

Измеритель ESR/L/C/F/P/t на PIC16F876A

Потребность в измерителе параметров конденсаторов возникла около трех лет назад, поэтому был приобретен, не дешевый, специализированный LC-метр (марку не озвучиваю). Но в процессе работы выяснилось, что у него слишком большая погрешность при замерах электролитических конденсаторов, емкостью более 6000 мкФ. Второй отрицательный момент, это «прожорливость» прибора. «Крону» приходилось менять каждый месяц. Решил сделать свой измеритель. В качестве вариантов для изучения и повторения рассматривались несколько разработок:

Измеритель C и ESR+LCF (Степан Миронюк (miron63) с сайта pro-radio.ru)

Измеритель C и ESR (Гинц Олег (GO) с сайта pro-radio.ru)

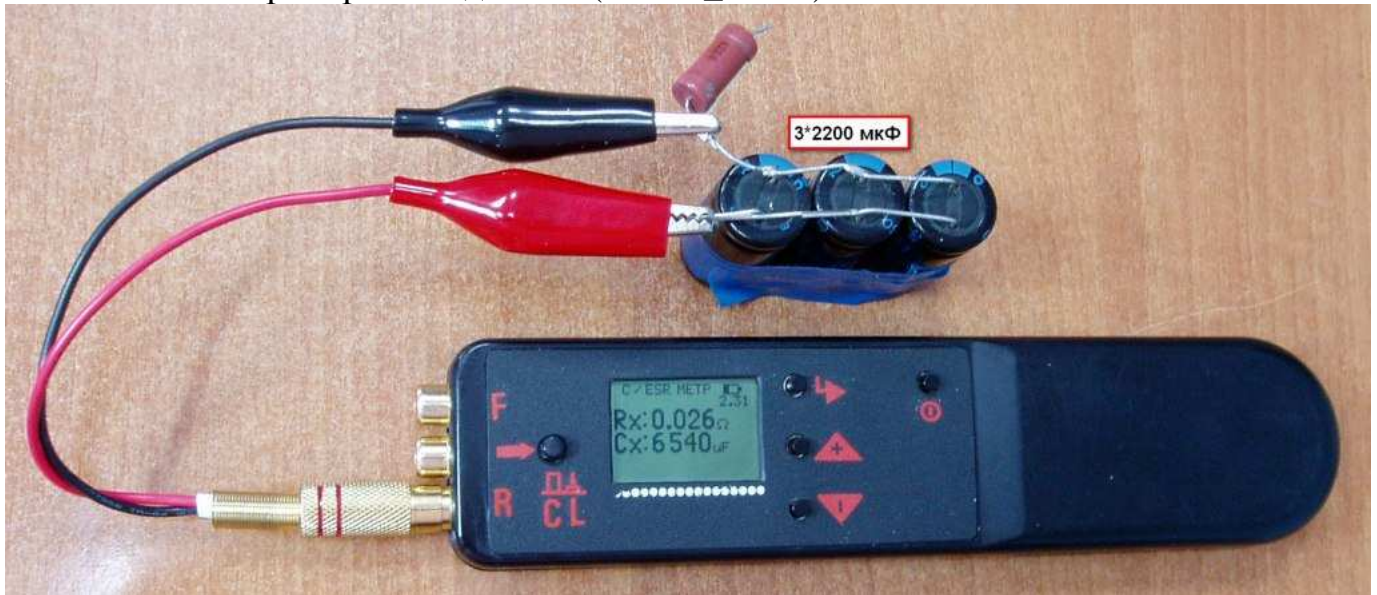
ESR/R/L/C/F meter (by R2-D2 с сайта vrtp.ru, несколько вариантов)

Все приборы хороши по-своему, но хотелось объединить достоинства каждого в своей конструкции. Только, по моему мнению и для моих задач, лучшим вариантом для повторения и модернизации явился измеритель C и ESR+LCF от Степана Миронюка, тем более, автор любезно поделился с общественностью исходниками прошивки МК, за что ему огромная благодарность. Поэтому, задача что-либо изменить или доработать сильно облегчилась. Были сомнения в необходимости оформлять свою конструкцию в виде отдельной статьи, ведь в сети и так полно похожих измерителей. С другой стороны, возможно, именно этот вариант кому-то оптимально подойдет для изготовления, к тому же, внесено достаточно много изменений и доработок. На авторство схемы и метода измерений не претендую, но некоторые улучшения реализовать удалось. Используемый способ измерения емкости конденсаторов, заряжая их стабильным током за определенное время, позволяет получить достаточно точные замеры, но при условии очень малых собственных токов утечек конденсатора. При значительных утечках, сравнимых с токами заряда, получить достоверные замеры емкости практически невозможно. В этом измерителе я попытался анализировать и ориентировочно вычислять такие токи утечек. Главная задача это выявить подозрительные конденсаторы, а уж отбраковывать можно другими способами и приборами.

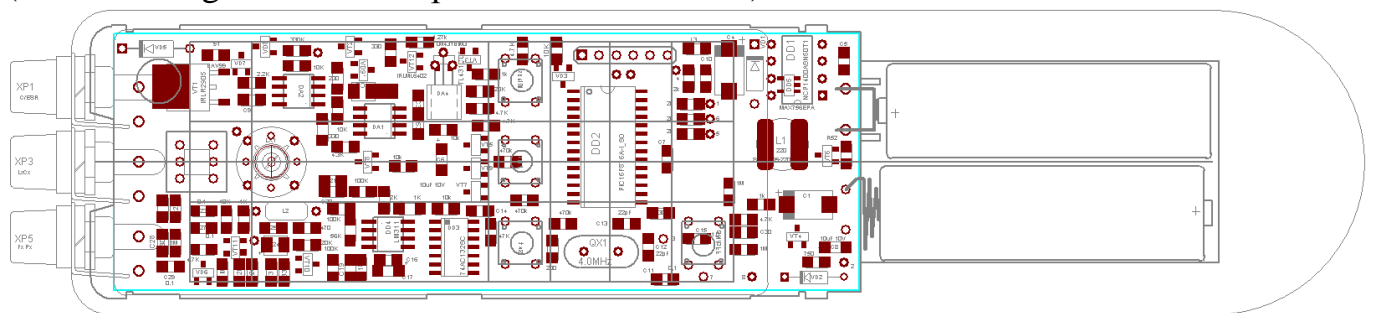
Для питания измерителя хотелось использовать более распространенные источники, например, «пальчиковые» батарейки типоразмера AA или аккумуляторы от сотовых телефонов. Включение и выключение прибора желательно осуществлять одной кнопкой. Хотелось бы исключить процесс изготовления корпуса, а применить какой-либо готовый, из имеющихся в наличии. Это, в свою очередь, потребовало применения более миниатюрного индикатора. Замена строчно-символьного ЖКИ на графический позволила повысить удобство в работе с прибором, улучшилось восприятие и количество выводимой информации, как раз при анализе исправности конденсаторов. Еще захотелось подключить к измерителю датчик температуры, превратив прибор в термометр (иногда в работе требуется). При помощи датчика DS18B20 можно точно измерять температуру внутри корпусов оборудования, а термопарой мерить уже более высокие ее значения (паяльник, фен). Вот такие «хотелки» и реализованы.

