

Цифровой измеритель ESR

Последнее время внимание многих разработчиков привлечено к необходимости знания эквивалентного последовательного сопротивления оксидных конденсаторов (ESR). Значение ESR особенно важно для их работы в импульсных источниках питания и высококачественных УМЗЧ. Также величина ESR вместе с потерей емкости являются критериями замены оксидных конденсаторов при ремонте радиоэлектронной аппаратуры.

Эквивалентная схема оксидного конденсатора приведена в статье [1]. Кроме собственно емкости C она содержит (рис. 1) сопротивление утечки R_L , последовательное сопротивление R_S и паразитную индуктивность L . Последовательное сопротивление представляет собой сумму по крайней мере четырех составляющих — сопротивлений электролита, фольги, выводов и сопротивления, возникающего из-за потерь в диэлектрике. В дефектном конденсаторе к этим четырем составляющим добавляется сопротивление нестабильного контакта между фольгой обкладок и приклепанными выводами.

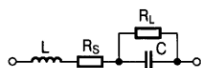


Рис. 1

Следует отметить, что потери в диэлектрике при фиксированной амплитуде протекающего переменного тока уменьшаются с увеличением частоты. Проиллюстрируем это в соответствии с [1]. Диэлектрические потери P_D пропорциональны энергии W_C , запасенной в конденсаторе, и частоте протекающего тока f :

$$P_D = k f W_C = k f C U^2 / 2,$$

где k — некоторый коэффициент.

Поскольку $U = I / (2\pi f C)$, получаем:

$$P_D = k f C I^2 / [2(2\pi f C)^2] = k I^2 / (8\pi^2 f C).$$

Из этой формулы следует приведенное выше утверждение.

В статье [1] на рис. 1 приведен график зависимости ESR от частоты для конкретного конденсатора, из которого следует, что на частоте выше нескольких килогерц для него диэлектрические потери существенно ниже омических потерь в электролите, фольге и выводах. Практически на частоте порядка 100 кГц ими можно пренебречь для любых оксидных конденсаторов и считать, что ESR от частоты не зависит.

Классический график зависимости падения напряжения на оксидном конденсаторе от частоты при фиксированной амплитуде протекающего через него синусоидального тока приведен, например, в статье [2] на рис. 8. В двойном логарифмическом масштабе он содержит линейный участок с наклоном -45° , соответствующий преобладанию емкостной составляющей в полном сопротивлении, плавный изгиб, переходящий в линейный участок с наклоном $+45^\circ$ (рис. 2). Участок с наклоном $+45^\circ$ соответствует преобладанию индуктивного сопротивления, а на частотах перехода от одного линейного участка к другому основную роль играет активное сопротивление ESR (R_S на рис. 1).

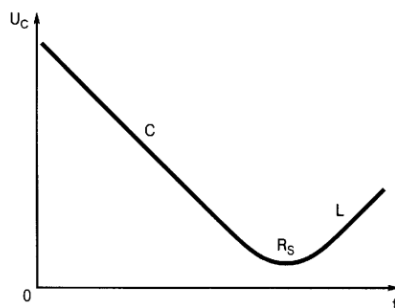


Рис. 2

В принципе, ESR можно измерить, как это описано в статье [2], — снять зависимость, аналогичную приведенной на рис. 2, и по падению напряжения в точке минимума рассчитать его, однако это довольно хлопотно.

В различных журналах и Интернете приводятся многочисленные описания приборов для измерения ESR оксидных конденсаторов. В большинстве конструкций через конденсатор пропускается ток синусоидальной формы с частотой порядка 100 кГц и измеряется падение напряжения на нем. Можно найти варианты как простейших приборов, в которых измерение производится на фиксированной частоте, так и сложных устройств, в которых через конденсатор поочередно пропускается синусоидальный ток

нескольких частот и по результатам такой проверки микроконтроллер рассчитывает параметры испытуемого конденсатора. Такой вариант сложен, но позволяет определить не только последовательное сопротивление, но и фактическую емкость конденсатора, а также его индуктивность.

