

УДК 621.316.726

## ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА АНАЛИЗА И РАСЧЕТА КВАРЦЕВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

В.П. ЛИТВИНОВ

**Статья представлена профессором, доктором физико-математических наук Козловым А.И.**

Цель данной работы – разработка инженерной методики расчета различных типов схем кварцевых генераторов, позволяющей быстро и с достаточной для инженерной практики точностью произвести расчет автогенератора, при наличии лишь инженерного калькулятора. Предлагаемая методика анализа и расчета схем кварцевых генераторов предназначена как для разработчиков радиоаппаратуры, имеющих практический опыт разработки аналоговых электронных схем, в частности автогенераторов, или кварцевых генераторов, так и для студентов при курсовом и дипломном проектировании. При этом известные расчетные формулы и соотношения для автогенераторов приведены без выводов.

**Ключевые слова:** кварцевый генератор, условие самовозбуждения, баланс амплитуд, баланс фаз, «емкостная трехточка», кварцевый резонатор.

### Введение

Существующее значительное количество технической литературы: учебники, методические пособия и научные статьи, в которых описаны методики расчета кварцевых генераторов (КГ), обладают серьезными недостатками: они фактически оторваны от практического применения за счет наличия большого числа математических выражений, избыточных комплексными выражениями, дифференциальными уравнениями и т.д. Поэтому при практическом выполнении генератора требуются дополнительные неоднократные пересчеты и коррекция многих его параметров. Кроме того при расчете нелегко учесть разброс параметров элементов схемы, а в справочниках приведены далеко не все необходимые для известных методик параметры. В результате усилия, затраченные на расчет схемы, зачастую бывают сведены «на нет» при его материальной реализации.

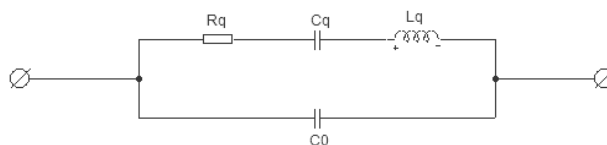
Целью настоящей работы является разработка инженерной методики расчета различных основных типов схем кварцевых генераторов, позволяющей быстро и с достаточной для инженерной практики точностью произвести расчет автогенератора при наличии лишь инженерного калькулятора.

Предлагаемая методика анализа и расчета предназначена как для разработчиков радиоаппаратуры, имеющих практический опыт разработки аналоговых электронных схем, в частности автогенераторов, или кварцевых генераторов, так и для студентов при курсовом и дипломном проектировании. При этом известные расчетные формулы приведены без выводов.

### 1. Основные электрические характеристики кварцевых резонаторов

Созданные на основе пьезоэффекта кварцевые резонаторы, эквивалентная схема которых представляет собой высокочастотный колебательный контур, быстро нашли применение в устройствах селекции и стабилизации частоты приемно-передающих устройств. В связи с тем, что параметры кварцевых резонаторов в настоящее время изучены достаточно подробно и описаны в значительном количестве источников, приведем только самые необходимые для последующих расчетов характеристики.

Основным элементом схемы генератора, определяющим стабильность частоты, является кварцевый резонатор, эквивалентная электрическая схема которого приведена на рис. 1.



**Рис. 1.** Эквивалентная схема кварцевого резонатора

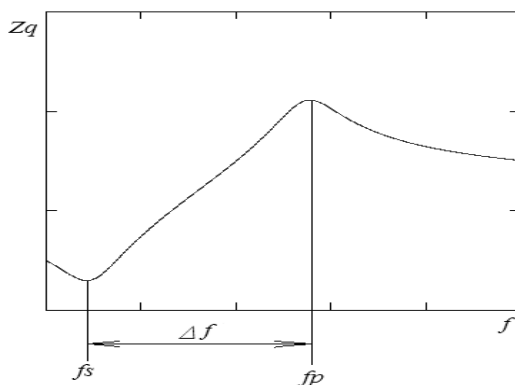
Поясним физический смысл электрических параметров эквивалентной схемы кварцевого резонатора:

- $L_q$  – эквивалентная динамическая индуктивность – эквивалент колеблющейся массы под электродами резонатора, величина которой определяет величину добротности  $Q$ ;
- $C_q$  – эквивалентная динамическая емкость – эквивалент механической жесткости кварцевой пластины;
- $R_q$  – эквивалентное динамическое сопротивление – величина, характеризующая активные потери в кристаллической решетке, демпфирование колебаний молекулами окружающего газа и электрические потери в подводящих электродах;
- $C_0$  – статическая емкость кварцедержателя.