Вопросов по переделке схемы не возникло, а вот последующая доработка ПО вытекла в длительный процесс. Менять все было рискованно, поэтому назначение портов МК старался сохранить как в исходной схеме, чтобы в случае неудачи с доработкой, сохранить возможность вернуться к авторской прошивке МК. Это, в свою очередь, не позволило осуществить некоторые дополнительные возможности. Например: управление и вывод информации через UART в порт компьютера, использовать аппаратный ШИМ для формирования отрицательного питания ОУ и др. Без изменений остался только режим счетчика импульсов (на практике никогда еще не потребовался).

Готовый прибор выглядит так (Konstr_0.JPG)



В моем распоряжении имелся лишний пульт ДУ от видеомэганитофона «Фунай», корпус которого и использовал. Он же определил конструктивные особенности изготовления платы прибора и применяемые детали. С левой стороны имеются входные гнезда для подключения проводов, или панелек под измеряемые компоненты. Лишние отверстия передней панели заклеены декоративной пластиной, на ней расположены ЖКИ и 5 кнопок: «Set», «+», «-», вкл./выкл. питания, выбор измерения Cx или Lx. Компоновка и расположение элементов на плате тоже привязано к имеющимся отверстиям в корпусе. ЖКИ установлен под платой, а распайка проводов от него – в соответствующие контактные площадки платы. (PCB_mont.gif Вид со стороны компонентов.)



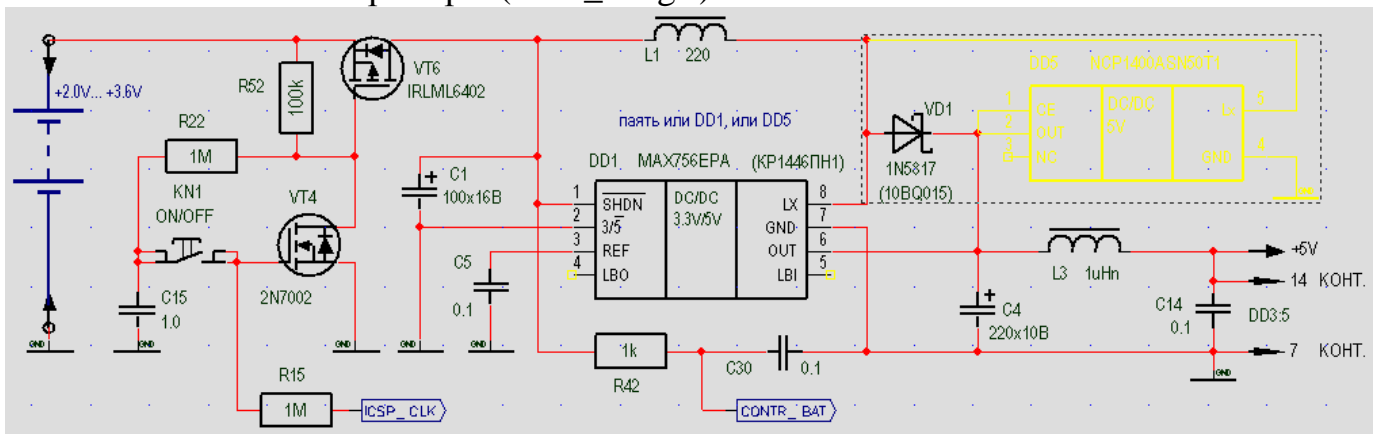
Отсек для двух батареек типоразмера AA (аккумуляторов) определил вопрос с питанием. Теоретически допустимое входное напряжение питания не менее 2В и не более 5В. Преобразователь MAX756EPA может запускаться и при 1В, но вот

полевые транзисторы при этом работают плохо. В готовом приборе потребляемый ток меняется от 20 до 40 мА при различных режимах работы. В режиме частотомера потребление максимально. Настройка прибора и отладка программы проводилась на уже использованных батарейках от фотоаппарата, с суммарным начальным напряжением 2,5В. Фотик уже отказывался от них работать, а в измерителе они еще послужили около месяца. Так что для питания подойдут самые дешевые китайские батарейки или уже отслужившие свой срок щелочные, которых иногда бывает предостаточно. Есть мысли сделать питание от USB разъема через последовательно включенный диод, или, по крайней мере, подзаряжать аккумуляторы, но это дело будущего. Обычно доводка конструкции до желаемого результата может длиться годами по мере возникновения новых идей.

Схема состоит из нескольких основных функциональных узлов:

1. Схема питания прибора
2. Цифровая часть (микроконтроллер PIC16F876A, ЖКИ и коммутатор)
3. Блок измерений конденсаторов
4. LC-генератор на LM311
5. Входной формирователь частотомера

Схема питания прибора (SCH_BP.gif)



