

лись на генерируемый сигнал. В результате конструкция была доработана. На ось блока КПЕ была плотно надета до половины текстолитовая втулка, чертёж которой показан на **рис. 4**. С другой стороны втулки была вставлена металлическая ось (**рис. 5**), от разобранного переменного резистора СП-2, которая не должна электрически соединяться с осью КПЕ. На свободном конце оси крепится ручка установки частоты с указателем. Плоская пружина (**рис. 6**) толщиной 0,3...0,4 мм изготовлена из пружины блока ПТК телевизора и привинчена к передней лицевой панели прибора, а вырезом вставляется в паз оси от переменного резистора. Через пружину ось соединена с общим проводом и служит своеобразным экраном,

препятствующим влиянию наводок на ось КПЕ. После такой доработки генерация на низкочастотных диапазонах становится стабильной. Вид на узел настройки со снятой ручкой показан на **рис. 7**.

Резисторы R1—R18 можно применить типов C2-29B, C2-14, C3-14, КИМ, C2-33НВ; при настройке они могут быть составлены из двух или трёх резисторов. Оксидные конденсаторы — К50-35 или импортные, КПЕ — от радиовещательного приёмника, конденсаторы C2, C3 — КСО, проходные конденсаторы — Б23А, Б14, КТП, конденсаторы С6, С7 — К73, КМ. Переменный резистор R21 (СПО, СП4-1) должен иметь линейную характеристику. Микросхему LM4562NA можно заменить двумя ОУ 544УД2А. В

этом случае сопротивление резистора R20 следует увеличить в два раза. Микросхемы стабилизаторов DA2 и DA3 установлены на теплоотводы общей площадью поверхности 30 см<sup>2</sup> каждый. В качестве выходных сигнальных разъёмов применены коаксиальные разъёмы СР-50. Переключатель может быть любой на два направления и минимум на девять положений. Понижающий трансформатор Т1 должен быть мощностью не менее 3 Вт и иметь вторичную обмотку напряжением 15 В. Большинство элементов генератора размещены на печатной плате (**рис. 8**), её чертёж не приводится. Микросхема установлена в панель, для удобства пайки большинство резисторов смонтированы на лужёных штырях, запрессованных в плату. ■

## Метод измерения добротности и других параметров контура

И. БОГАТЫРЁВ, В. ДОЦЕНКО, г. Харьков, Украина

Авторы предлагают несложный метод определения добротности, индуктивности и активного сопротивления катушки в составе параллельного LC-контура. Для реализации этого метода потребуются регулируемый генератор прямоугольных импульсов и запоминающий осциллограф.

Предлагаемый метод измерения параметров резонансного контура имеет некоторое сходство с методом, предложенным В. Степановым в статье "Измерение добротности с цифровым отсчётом" ("Радио", 2007, № 2, с. 29, 30). Это сходство заключается в том, что в обоих случаях исследуются затухающие свободные колебания в контуре после подачи в него некоторой порции энергии. Однако упомянутый выше метод представляется весьма громоздким.

Суть предлагаемого метода заключается в определении индуктивности L и сопротивления катушки R<sub>n</sub> по найденной добротности Q. Собственно, измерить придётся только ёмкость контура C. При использовании прецизионного конденсатора с допуском в один или полпроцента, например К71-7, эта необходимость отпадает.

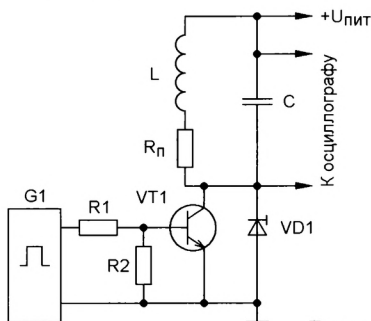


Рис. 1

Итак, понадобятся источник питания, генератор импульсов Г5-54 (или подобный с возможностью регулирования длительности импульсов и периода их следования), цифровой запоминающий осциллограф и калькулятор. Схема для исследования приведена на **рис. 1**.