Для диапазона частот от 5 до 30 МГц типовые значения элементов эквивалентной схемы следующие:  $C_q=0.008\dots0.02$  пФ;  $L_q=5\dots30$  мГн;  $R_q=5\dots50$  Ом;  $C_0=1,5\dots6$  пФ.

При проектировании генераторов, работающих на частотах выше 30 МГц, применяют кварцевые резонаторы, работающие на нечетных механических гармониках (3-я, 5-я, 7-я и т.д.). При этом значения  $C_q$  уменьшаются пропорционально квадрату номера гармоники, т.е. на 3-й механической гармонике резонатор будет иметь  $C_q$  порядка  $0,01/3^2 \approx 0,001$  пФ. При этом эквивалентное сопротивление возрастает приблизительно прямо пропорционально номеру гармоники, т.е.  $3 \cdot R_q$ .

Как видно из рис. 1, эквивалентная схема представляет собой сложный колебательный контур, имеющий последовательный и параллельный резонанс, причем частота последовательного резонанса определяется параметрами  $L_q$  и  $C_q$ , а параллельного –  $L_q$  и последовательно соединенных  $C_q$  и  $C_0$ . Наличие резонансов иллюстрирует рис. 2, на котором приведена амплитудно-частотная (АЧХ) характеристика полного сопротивления  $Z_q$  кварцевого резонатора.



**Рис. 2.** Частотная характеристика кварцевого резонатора:

$f_s$  – частота последовательного резонанса;

$f_p$  – частота параллельного резонанса

Из рисунка видно, что частотная характеристика имеет два экстремума, соответствующих последовательному (минимум) и параллельному (максимум) резонансу.

Разность частот между ними называется резонансным промежутком, который можно определить как

$$\frac{\Delta f}{f_s} = \frac{Cq}{2 \cdot C_0} \quad (1)$$

Особый интерес представляет область АЧХ между последовательным и параллельным резонансом, характеризующаяся увеличением полного сопротивления с ростом частоты, что соответствует индуктивному характеру сопротивления резонатора, величина которого зависит от отстройки от частоты последовательного резонанса.

Высокая добротность резонаторов, достигающая величины десятков, сотен тысяч и даже миллионов на частотах 1 и 5 МГц, а также низкий температурный коэффициент порядка  $\pm(1..10) \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  (рис. 3.) позволили создавать высокостабильные термокомпенсированные и термостатированные генераторы, работающие в широком интервале температур.

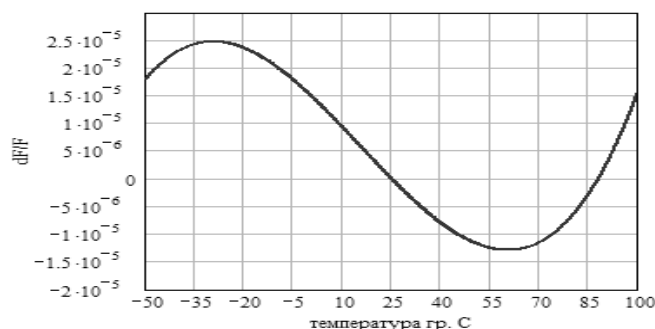


Рис. 3. Температурно-частотная характеристика (ТЧХ) кварцевого резонатора

## 2. Условие самовозбуждения генератора

В самом общем виде структурную схему автогенератора (рис. 4) можно представить состоящей из двух четырехполюсников – усилителя с коэффициентом усиления  $K$  и цепи положительной обратной связи с коэффициентом обратной связи  $\beta$ .



Рис. 4. Структурная схема автогенератора

Условие стационарного режима генератора можно представить в следующем виде

$$K \cdot \beta = 1 + j0. \quad (2)$$

Выражение (2) состоит из двух уравнений – баланса фаз и баланса амплитуд.