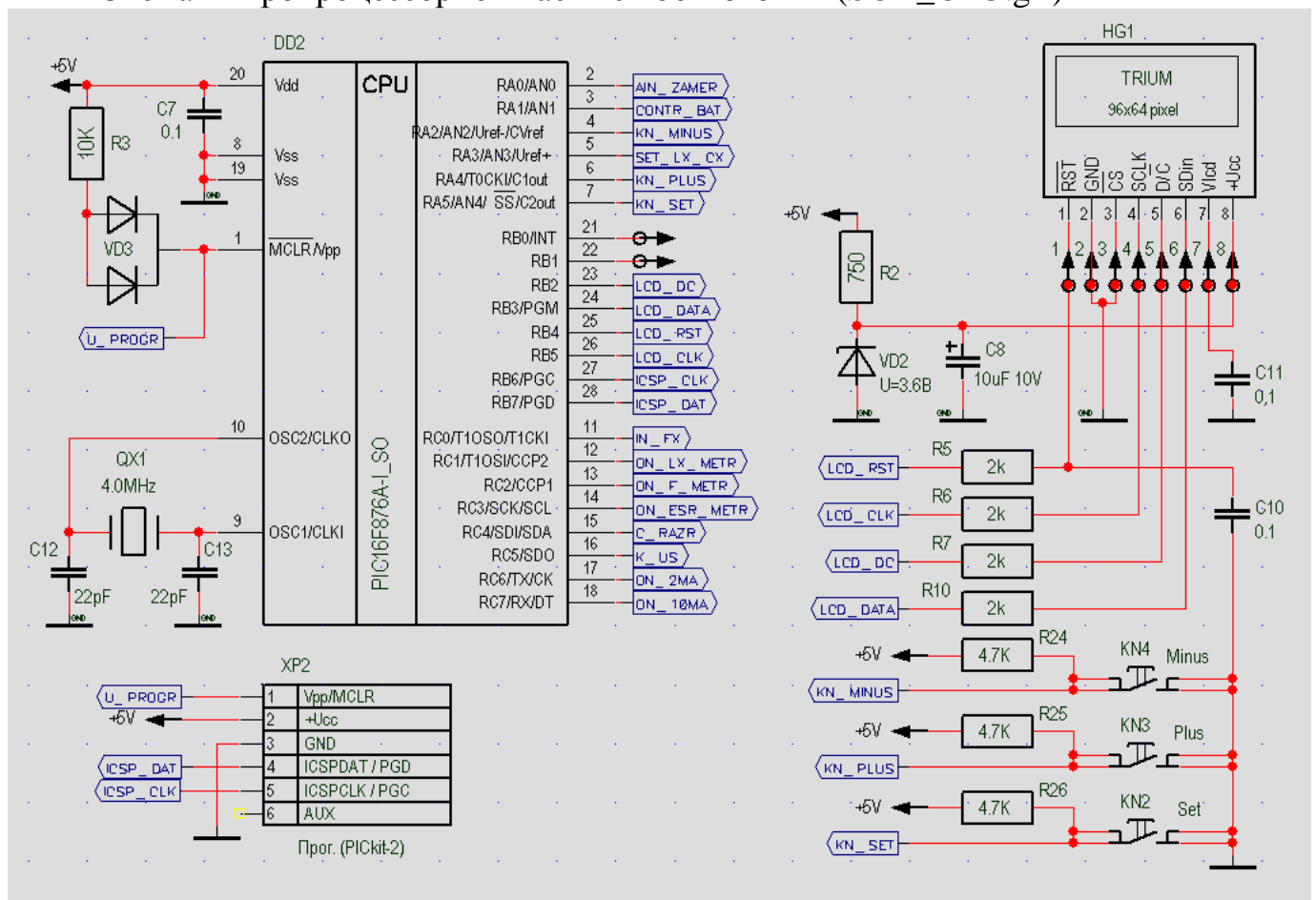
Включение и выключение питания производится одной кнопкой KN1. В исходном состоянии VT6 и VT4 закрыты, C15 заряжен до напряжения батареи, питание на схему не подается. При нажатии на кнопку затвор VT4 соединяется с конденсатором C15, открывая оба транзистора, включается DC/DC преобразователь. После инициализации портов на RB6 устанавливается высокий уровень сигнала, удерживая VT4 в открытом состоянии. Конденсатор C15 медленно разряжается через открытый транзистор и R22. Даже если продолжать удерживать кнопку нажатой, то напряжение на затворе не опустится ниже 2.5В, что удержит схему во включенном состоянии. При отпускании кнопки C15 разрядится до минимума. Выключается питание двумя способами: повторным нажатием на кнопку или программно. Выключение кнопкой происходит следующим образом: разряженный конденсатор C15 шунтирует цепь затвора VT4, вызывая его закрытие, а затем закрывается и VT6, снимая питание со схемы DC/DC преобразователя. Выключение питания программным способом осуществляется установкой низкого уровня сигнала на RB6 (автоматическое выключение по времени или при разряде аккумулятора).

ниже нормы). В преобразователе возможно применение микросхем: MAX756, MAX856, отечественного аналога КР1446ПН1, или вместо DD1 запаять DD5 типа NCP1400ASN50T1. Можно применить и другие аналогичные преобразователи на выходное напряжение +5В.

В качестве ключей питания отдельных узлов схемы использованы полевые транзисторы IRLML6402. Конечно, их стоимость немного выше, чем биполярных, но по параметрам они подходят значительно лучше. Падение напряжения на открытом транзисторе мизерное, да и ток управления затвором нулевой. Несмотря на это, резисторы в цепях затвора пришлось оставить, даже увеличить номинал до 200...470кОм, чтобы «затянуть» время открытия транзисторов (около 300мкс). Иначе бывали сбои в работе МК в моменты переключения режимов измерений, появлялись помехи по питанию при быстром перезаряде шунтирующих емкостей.

Использование микроконтроллера PIC16F876A обусловлено несколькими причинами. Для графического ЖКИ потребовался дополнительный объем памяти (таблицы символов). Так же, наличие встроенного компаратора и цепочки резистивного делителя в формирователе опорного напряжения позволяют отказаться от использования медленного АЦП в некоторых замерах. Программируется МК внутрисхемно, программатором PICkit-2.

Схема микропроцессорной части с «обвязкой» (SCH_CPU.gif)



Применение ЖКИ от сотового телефона «Trium mars» связано с его малыми размерами, удобством распайки, ну и, конечно, с наличием такового. С коррекцией

прошивки можно применить дисплеи от Nokia 1110i или 1200. ЖКИ от Nokia 3310 подходит хуже всех (маленькое поле 84x48), удобен только тот, у которого на стекле есть позолоченные контакты. Китайский вариант с металлической рамкой не влезал в корпус, а без рамки его подключить почти невозможно. В общем, многое зависит от применяемого корпуса прибора.