Достаточно просто определить ESR, если через конденсатор пропускать ток прямоугольной формы (меандр). В этом случае форма падения напряжения на конденсаторе соответствует приведенной на диаграмме C_X на рис. 3.

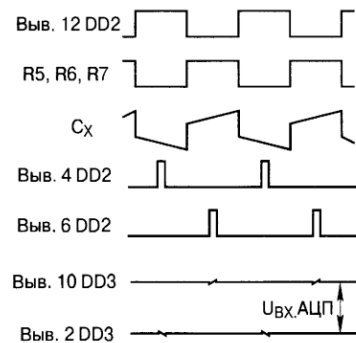


Рис. 3

Наклон почти горизонтальных участков определяется емкостью испытуемого конденсатора, а высота вертикальных перепадов диаграммы соответствует ESR. Если наклон «горизонтальных» участков невелик, двухполупериодное выпрямление падения напряжения на конденсаторе может дать результат, пропорциональный ESR, но он будет искажен за счет выбросов на индуктивности конденсатора и соединительных проводов, они для простоты на рис. 3 не показаны. При достаточно большой емкости конденсатора форма падения напряжения — меандр, если же последовательное сопротивление намного меньше емкостной составляющей, это падение приобретает треугольную форму, состоящую только из наклонных участков. В последнем случае обычное двухполупериодное выпрямление недопустимо, поскольку даст совершенно неверный результат. Синхронное выпрямление, при котором в качестве опорного напряжения используется исходная форма тока (меандр) не поможет избежать искажений результата, связанных с индуктивностями конденсатора и соединительных проводов.

Выходом может быть синхронное выпрямление, при котором в качестве опорного напряжения используются

относительно короткие импульсы, соответствующие середине наклонных участков (четвертая и пятая диаграммы на рис. 3). К началу этих импульсов «звон» на паразитных индуктивностях заканчивается, и их влияние на результат исчезает.

Десять лет назад автор опубликовал описание собранного им прибора [3, 4], в котором использовался этот

конденсатор C_X . Резисторы R5 и R6 служат для ограничения сквозного тока через транзисторы.

Напряжение с конденсатора C_X через резистор R8 подается на синхронный выпрямитель, собранный на ключах DD3.1, DD3.2 и конденсаторах C9 и C10. Ключи управляются выходными импульсами счетчика DD2 и открываются на 1/10 периода

Для подсоединения испытуемых конденсаторов используются доработанные зажимы X2 и X3 «крокодил» [5, 4]. У одной из губок каждого зажима спилены зубья и на их место напаяна пластинка из двусторонне фольгированного стеклотекстолита. Роль одного из контактов выполняет губка, оставшаяся с зубьями, роль второго — поверхность пластинки.