В дальнейшем будем пользоваться формулами, которые можно найти в любом учебнике по основам теории электрических цепей или теоретическим основам электротехники.

Если в параллельный LC-контур подать короткий импульс тока, отрыв транзистор VT1 управляющим сигналом с генератора G1, амплитуда колебаний напряжения в нём будет затухать по экспоненциальному закону в функции от времени t:

$$U_n = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}} = U_0 e^{-\frac{t\omega_0}{2Q}}, \quad (1)$$

где U<sub>0</sub> — амплитуда первого колебания, U<sub>n</sub> — амплитуда n-го колебания, n — число периодов между U<sub>0</sub> и U<sub>n</sub>, τ = 2Q/ω<sub>0</sub> — постоянная времени контура, Q — искомая добротность контура, ω<sub>0</sub> — круговая резонансная частота контура.

Поскольку в формуле (1) фигурируют значения амплитуд напряжений в дискретные моменты времени, то текущее время можно представить как t = n · T<sub>0</sub>, где T<sub>0</sub> — период колебаний. После подстановки этого выражения в (1) получаем формулу для определения добротности контура:

$$Q = \frac{n \cdot \pi}{\ln\left(\frac{U_0}{U_n}\right)}. \quad (2)$$

Регулировать амплитуду колебаний в контуре можно изменением напряжения питания +U<sub>пит</sub>, а также длительностью запускающего импульса генератора G1. Однако длительность импульса не должна превышать время нарастания первого колебания — четверти периода колебаний T<sub>0</sub>. Время повторения запускающих импульсов должно превышать время полного затухания колебаний контура. Или можно пользоваться режимом однократного ручного запуска генератора, тем более, что и осциллограф имеет режим регистрации одиночного сигнала SINGLE.

Если же катушка индуктивности имеет ферромагнитный магнитопровод, запитывать контур следует тем же уровнем напряжения, что и в устройстве, где он будет использоваться. Тем самым будет учтена амплитудная нелинейность катушки с ферромагнитным магнитопроводом.

Исходные уравнения для вычисления индуктивности L и сопротивления потерь R<sub>n</sub>:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \left(\frac{R_n}{Z_B}\right)^2}, \quad (3)$$

$$Q = \frac{\omega_0 \cdot L}{R_n} = \frac{Z_B}{R_n}. \quad (4)$$

В формулах (3) и (4) Z<sub>B</sub> — волновое сопротивление катушки индуктивности.

Подставляя в формулу (3) выражение для L и Z<sub>B</sub>, полученное из (4), получим формулу для вычисления сопротивления активных потерь в контуре:

$$R_n = \frac{Q^2 - 1}{\omega_0^2 \cdot C \cdot Q^3}.$$

Подставив в формулу (3) выражение для R<sub>n</sub> и Z<sub>B</sub> из (4), получим формулу для вычисления индуктивности катушки:

$$L = \frac{Q^2 - 1}{\omega_0^2 \cdot C \cdot Q^2}.$$

Таким образом, зная (или измерив) ёмкость конденсатора C, вычислив добротность Q по соотношению амплитуд



(2), легко вычислить остальные два параметра контура — сопротивление потерь  $R_n$  и индуктивность катушки  $L$ . Круговая резонансная частота определяется как  $\omega_0 = 2\pi/T_0$ , где период колебаний  $T_0$  отсчитывают по горизонтальной оси осциллографа.

Точность этого метода главным образом будет зависеть от точности определения ёмкости конденсатора  $C$ . Погрешность измерения амплитуд  $U_0$  и  $U_n$  зависит от разрешающей способности вертикальной шкалы осциллографа. Поскольку в формуле (2) фигурирует отношение амплитуд, то эта составляющая погрешности практически нивелируется, если  $U_0$  и  $U_n$  отсчитывались в одном масштабе чувствительности вертикальной развёртки осциллографа. Измерять амплитуды и период колебаний следует с помощью курсорных измерений, если осциллограф имеет такую функцию. Кроме того, точность вычислений будет тем выше, чем больше число периодов  $n$  удалось разместить на осциллограмме.

