе 16 одинаковых каналов, управление прямое от микроконтроллера. Логика управления: все каналы включены, или все каналы выключены, или включен только один по выбору. Дополнительный ключ на нормально замкнутом оптореле на выходе коммутатора позволяет надёжно выключить разряженные конденсаторы из измерительной цепи.



Рис.1 Схема подключения драйвера верхнего и нижнего плеча.

Дело в том, что кроме неполного разряда за конечный интервал времени, конденсаторы с любым поляризующимся диэлектриком обладают эффектом диэлектрической абсорбции. Особенно сильно он проявляется в сегнетоэлектриках, поэтому керамические конденсаторы имеют значительный коэффициент абсорбции, достигающий 1 - 5%. Это приводит к тому, что через замкнутый нижний ключ, и через уже разряженные практически в ноль 15 конденсаторов, продолжает идти небольшой ток деполяризации диэлектрика, который противоположен по направлению измеряемому току утечки. То есть, с замкнутыми нижними ключами результат измерения тока утечки выбранного конденсатора будет меньше на величину тока деполяризации диэлектрика остальных 15 конденсаторов. Если проводить измерения с разомкнутыми нижними ключами, будет мешать ток утечки верхнего ключа. Чтобы не учитывать эти токи, и был введён дополнительный ключ на оптореле. Предлагается проводить измерение тока утечки, когда дополнительный ключ на оптореле разомкнут. Справочное значение сопротивления закрытого ключа оптореле 1011 Ом, и указана утечка не выше 0,1 мкА, при напряжении 400 В и нормальных условиях. Утечка по корпусу оптореле также незначительная, так как управляющее напряжение привязано к земле, и величиной порядка 1 В. Поэтому, даже при остаточном напряжении на разряженном конденсаторе равном 1 В, ток утечки, обусловленный наличием этого напряжения, будет равен 10 пА, исходя из сопротивления утечки, и 0,25 нА, экстраполируя значение тока утечки при 400 В.

Суммарное потребление драйверов по напряжению питания +12 В не выше 2,5 мА. Бутстрепное питание (Рис. 1), не используется, заменено подпиткой от первой (импульсной) ступени высоковольтного стабилизатора стабилизированным током 30 - 50 мкА через ИТ на транзисторе BSS126. Суммарное потребление от высоковольтного стабилизатора не выше 1 мА.



Рис. 2 Структурная схема Стенда для ЭТТ.

Обозначения на структурной схеме:

ТИУ - трансимпедансные усилители.

MCU - микроконтроллер.

СН - стабилизатор напряжения.

КУ - контактирующее устройство.

**Трансимпедансный усилитель или входной коммутатор тока?**

Для точного измерения токов утечки испытываемых конденсаторов необходимо соблюдать условие равенства нулю входного сопротивления приёмников тока. Это основная причина, по которой на входе каждого из 16 каналов необходимо применять трансимпедансный усилитель. Если, для экономии, применить однополюсный коммутатор тока перед единственным трансимпедансным усилителем, то сопротивление ключа, равное 10 Ом, приводит к ошибке измерения тока в рабочем канале порядка 0,6 % от среднего значения токов в отключенных каналах. То есть, измерять наноамперные значения тока утечки будет невозможно, при утечке в любом отключенном в данный момент канале хотя бы 1 мкА.

Можно решить эту проблему, применив на входе двухполюсные ключи SPDT, например, типа 4053, но они не удовлетворяют условию минимизации утечки, в основном из-за расположения выводов, при котором нельзя устранить утечки по поверхности корпуса. Стоимость же каждого из наиболее подходящих одиночных ключей, например, ADG749, превышает стоимость ОУ, применяемых в трансимпедансном усилителе.

Таким образом, целесообразно решить эту задачу «в лоб», использовав 16 трансимпедансных усилителей, а коммутация каналов будет за счёт ресурсов микроконтроллера, от которого потребуется минимум 16 входов с функцией АЦП.