После включения питания измеритель переходит в тот режим измерений, в котором он находился до выключения. Соответствующая надпись выводится на ЖКИ в первой строке. Там же отображается знак полноты заряда батареи с числовым значением измеренного напряжения. Последовательным нажатием на кнопку «Set» (или ввод) можем «по кругу» менять режимы измерений:

C/ESR – metr (измерение емкостей и ЭПС конденсаторов)

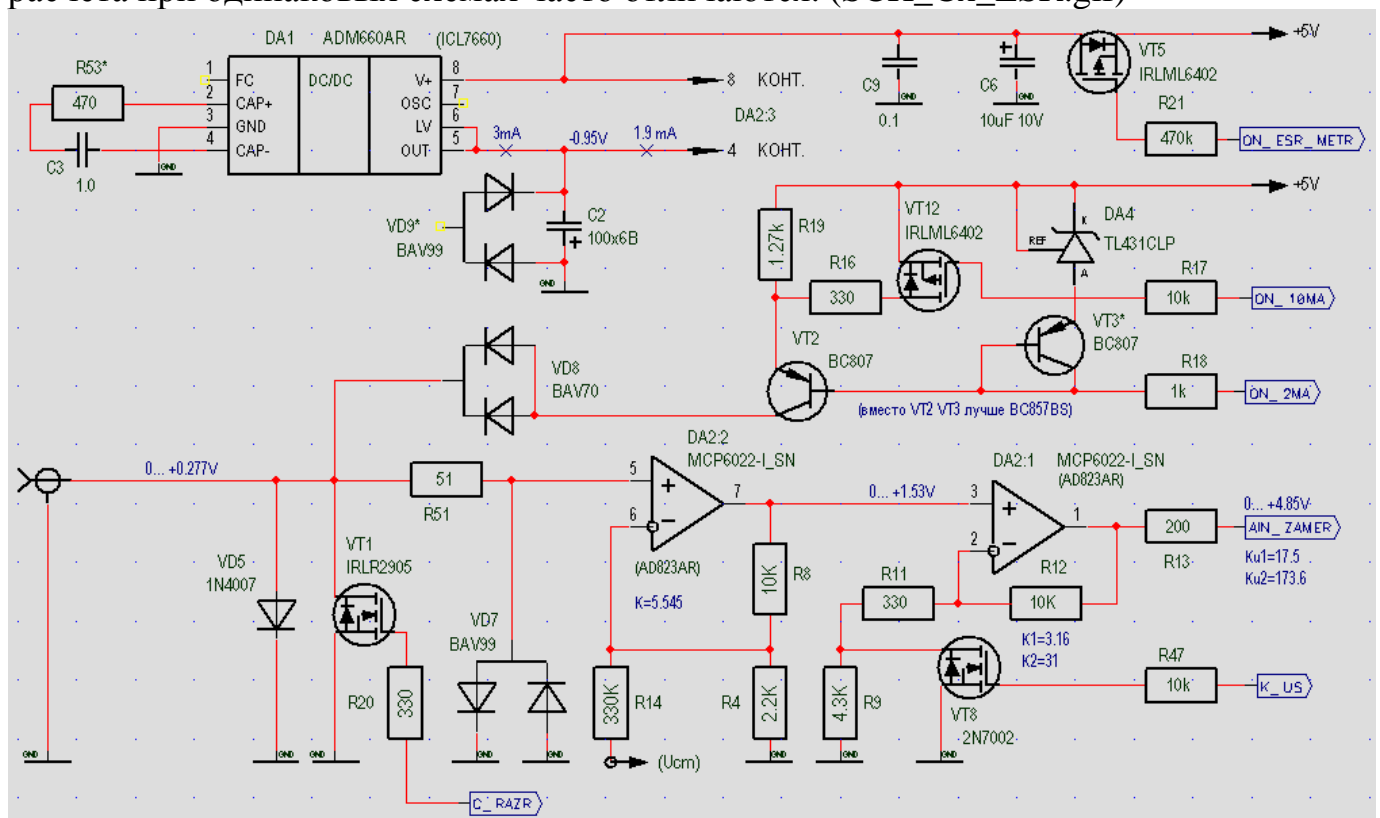
Cx-metr / Lx-metr (измерение малых емкостей или индуктивности катушек)

F- metr / P-metr (частотомер или счетчик импульсов)

Termo – metr (термометр, на DS18B20 или термопаре)

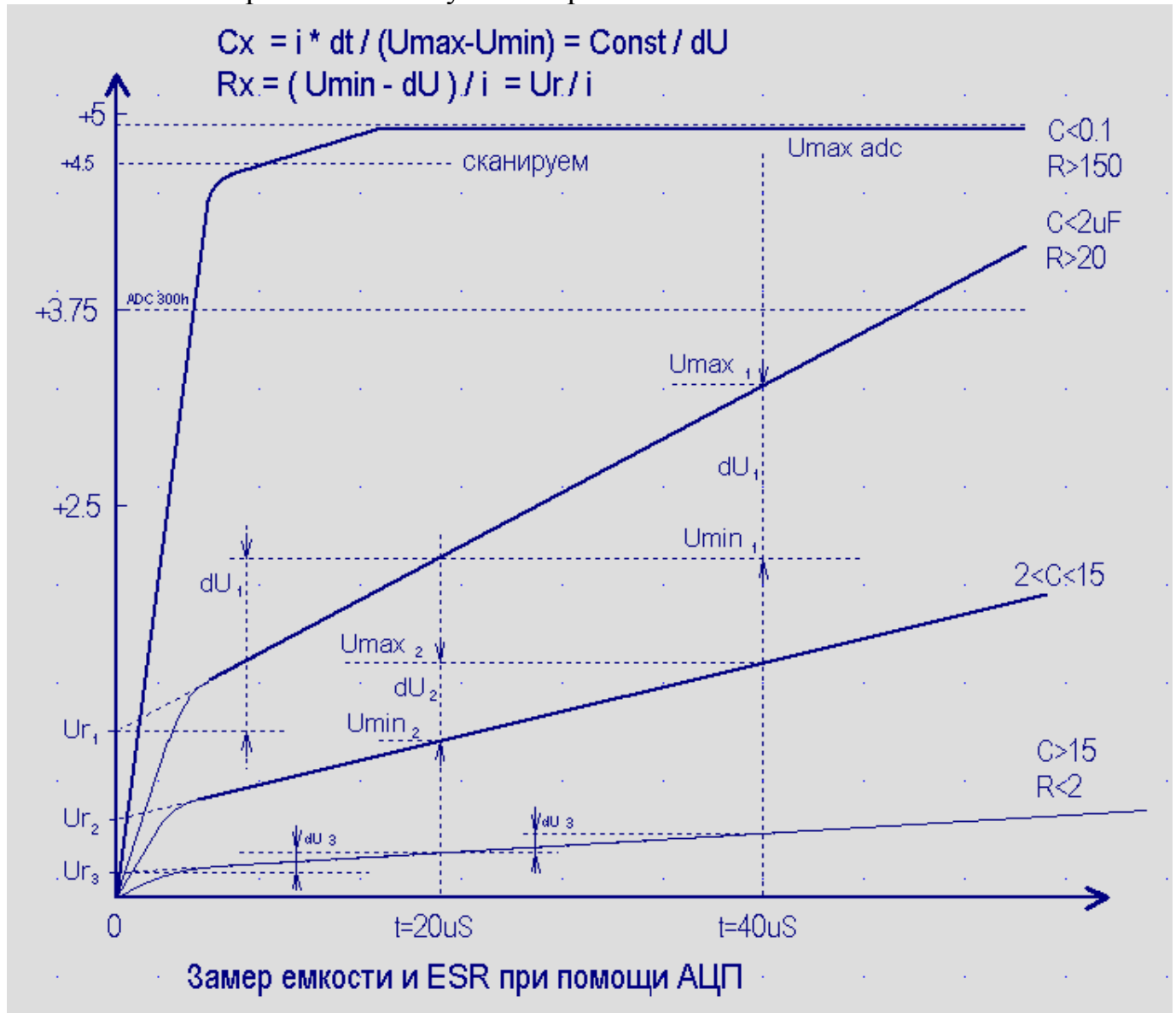
Кнопки «+» и «-» служат для установок параметров и значений в сервисных меню, для быстрой установки нуля. В режиме C/ESR-metr при отключенных щупах на ЖКИ выводится название режима, состояние батареи питания, надписи «сканирование» и значение АЦП в десятичном виде. При подключении конденсатора или резистора происходит замер их параметров и в 3-6 строках ЖКИ крупным шрифтом выводятся измеренные значения емкости и сопротивления. Если ток утечки конденсатора превышает уст. порог, то в нижних строках выводится ориентировочное значение сопротивления R_u в Ом.