Чтобы практически исключить шунтирующее влияние на контур входного сопротивления осциллографа, переключатель на пробнике (шупе) необходимо переключить в положение "x10". При этом входное сопротивление боль-

ше, чем сопротивление потерь  $R_n$ ,  $L = 104,7$  мкГн,  $R_n = 2,44$  Ом,  $R_3 = 1,22$  Ом.

Обращает на себя внимание неожиданно большое сопротивление потерь, хотя измерение сопротивления профессиональным мультиметром дало значение в десять раз меньше — 0,8 Ом. Это говорит о том, что на частоте полтора сотен килогерц в потерях участвует не только омическое сопротивление обмотки катушки, но это уже другая тема. Очевидно также, что осциллограф не шунтирует контур, поскольку эквивалентное резонансное сопротивление контура почти в десять тысяч раз меньше входного сопротивления осциллографического пробника.

Замечательным свойством предложенного метода является возможность обойтись без генератора импульсов и усилительного транзистора. Для этого достаточно один из проводов источника питания подпаять к одному из выводов контура, а по другому выводу просто "чиркнуть" вторым проводом источника питания. Режим горизонтальной развёртки осциллографа при этом должен быть SINGLE (одиночный). После многочисленных попыток можно получить чистую осциллограмму затухающих колебаний. Именно так была получена осциллограмма на рис. 2.

При проведении исследований по схеме рис. 1 для защиты от ЭДС катушки индуктивности следует обязательно устанавливать защитный диод (супрессор) VD1, напряжение пробора которого должно быть меньше максимально допустимого импульсного напряжения коллектор—эмиттер применённого транзистора.

Может оказаться, что осциллограмму затухающих колебаний невозможно получить ни в "ручном" режиме, ни с приме-

нением генератора импульсов. Такой случай однозначно свидетельствует о чрезвычайно малой добротности катушки — меньше единицы. Это характерно для электромагнитов, имеющих тысячи витков, намотанных тонким проводом. Большое омическое сопротивление и большая межслойная ёмкость снижают добротность. В этом случае предлагаемый метод определения параметров колебательного контура не работает.

Для упрощения выполнения расчётов параметров  $Q$ ,  $L$  и  $R_n$  авторы предлагают простую EXCEL-программу, в которую вводят значения  $n$ ,  $t = T_0 \cdot n$ ,  $U_0$ ,  $U_n$  и  $C$ .

От редакции. Упомянутую EXCEL-программу можно найти по адресу <http://ftp.radio.ru/pub/2021/03/circuit.zip> на нашем FTP-сервере.

В настоящее время номенклатура аккумуляторов и аккумуляторных батарей очень широка. Это относится как к их типоразмерам, так и к "начинке". Это приводит к тому, что номенклатура зарядных устройств (ЗУ) для них также велика. Поэтому естественным является желание иметь универсальное ЗУ "на все случаи жизни" или расширить возможности уже имеющегося.

В статье пойдёт речь о зарядке аккумуляторов Li-Ion и Li-FePO<sub>4</sub> небольших типоразмеров и "незащищённых", т. е. таких, у которых отсутствует встроенная плата защиты — PCM (англ. Protection Circuit Module). В ЗУ для таких аккумуляторов можно применить микросхему ME4057 [1], которая выгодно отличается от некоторых аналогичных наличием защиты от подключения заряжаемого аккумулятора в неправильной полярности. Дело в том, что у этих аккумуляторов нетрудно перепутать плюсовый и минусовый контакты, поскольку они мало отличаются друг от друга внешне.