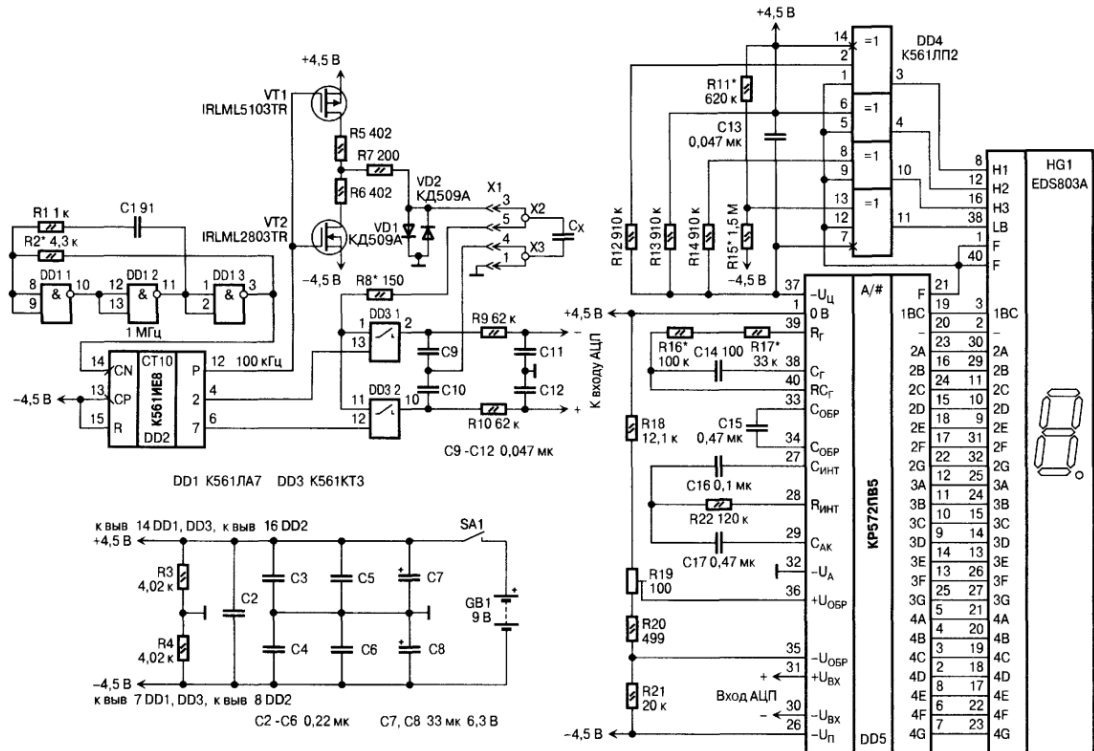


Рис. 4

принцип для измерения сопротивлений на переменном токе. Прибор оказался весьма удобным для измерения ESR оксидных конденсаторов, но его разрешающая способность (0,1 Ом) на самом чувствительном диапазоне 200,0 Ом является недостаточной для многих измерений.

На рис. 4 приведена схема прибора с цифровой индикацией, специально разработанного для измерения ESR оксидных конденсаторов, в нем использован описанный выше принцип.

На микросхеме DD1 собран генератор, работающий на частоте 1 МГц. Сигнал с его выхода подан на десятичный счетчик с дешифратором на микросхеме DD2. Меандр с частотой 100 кГц с выхода переноса Р счетчика поступает на инвертор на МОП транзисторах VT1 и VT2 дополнительной структуры, а с его выхода через резисторы R5—R7 — на проверяемый

контролируемого сигнала в середине «горизонтальных» участков, ключ DD3.2 — в середине положительной полуволны, DD3.1 — отрицательной. Конденсаторы C9 и C10 запоминают напряжения на время разомкнутого состояния ключей, с них сигнал через фильтры R9C11 и R10C12 подается на измерительный вход АЦП. АЦП собран на микросхеме DD5, результат отображается на жидкокристаллическом индикаторе HG1.

Осциллограммы напряжений в различных точках измерителя приведены на рис. 3.

Контролируемый конденсатор подключается по так называемой «четырехзажимной» схеме, что позволяет полностью исключить влияние сопротивления соединительных проводников, сопротивления контактов разъема X1 и качества контактов в месте соединения этих проводников и конденсатора.

Оставшиеся зубья следует подравнять так, чтобы при измерениях они не касались вставки. Губки крокодилов соединены проводниками с контактами 3 и 1 разъема X1, и через них на конденсатор C_X подается измерительный ток. Вставки подключены к контактам 4 и 5 разъема, и через них напряжение с конденсатора C_X через ключи DD3.1 и DD3.2 подается на конденсаторы C9 и C10 и заряжает их. Точка соединения этих конденсаторов в среднем находится под нулевым напряжением, но на ней присутствуют пульсации измеряемого тока, для сглаживания этих пульсаций введены цепи R9C11 и R10C12.

Диоды VD1 и VD2 служат для защиты прибора от подключения заряженного конденсатора, надежнее, однако, разряжать конденсаторы заранее.

При номинальном напряжении питания 9 В ток, задаваемый резисто-

рами R5—R7 через контролируемый конденсатор, равен $\pm 7,5$ мА. Максимальное значение напряжения на контролируемом конденсаторе и на C9 и C10, соответствующее предельному значению диапазона, составляет ± 150 мВ. Этого напряжения недостаточно для открывания р-п переходов кремниевых приборов, поэтому можно измерять ESR конденсаторов, не выпаивая их из проверяемого устройства. Полное напряжение, подаваемое на вход АЦП DD5 — 300 мВ.