Схема измерения в особых пояснениях не нуждается, хотя методы замера и расчета при одинаковых схемах часто отличаются. (SCH_Cx_ESR.gif)



В данном приборе, использован способ замера емкости при помощи источника стабильного тока и заданного интервала времени заряда. Этот метод двухточечного

замера хорошо описал Степан в своей конструкции. Внесены некоторые изменения в алгоритм самих замеров. Для вычислений емкости и ESR все сводится к измерению двух напряжений за определенные промежутки времени. Исходя из минимального тока заряда и минимального усиления на ОУ, сопротивление резисторов (а так же ESR) измеряется только от 0 до 130 Ом. Этого достаточно, ведь большие сопротивления резисторов можно определить и обычным тестером, а конденсатор с повышенным сопротивлением лучше забраковать.



Для определения емкости конденсатора нужно знать, как изменится на нем напряжение при заряде стабильным током за калиброванный промежуток времени:

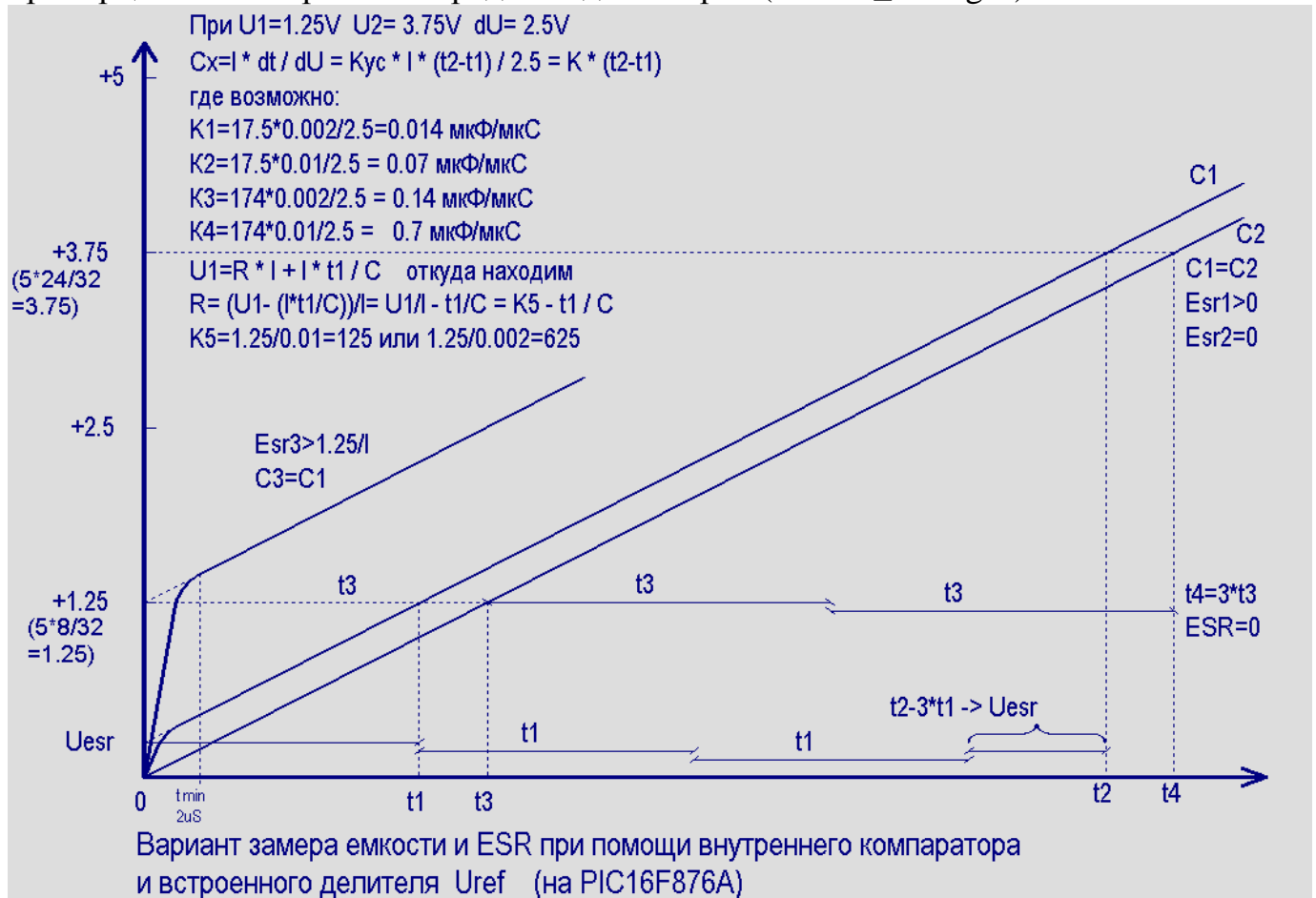
$$C_x = I \cdot dt / dU = \text{const} / (U_{max} - U_{min})$$