Микросхемы серии ME4057 предназначены для зарядки Li-Ion аккумуляторов до напряжения 4,2 В (ME4057B) или 4,34 В (ME4057D). В микросхеме реализован режим CC/CV, что означает Constant Current/Constant Voltage (постоянный ток/постоянное напряжение). При этом зарядка осуществляется в два этапа. Сначала она идёт при постоянном токе  $I_{\text{бат}}$  и постепенно повышающемся напряжении, а потом при постоянном напряжении и плавно уменьшающемся токе. Ток зарядки ( $I_{\text{бат}} \leq 1$  А) можно установить с помощью внешнего резистора. Для сильно разряженных аккумуляторов (менее 2,9 В) включает функция предзарядки — предварительная зарядка малым током  $I_{\text{пред}} = I_{\text{бат}}/10$ . Эта микросхема имеет защиту от перегрева, и в случае его возникновения ток зарядки автоматически уменьшается.

Входное напряжение микросхемы ME4057 — 4,5...6,5 В. Но следует учесть, что при большом токе и напряжении более 5,5 В она может сильно разогреваться, что приведёт к уменьшению тока зарядки, а значит, и к увеличению времени зарядки. Поэтому ЗУ на микросхеме ME4057 удобно питать от сетевого источника с USB-гнездом с выходным напряжением 5 В, например, ЗУ от смартфона или другого гаджета. Кроме того, некоторые серийно выпускаемые лабораторные блоки питания снабжены таким гнездом.

Схема устройства показана на рис. 1. Микросхема включена по стандартной схеме. Ток зарядки  $I_{\text{бат}}$  зависит от сопротивления резистора  $R1$ :  $I_{\text{бат}} = 1300/R1$ . Светодиоды HL1 (красно-го свечения) и HL2 (зелёного свечения) индицируют режимы работы устройства. В процессе зарядки светит красный, зелёный погашен. Когда зарядка окончена, светит зелёный, красный — погашен. При отсутствии аккумулятора или плохом контакте красный мигает, зелёный светит. Если подключить аккумулятор в неправильной полярности, оба светодиода гаснут.

Режимы зарядки, используемые в микросхемах серии ME4057, подойдут и для других типов аккумуляторов,

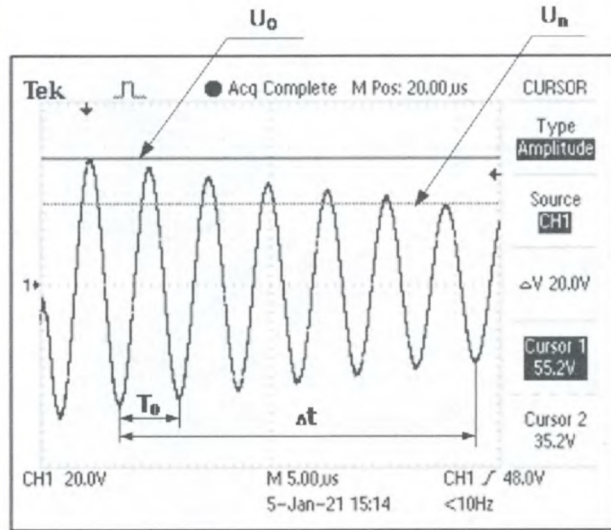


Рис. 2

шинства пробников больше или равно 10 МОм, а полоса пропускания пробника, например HP-9150, расширяется до 150 МГц. В связи с этим желательно оценить эквивалентное резонансное сопротивление контура  $R_3$ , параллельно которому и подключается осциллограф

$$R_3 \approx Z_B \cdot Q = R_n \cdot Q^2 = \frac{Z_B^2}{R_n} = \frac{L}{C \cdot R_n}$$

В качестве примера на рис. 2 приведена осциллограмма затухающих колебаний в контуре, составленном из слюдяного конденсатора КЗ1-10 ёмкостью 0,01 мкФ на номинальное напряжение 100 В полупроцентной точности и дросселя 100 мкГн с ферритовым магнитопроводом на ток 1 А.

Исходные данные (см. осциллограмму) для расчёта:  $U_0 = 55,2$  В,  $U_n = 35,2$  В,  $n = 6$ ,  $T_0 = 6,43$  мкс,  $\omega_0 = 0,97717 \cdot 10^6$  1/с.