Стандартная схема трансимпедансного усилителя инвертирующая, поэтому необходим двухкаскадный усилитель. Например, можно использовать AD8572ARZ, по 2 ОУ в корпусе, распределив усиление по каскадам (100 мВ/мкА и 10), и получив полосу пропускания до 10 кГц, необходимую для измерения минимального значения ёмкости конденсатора. Выбор диапазона измерения токов обусловлен диапазоном рабочих напряжений испытываемых конденсаторов от 6,3 В до 250 В, и критическим значением сопротивления утечки, равным 100 МОм. В пересчёте на токи это даёт диапазон от 63 нВ до 2,5 мкА. Естественно, расширение диапазона измерения лучше произвести в сторону уменьшения измеряемых токов, получив с опорным напряжением 3,00 В и указанными на схеме номиналами пределы измерения от 1 нВ до 3 мкА.

Данный ОУ обеспечивает смещение порядка 1 мкВ, при этом он полностью real-to-real. Целесообразно выбрать напряжения питания минус 1,5 В и +3.3 В, для совместимости с входным диапазоном АЦП микроконтроллера (диапазон до 3 мкА). Суммарное потребление 16 трансимпедансных усилителей составляет 24 мА по обоим напряжениям питания.

На макете будет реализован вариант с 16 ОУ на входе, далее, коммутатор 16/8, и 8 выходных ОУ.



Рис. 3 Принципиальная схема одного канала трансимпедансного усилителя.

**Система питания.**

Система питания должна быть способна проработать не менее 24 часов от АБ, при максимальном потреблении. АБ для совместимости с напряжением питанием микроконтроллера должна быть LiFePO4 типа, с номинальным напряжением 3,2 В (3,0 - 3,3 В в буферном режиме, использование емкости батареи более 80%). Использование единичного элемента, а не батареи, позволяет обойтись без балансира, упростив систему питания.

Преимущества использования данного типа аккумуляторов:

* срок эксплуатации 15 - 25 лет, в зависимости от условий;
* до 10000 циклов зарял - разряд;
* саморазряд в месяц 3 - 5 %;
* диапазон рабочих температур минус 30 - +55 °С.

Оценим энергопотребление системы по шине 3,2 В:

* микроконтроллер - 30 мА;
* усилители тока - 24 мА;
* стабилизаторы, логика и пр. - 5 мА.

Итого, 59 мА потребление непосредственно от батареи. Все другие напряжения питания, такие, как минус 1,5 В, +10 В, +260 В (максимум, при напряжении на испытываемых конденсаторах +250 В) получаются от преобразователей, КПД которых будем считать равным 50%. Оценим потребляемую мощность и рассчитаем потребляемый от батареи ток:

* усилители тока - ;
* логика, драйверы - ;
* стабилизатор - .

Итого, 274 мА потребление преобразователей напряжения. Суммарное потребление составит 333 мА. Необходимая ёмкость АБ с учётом неиспользуемого резерва 20% составит:

. Возможно применение 1 элемента в прямоугольном корпусе 18x65x150 мм, или 2 - 3 цилиндрических элементов 26650 или 32700.

При меньших значениях испытательного напряжения суммарное потребление падает, например, при 50 В на выходе стабилизатора оно составит 166 мА, и заряда батареи должно хватить на 48 часов.

Питание от разъёма USB ограничено значением тока 0,5 А, и максимальное потребление всегда должно быть меньше данной величины. Мы видим, что условие выполняется, и питания хватает и на работу, и на зарядку аккумулятора.

В систему питания должен входить ключ, отключающий аккумулятор от потребителей при снижении напряжения аккумулятора до 3,0 В, или по команде выключения Стенда, последовавшей от ПК. Включение происходит при подключении кабеля к гнезду USB ПК.

На макете система питания неполная, без высоковольтного преобразователя (напряжение подаётся от внешнего ИП), аккумулятор маленький, на 1 А\*ч.