А вычисление ESR сводится к расчету величины «скачка» напряжения (U_r) на конденсаторе в момент подачи зарядного тока. Причем, расчетная величина не зависит от емкости конденсатора, т.е. с одинаковым успехом можно измерять и обычные резисторы. После подачи тока, независимо от времени, напряжение на резисторе меняться не будет, а значит $U_{max} = U_{min}$ ($dU=0$), тогда

$$R_x = U_r / I = (U_{t2} - dU) / I = (U_{max} - (U_{max} - U_{min})) / I = U_{adc} / I$$

В исходном состоянии (сканирование) циклически проверяется подключение измеряемого элемента. Подается ток заряда 2мА на входные клеммы прибора при минимальном усилении ОУ, через фиксированное время t_1 (20мкс) считывается значение АЦП и проверяется на «зашкаливание». Если значение АЦП не превышает порога 4,5В., то производим 50 циклов замеров, и в каждом вычисляются и суммируются соответствующие напряжения (U_1 и U_2) для последующего усреднения. Каждый цикл начинается с разряда конденсатора (транзистором VT1), затем включается зарядный ток и через время t_1 считывается значение АЦП (U_1). Затем снова разряжаем конденсатор и включаем ток заряда, но преобразование и считывание АЦП (U_2) производится через время t_2 . Для простоты расчетов время t_2 равно удвоенному времени t_1 . Измерения на всех диапазонах происходят по одинаковому алгоритму. Далее математический расчет dU и U_r для определения емкости конденсатора и его ESR. Если dU менее определенной величины, то возможно подключен конденсатор большой емкости или резистор. Алгоритм замера конденсаторов большой емкости изменять не стал, точность вполне устраивает. Его суть такова: измеряется время заряда конденсатора током 10мА до уровня половины опорного напряжения АЦП (2,5В). Далее аналогично, имея время dt и фиксированное значение dU , вычисляется емкость.

Планирую опробовать аналогичный метод измерений, используя стабильный ток заряда и фиксированную величину напряжения заряда. В этом случае емкость пропорциональна времени заряда конденсатора. (COMP_ESR.gif)



В этом варианте используется компаратор с внутренним источником опорного напряжения. Измерение времени заряда таймером происходит при условии, что

напряжение на конденсаторе уже достигло нижнего порога +1,25В и еще не превысило верхнего +3,75В. В этом случае dU всегда будет 2,5В, естественно после усиления ОУ. Этот метод пока не реализован.

Определение тока утечки конденсатора основано на его способности сохранять заряд, в течение фиксированного промежутка времени. Используя встроенный в МК компаратор, заряжаем испытуемый конденсатор до 0,2В. Потом отключается ток заряда и задается выдержка времени, по окончании которой измеряем падение напряжения на конденсаторе. Точно определить токи утечки достаточно сложно, ведь имеем две неизвестные и взаимозависимые величины. Нельзя определить ток утечки пока достоверно не вычислили емкость. А емкость зависит от тока заряда, который, в свою очередь, уменьшается на неизвестный ток утечки, влияющий на замеры. Поэтому меня вполне устроил приблизительный расчет, выраженный как сопротивление утечки. Если это сопротивление более 2 кОм (ток менее $0,2/2000=100\mu\text{A}$), то можно считать, что конденсатор исправен, измеренному значению емкости можно доверять. На ЖКИ выводятся только значения емкости и ЭПС. Если сопротивление менее 2 кОм, то на дисплей дополнительно выводится это сопротивление R_u . Если напряжение на конденсаторе упало почти до нулевого значения, емкость явно рассчитана не верно, отображается надпись «Сх: БРАК»

В приборе осталась возможность измерения сопротивлений при постоянном токе, к тому же, диапазон расширен до максимального значения. Все происходит аналогично замеру ESR, но ток заряда в циклах замеров не отключается. Для измерений в этом режиме нужно удерживать нажатой кнопку «плюс». Обновление показаний замеров на ЖКИ происходит значительно чаще.

Калибровка смещения нуля АЦП происходит автоматически, при нажатии кнопки «минус». При этом щупы или входные гнезда измерителя должны быть замкнуты, иначе будет выведено сообщение об ошибке. Числовые значения смещения условного нуля АЦП (для каждого диапазона) потом используются в расчетах. Они содержат в себе компенсацию сопротивлений проводов, входных контактов разъема, напряжение смещения усилителя. Калибровка делается так: подается ток заряда, считываются 50 замеров АЦП, с суммированием значений. Если условный порог не превышен, то сумма записывается в памяти EEPROM. Аналогично калибруются все 3 диапазона (при выключенном и включенном усилении, токе 10мА и токе 2мА). По окончании на ЖКИ выводится сообщение «Запись EEPROM» и три значения калибровки в десятичном виде. Через 3 секунды прибор возвращается к исходному состоянию и готов к работе.

Для проверки токов заряда включить прибор, удерживая нажатой кнопку «Set» выбрать контролируемый ток (кнопками «+» и «-»). Миллиамперметр должен быть подключен к входным клеммам прибора. Отклонение токов от номинального значения не должны превышать $\pm 5\%$. Важнее не их абсолютное значение, а стабильность во времени и по температуре.