Включение микросхемы DD5 [6, 4] имеет некоторые особенности. Опорное напряжение, определяемое максимальным входным сигналом, должно быть равно 150 мВ. Оно снимается с делителя R18—R21. Нестабильность напряжения источника питания не играет никакой роли, поскольку как выходное напряжение синхронного выпрямителя, так и опорное напряжение пропорциональны напряжению питания, а АЦП измеряет их отношение. Также не сказывается уход частоты генератора DD1.1—DD1.3. Исходная частота работы АЦП выбрана равной 40 кГц.

Если из прибора исключить АЦП и измерять напряжение на C11 и C12 внешним цифровым измерительным прибором с пределом 200 мВ, напряжение питания следует стабилизировать. Для получения показаний, не требующих пересчета, ток через проверяемый конденсатор необходимо уменьшить до ± 5 мА за счет соответствующего увеличения сопротивления резисторов R5—R7. Некоторое неудобство все же будет в неправильном положении запятой на индикаторе.

Прибор можно питать от аккумуляторной батареи GB1 типа 7Д-0,125 или гальванической батареи типоразмера РРЗ («Крона»), ток потребления составляет около 2,5 мА. Средняя точка источника организована при помощи делителя R3R4. Прибор сохраняет свою точность при снижении напряжения питания до 7,5 В.

Для контроля за разрядкой аккумулятора введена цепь R11R15 и используется элемент «Исключающее ИЛИ» микросхемы DD4 с выходом 11. Напряжение питания микросхемы DD4 стабилизировано на уровне -5 В относительно цепи $+4,5$ В внутренним стабилизатором микросхемы DD5 с выходом 37. При номинальном напряжении батареи GB1 напряжение на входе 13 этого элемента ниже порога переключения, сигнал на выходе 11 повторяет меандр, поступающий

на его вход 12 с выхода F микросхемы DD5. При снижении напряжения GB1 напряжение на входе 13 микросхемы DD4 относительно ее вывода 7 повышается. Когда оно достигнет порога переключения по этому входу, элемент микросхемы с выходом 11 начинает инвертировать свой выходной сигнал, на индикаторе HG1 появляется надпись «LO BAT».

Для включения нужной запятой на индикаторе HG1 использован элемент микросхемы DD4 с выходом 4. Элементы с выходами 3 и 10 — резервные, они позволяют использовать схему включения и разводку печатной платы в других цифровых измерительных приборах.

Прибору свойственна систематическая погрешность, возникающая из-за того, что последовательно с токоизмеряющими резисторами R5 и R7 включено активное сопротивление ESR контролируемого конденсатора (его емкостное сопротивление в широких пределах не влияет на показания). Можно показать, что если откалибровать прибор резистором R19 так, чтобы при контролируемом сопротивлении 7 Ом он давал бы точные показания, то систематическая ошибка составит менее 1 % от измеряемой величины в диапазоне 0...13 Ом и не превысит 2,1 % при 20 Ом.

ЛИТЕРАТУРА:

1. А. Колпаков. Особенности применения электролитических конденсаторов. — *Схемотехника*, 2000, № 2, с. 30, 31, 2001, № 1, с. 20, 21, № 2, с. 27—29.
2. С. Агеев. Сверхлинейный УМЗЧ с глубокой ООС. — *Радио*, 2000, № 1, с. 18—20.
3. С. Бирюков. Цифровой измеритель RCL. — *Радио*, 1996, № 3, с. 38—41, № 7, с. 62, 1997, № 7, с. 32, 1998, № 5, с. 63, 2001, № 5, с. 44.
4. С. А. Бирюков. Устройства на микросхемах. Цифровые измерительные приборы, источники питания, любительские конструкции. — М.: Символ-Р, 1998.
5. С. Бирюков. Простой цифровой мегомметр. — *Радио*, 1998, № 3, с. 32.
6. С. Бирюков. Применение АЦП КР572ПВ5. — *Радио*, 1998, № 8, с. 62—65.