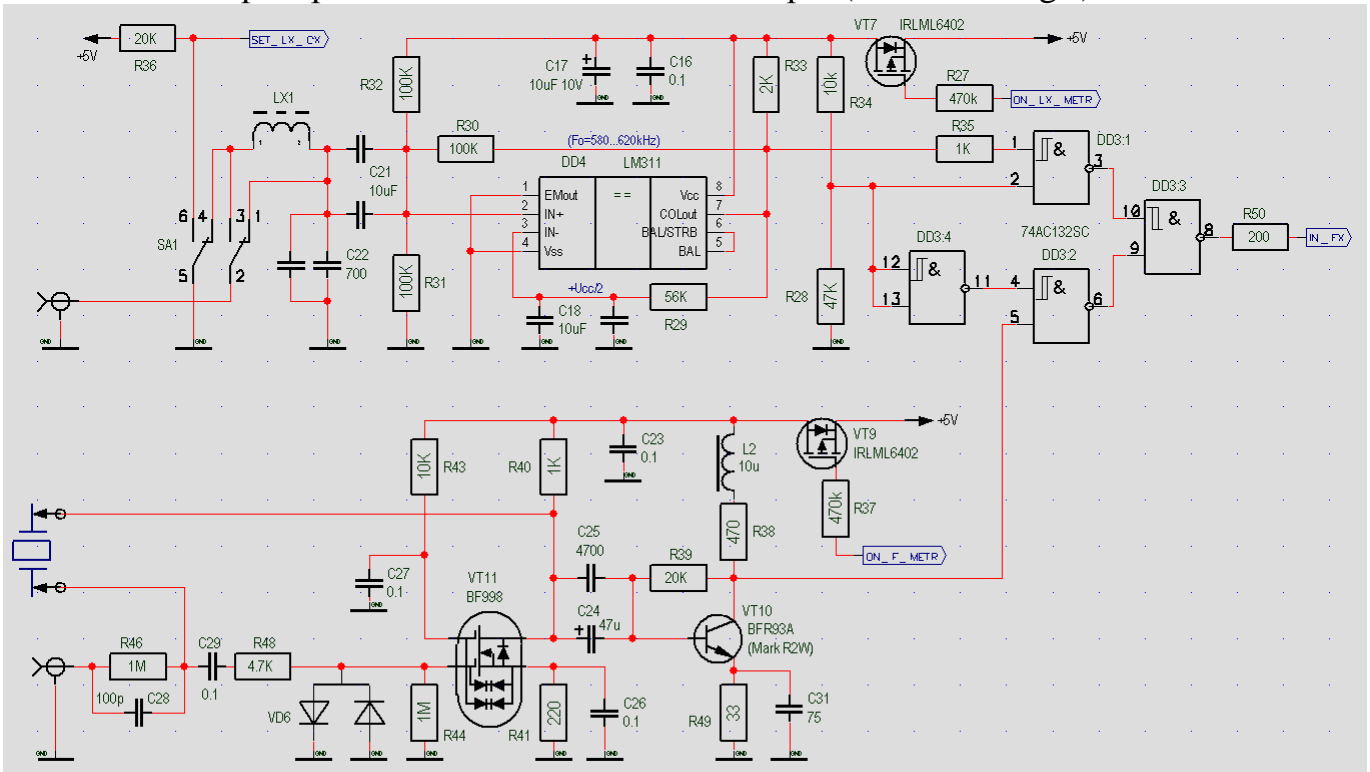
Установка диапазонов измерения производится по точным и известным величинам компонентов. От них зависит точность самого прибора. Для установки диапазонов измерения сопротивлений включить прибор, удерживая нажатой кнопку «плюс». Далее:

1. подключить резистор малого сопротивления 0,5... 2 Ом к клеммам прибора, кнопками «+» и «-» добиться показаний требуемой величины этого резистора, нажатием кнопки «Set» записать значение в память.
2. подключить резистор сопротивлением 10 ... 20 Ом к клеммам прибора, кнопками «+» и «-» добиться показаний требуемой величины этого резистора, нажатием кнопки «Set» записать значение в память.
3. подключить резистор сопротивлением 30 ... 100 Ом к клеммам прибора, кнопками «+» и «-» добиться показаний требуемой величины этого резистора, нажатием кнопки «Set» записать значение в память.

Аналогично произвести настройку диапазонов измерения емкостей, для этого включить прибор, удерживая нажатой кнопку «минус». Для настройки использовать конденсаторы 1... 2 мкФ для первого диапазона, 4...20 мкФ для второго, более 1000 мкФ для третьего диапазона.

Измерение конденсаторов малой емкости и катушек индуктивности при помощи генератора на компараторе хорошо описано в статье «L/C Meter IIВ» (с сайта www.aade.com).

Схема LC-генератора и входной части частотомера (SCH_LxCx.gif)



В схеме LC-генератора следует особое внимание уделить стабильности параметров дросселя Lx1 и конденсатора C22. Дроссель (по рекомендациям от Степана Миронюка) в виде катушки с подстроечным сердечником найти не удалось, да и по габаритам он не поместится в имеющийся корпус. Поэтому пришлось экспериментировать и подбирать из того, что есть. На кольцо от мат. платы (зеленое с синим торцом) с размерами 8x4x3 намотал 56 витков провода ПЭВ-2-0.33. Индуктивность получилась 101.2 мкГн, а добротность Q=11,3. При незначительном прогреве готового дросселя уход его индуктивности не обнаружен. В таком варианте дроссель был пропитан лаком и запаян в схему. Конденсатор C22 составлен из

нескольких чип-1206 МПО (трех штук по 200пФ и одного 100пФ). Конденсаторы С21 и С18 так же составные (по 2 шт.), использованы керамические от материнских плат емкостью 4,7мкФ.

Группа разработчиков с сайта vtrp.ru в подобном приборе (ESR/R/L/C/F meter от R2-D2 второй версии) внесли некоторые изменения в схему, что улучшило стабильность работы генератора и расширились измеряемые диапазоны. Сам пока эти улучшения не опробовал.

Принцип измерения индуктивности и малых емкостей конденсаторов основан на расчете частоты колебаний LC контура по формуле: $F=1/(2\pi*\sqrt{LC})$

Можно ее преобразовать в другой вид: $F^2=0,025330296/(LC)$

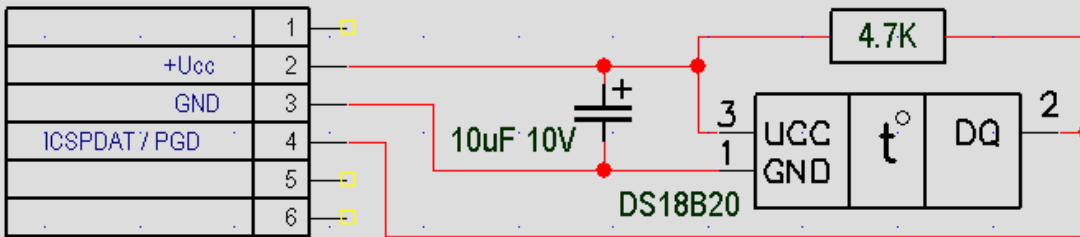
Отсюда можно вычислить нужные нам величины, измерив частоту генератора на компараторе и LC-контуре. Паразитные значения схемы монтажа (Cs и Ls) вычисляются в программе установки нуля, так же учитываются в расчетах. Настройку LxСх измерителя пока описывать не буду, хочется автоматизировать этот процесс, возможно будут изменения.