Окончание следует

Сергей Бирюков,
г. Москва

Цифровой измеритель ESR

Резисторы R3 и R4, R5 и R6 следует подобрать попарно с взаимным отклонением 0,5 %. В описываемой конструкции в качестве них и R18, R20, R21 использовались резисторы типа С2-29В мощностью 0,125 Вт, остальные резисторы — МЛТ-0,125 и МЛТ-0,25, подстроечный R19 — СПЗ-19а. Выдерживать номиналы резисторов R3—R6 не обязательно, но они должны быть близки к указанным на рис. 4, а сумма R5+R7 (R6+R7) должна быть $600 \text{ Ом} \pm 5 \%$.

Микросхемы серии K561 можно заменить на микросхемы серии КР1561, K561IE8 и на K176IE8, а также на аналогичные импортные.

Большинство конденсаторов — керамические, КМ-5 и КМ-6 (конденсаторы номиналом 0,47 мкФ — КМ-66). Конденсатор C16 должен быть с хорошим диэлектриком, использован K73-11 на напряжение

63 В. Оксидные конденсаторы — K53-16 или любые другие.

В качестве разъема X1 использованы пятиконтактные соединители для звукотехнической аппаратуры — гнездовая часть для установки на печатную плату и штыревая кабельная. Подключение «крокодилов» к штыревой части следует произвести проводниками длиной не более 100 мм.

Использованный индикатор EDS803A с высотой цифр 12,7 мм можно заменить на аналогичный ITS-E0803SRNP, а при изменении рисунка печатной платы — на любой другой на 3,5 или 4 разряда, например, ИЖЦ5-4/8.

Все детали измерителя, кроме батареи питания, расположены на печатной плате размерами 67,5×125 мм из двусторонне фольгированного стеклотекстолита. На рис. 5 приведено расположение деталей и проводников на стороне установки микросхем, на

рис. 6 — проводников на другой ее стороне, где распаяны транзисторы VT1 и VT2 в корпусах для поверхностного монтажа. На стороне установки микросхем от середины DD5 и ниже по рис. 5 фольга сохранена полностью за исключением места подхода проводника от индикатора HG1 к выводу 24 DD5. Фольга выполняет роль общего провода, места подпайки выводов элементов к ней помечены крестиками. Отверстия для установки элементов раззенкованы со стороны фольги кроме тех выводов микросхем и разъема, которые подпаиваются к фольге общего провода.

Измеритель целесообразно настраивать в следующем порядке. Подать напряжение питания 9 В и подборкой элементов R2 и C1 установить частоту генератора на элементах DD1.1—DD1.3, равной 1 МГц, с точностью не хуже 5 %. Частоту удобно контролировать на выводе 12 счетчика DD2 (100 кГц). Подборкой резисторов R16 и R17 установить частоту генератора микросхемы DD5, равной 40 кГц. Ее удобно устанавливать, добиваясь неподвижности осциллограммы меандра 50 Гц с выхода