Входной формирователь частотомера тоже "без особенностей", многими опробован, работает отлично, нареканий нет, поэтому и изменять в нем ничего не стал. Есть маленький минус, но, возможно, это только у моей конструкции: не получается проверять кварцевые резонаторы на частоте менее 1МГц и более 40МГц. Низкочастотные – не возбуждаются, а высокочастотные – работают на кратных гармониках, например, вместо 48МГц возникает возбуждение на 16МГц. Вообще, такие мелочи можно не учитывать, т.к. это не основная задача прибора.

Настройка частотомера сводится к проверке входного формирователя на прохождение импульсов от входа схемы до 11 вывода МК, а так же подгонке поправочного коэффициента для кварцевого резонатора. Подаем от генератора на вход частотомера сигнал известной, калиброванной частоты, проверяем соответствие измеренного значения и установленного на генераторе. В случае отклонения от заданной величины, входим в режим коррекции времени замера длительным нажатием на кнопку «минус». На дисплее появится сообщение «настройка N=1.000». Далее кнопками «плюс» или «минус» подогнать соответствие показаний измеренного значения частоты входному сигналу. Каждое нажатие на соответствующую кнопку уменьшает или увеличивает измерительный интервал на 1мкс (при частоте кварца 4МГц). Сохранить корректировку нажатием кнопки «Set». Формат вывода измеренной частоты зависит от ее величины. Если частота менее 1МГц, то выводится число в единицах Герц. Если превышен этот порог, то выводится число МГц с разделительной десятичной точкой (возможно, еще придется корректировать).

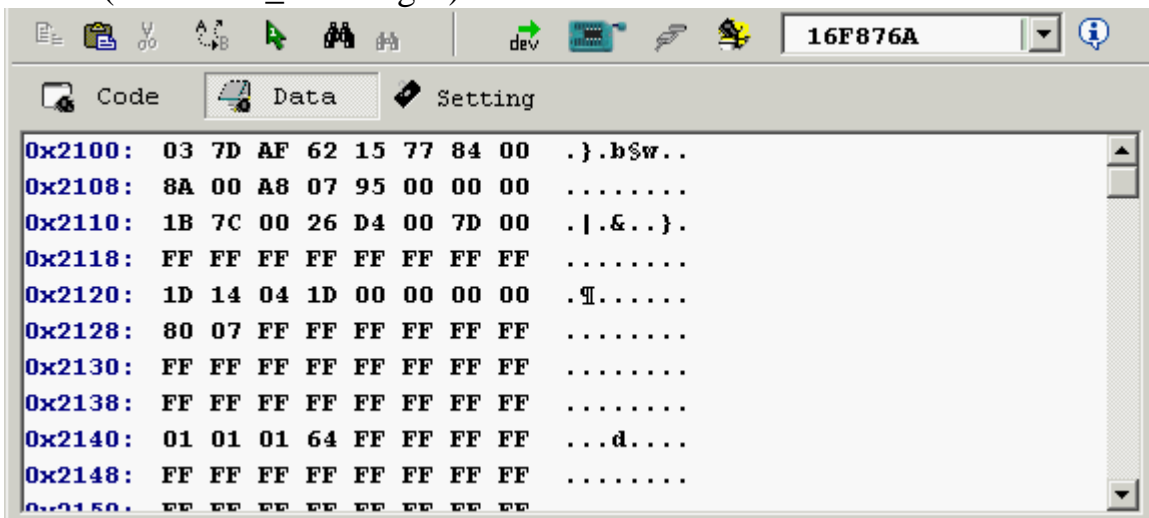
Процесс измерения температуры датчиком DS18B20 хорошо изложен в описании на микросхему. Подключается он по трехпроводной схеме к разъему программатора. (DT_DS18B20.gif)

Вариант выносного датчика температуры, подключаемого к разъему программатора.



Пока реализовано только измерение температуры и ее вывод на ЖКИ, никаких действий по анализу значений не предусматривал. Имеется распознавание идентификационного кода датчика и вывод его на ЖКИ, чисто для проверки самих микросхем. При отсутствии датчика или ошибки его инициализации, измеритель переключается на замеры термопарой, используя входной усилитель ESR-метра. Для проверки использовал покупную термопару от тестеров. Если и она не подключена, то выводится сообщение «НЕТ ДАТЧИКА». Коэффициент ее температурного преобразования хранится в памяти EEPROM, корректируется для соответствия показаний прибора реальным замерам. Температура холодных концов фиксирована и равна +25 гр.С (учитывать при измерениях).

В памяти EEPROM расположены все калибровочные значения и настройки измерителя (EEPROM_default.gif).



По начальным адресам записаны калибровки для измерений, их изменять нет смысла, т.к. в процессе настройки они все равно изменятся. С адреса 0x2140 в порядке возрастания ячеек можно включить или выключить требуемые режимы работы:

- 0x2140 (01h) - включен режим ESR/С измерителя (00h – выключен режим)
- 0x2141 (01h) - включен режим LxСх метра (00h – выключен режим)
- 0x2142 (01h) - включен режим частотомера (00h – выключен режим)
- 0x2143 (64h) - включен термометр, 64h=100 Кус. термопары (проценты)

При нулевом значении в ячейке соответствующий режим работы будет исключен, естественно, эту часть схемы можно не собирать.

Вот на этом пока все. Учитывая длительный период разработки, возможны мелкие несоответствия конструкции и схемы этому описанию. В памяти программ осталось около 3кБ свободного пространства, может, будут еще кое-какие идеи.

Дополнительные материалы:

Файл прошивки МК (на текущий момент):	ESR_LCFPt_metr_Soft_V*.rar
Полная схема измерителя:	ESR_LCFPt_metr_SCH.pdf
Рисунок печатной платы и монтаж:	ESR_LCFPt_metr_PCB.pdf
Некоторые осциллограммы при настройке:	Осциллограммы.pdf
Фото деталей конструкции:	Foto_Konstruktiv.rar
Примеры некоторых измерений:	Foto_zamer_ESR.rar
	Foto_zamer_CxLx.rar
	Foto_zamer_Fx.rar