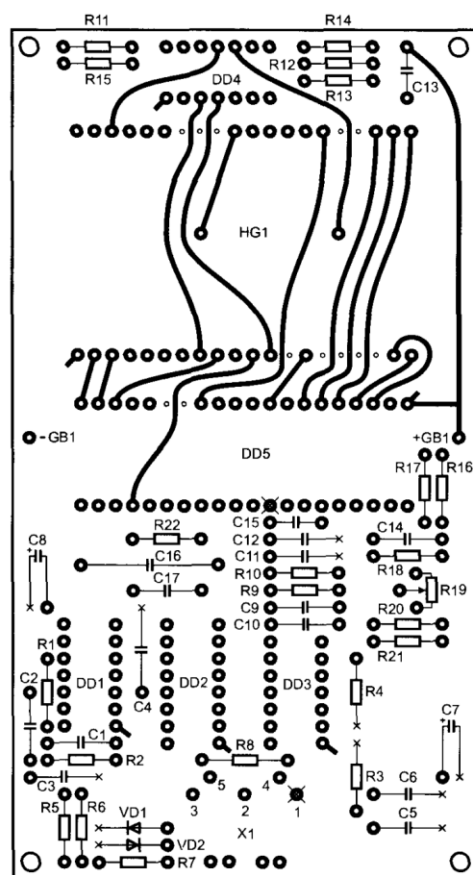


Рис. 5

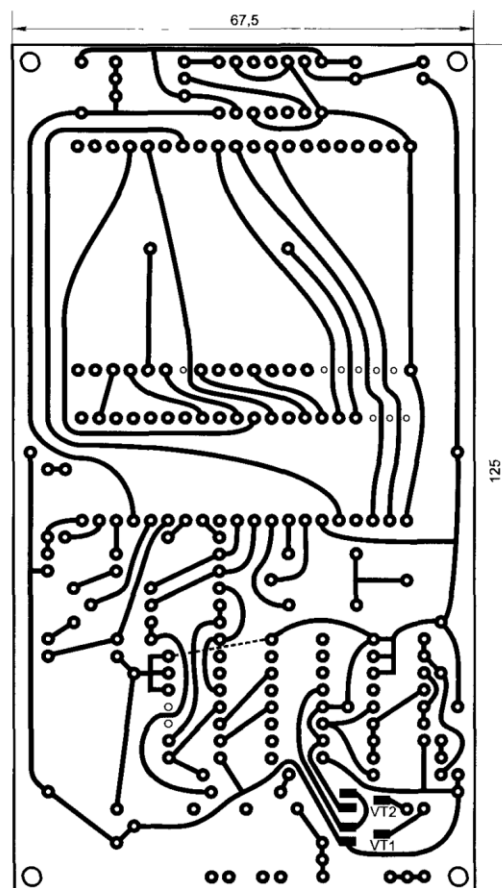


Рис. 6

Таблица 1

Тип	C, мкФ	U, В	ESR, Ом	Примечание	Тип	C, мкФ	U, В	ESR, Ом	Примечание
A	2200	16	0,05	2 шт.	K50-29	47	300	0,27	—
AISHI	2,2	400	7,7	—	K50-29	1000	63	0,04	5 шт.
FELSIK	33000	40	0,01	—	K50-29	2200	6,3	0,09	2 шт.
FRILIT	2200	25	0,02	—	K50-29	2200	25	0,42; 0,68; 0,77	3 шт.
Jackson	470	16	0,15	2 шт.	K50-35	100	16	1,69; 1,77	2 шт.
Jamicon	10	350	3,75	—	K50-35	470	16	0,21	—
Jamicon	100	10	0,14; 0,13	2 шт.	K50-35	470	16	0,22	—
Jamicon	100	160	0,24	—	K50-35	2200	16	0,05	2 шт.
Jamicon	3300	35	0,03	—	K50-35	2000	50	0,03	4 шт.
KEA-II	470	50	0,05	—	K50-6	200	10	0,52	—
KEA-II	2200	16	0,04	3 шт.	K50-6	4000	25	0,02	3 шт.
KELTRON	100	160	0,13	—	K52-1	33	6,3	0,59; 0,63	2 шт.
KOAS	16	250	0,38...0,43	4 шт.	K52-1	33	25	0,31	—
Marcon	470	10	0,38	—	K52-1	100	16	0,23; 0,26	2 шт.
NA	1	63	2,39; 2,42	2 шт.	K52-1	100	35	0,16	—
NA	100	10	1,65	—	K52-1	150	25	0,12	—
NA	100	16	1,49	—	K52-1	470	16	0,15	—
NA	470	10	0,28	—	K52-15	47	63	0,28	—
NOVEA	4700	25	0,03	Зол. буквы	K52-15	100	16	0,31	—
PHILIPS	3000	125	0,03	—	K52-2	150	70	0,19	—
REC	100	350	0,63	—	K52-2	200	50	0,21	—
REC	470	35	0,08	3 шт.	K52-2	300	25	0,20	—
SHOEI	3,3	350	36,1	Измерено [3]	K52-2	400	15	0,21	2 шт.
Siemens	33000	40	0,02	—	K52-2	1000	6	0,16	—
SPRAGUE	22000	75	0,02	—	K53-1	33	6,3	0,11	—
SPRAGUE	90000	6	0,03	—	K53-1	68	15	0,93	—
SSL	22	160	0,71; 0,76	2 шт.	K53-16	33	6,3	0,19	—
TS NH CE	47	450	1,40	—	K53-16	33	16	0,09	—
W	33	200	0,29	—	K53-16	68	6,3	0,08	—
Weston	100	350	0,17; 0,24	2 шт.	K53-16	150	6,3	0,05	—
K50-16	2000	16	0,05	—	K53-18	150	6,3	0,07	—
K50-16	2000	50	0,04...0,06	6 шт.	K53-18	330	16	0,19	—
K50-17	800	300	0,07	—	K53-18	680	6,3	0,05	—
K50-18	4700	50	0,03	3 шт.	K73-17	2,2	160	-0,07	—
K50-18	4700	250	0,01	—	K73-17	4,7	63	-0,03	2 шт.
K50-18	68000	16	0,01	2 шт.	K73-17	4,7×2	63	-0,01	—
K50-27	470	300	0,05	3 шт.	K73-17	4,7×3	63	-0,00	—

F микросхемы DD5 при синхронизации осциллографа от сети.

Зажав в «крокодилы» короткий отрезок толстого медного провода, подборкой резистора R8 добиться нулевых показаний индикатора.

Используя резистор с известным с точностью 0,1...0,2 % сопротивлением около 7 Ом в качестве измеряемого, подстроечным резистором R19 откалибровать прибор для получения соответствующего показания.

Следует также подобрать номиналы резисторов R11 и R15 так, чтобы надпись «LO BAT» включалась при снижении напряжения питания до 7,5 В.

В табл. 1 приведены результаты измерения ESR различных оксидных конденсаторов, а также конденсаторов K73-17. В колонке «Тип» для импортных конденсаторов он указан условно, чаще это производитель или единственная информация, содержащаяся на корпусе, кроме номинала и рабочего напряжения.

При анализе таблицы следует иметь в виду, что отечественные конденсаторы изготовлены 15—25 лет назад, а на подавляющем числе импортных год выпуска не указан. При измерениях было замечено, что ESR оксидных конденсаторов заметно уменьшает-

ся с увеличением температуры, что говорит о том, что основную роль в его образовании играет сопротивление электролита. По некоторым данным, конденсаторы, промаркированные золотистыми надписями, имеют малое значение ESR. В распоряжении автора имелась пара таких одинаковых конденсаторов, не выделявшихся среди других по ESR.

При емкости конденсаторов менее 15 мкФ наклон «горизонтальных» участков осциллограмм приводит к заметному занижению показаний, что следует из результатов проверки конденсаторов K73-17, для которых последовательное сопротивление ничтожно мало. Поэтому при проверке конденсаторов с такой емкостью к показаниям прибора следует добавлять поправку, равную абсолютной величине значений, полученных при измерении ESR конденсаторов K73-17 соответствующей емкости. Впрочем, для конденсаторов емкостью более 4,7 мкФ эта погрешность менее 0,03 Ом и ею обычно можно пренебречь.

На первой странице обложки предыдущего номера журнала приведена фотография печатной платы измерителя. При установке ее в корпус разъем X1 лучше впаивать с другой стороны платы.

На сайте журнала по адресу www.dian.ru можно найти рисунки печатной платы, пригодные для ее изготовления «лазерно-утюжным» методом [7—9].

ЛИТЕРАТУРА:

7. О. Федоров. О технологии «Лазерного утюга». — Схемотехника, 2004, № 5, с. 43—45.
8. В. Баранов. Изготовление печатных плат для макетов. — Схемотехника, 2005, № 6, с. 49—51, № 7, с. 50—52, № 8, с. 50, 51.
9. Г. Петин. Еще раз об изготовлении печатных плат при помощи лазерного принтера. — Схемотехника, 2006, № 1, с. 46.

Сергей Бирюков,
г. Москва

ПОПРАВКА

В устройстве, описанном в статье Ю. Мартышевского «Термореле» («Схемотехника», 2006, № 2, с. 52, 53), можно использовать датчик DS1821 (DS1821S), но не DS1820.