Баланс фаз – алгебраическая сумма сдвигов фаз по замкнутому колебательному контуру равна 0 или  $2\pi n$ .

Баланс амплитуд – условие, при котором в установившемся режиме произведение коэффициента усиления активной части схемы (усилителя) на коэффициент обратной связи, называемое фактором регенерации  $G$ , равно 1. Для уверенного возбуждения генератора начальное значение  $G$  выбирается в пределах от 2 до 4. При установлении колебаний величина  $G$  снижается до 1 – выполнения условия баланса амплитуд, за счет уменьшения средней крутизны при росте амплитуды колебаний.

### 3. Основные соотношения для анализа и расчета осцилляторных схем кварцевых генераторов

Схемы кварцевых генераторов подразделяются на две большие группы: осцилляторные, в которых кварцевый резонатор выполняет роль одной из реактивностей колебательного контура и схемы с кварцем в цепи обратной связи.

Рассмотрим **ОСЦИЛЛЯТОРНЫЕ СХЕМЫ**, которые получили также название «трехточка» из-за наличия трех основных точек подключения колебательного контура к электродам усилительного элемента. Схема обобщенной трехточки представлена на рис. 5.

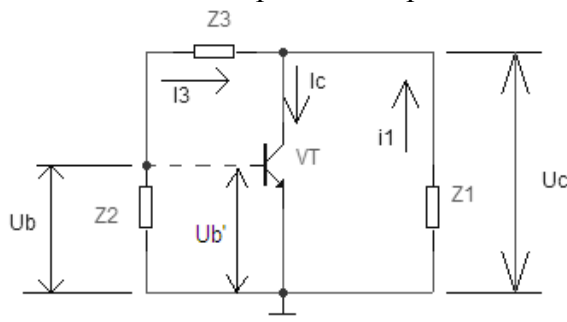


Рис. 5. Схема обобщенной «трехточки»

Как показано выше, для возникновения колебаний в автогенераторе необходимо выполнение двух условий – баланса фаз и баланса амплитуд, а именно - сдвиг фаз между  $U_{b'}$  и  $U_b$  должен быть равен нулю, а коэффициент передачи  $G$  (фактор регенерации) определяет запас по устойчивости и амплитуду колебаний

$$G = \frac{U_b}{U_{b'}} \geq 1 .$$

Из схемы видно, что фактор регенерации определяется как

$$G = K_y \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} ,$$

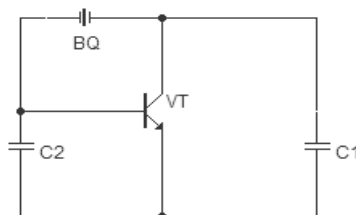
где  $K_y = \frac{U_c}{U_{b'}} = Y_{21} \cdot Z_{load} = Y_{21} \cdot \frac{Z_1 \cdot (Z_2 + Z_3)}{Z_1 + Z_2 + Z_3}$  - коэффициент усиления;  $Z_{load}$  - сопротивление нагрузки;

$$G = Y_{21} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \cdot \frac{Z_1 \cdot (Z_2 + Z_3)}{Z_1 + Z_2 + Z_3} = Y_{21} \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_3} = Y_{21} \cdot Z_y ,$$

$Z_y = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_3}$  - управляющее сопротивление генератора.

Так как транзисторный усилитель в схеме с общим эмиттером переворачивает фазу выходного напряжения на 180 градусов, то четырехполюсник  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  тоже должен переворачивать фазу также на 180 градусов. Это условие может быть выполнено только в том случае, если сопротивления  $Z_1$  и  $Z_2$  имеют одинаковый реактивный характер, а  $Z_3$  имеет противоположный характер. Если  $Z_1$  и  $Z_2$  имеют емкостной, а  $Z_3$  – индуктивный характер, то такая схема называется «емкостная трехточка». В случае, если  $Z_1$  и  $Z_2$  имеют индуктивный, а  $Z_3$  – емкостной характер, то такая схема называется «индуктивная трехточка».

Наибольший интерес представляет «емкостная трехточка», как имеющая наилучшую режимную стабильность. Функциональная схема такого генератора приведена на рис. 6.



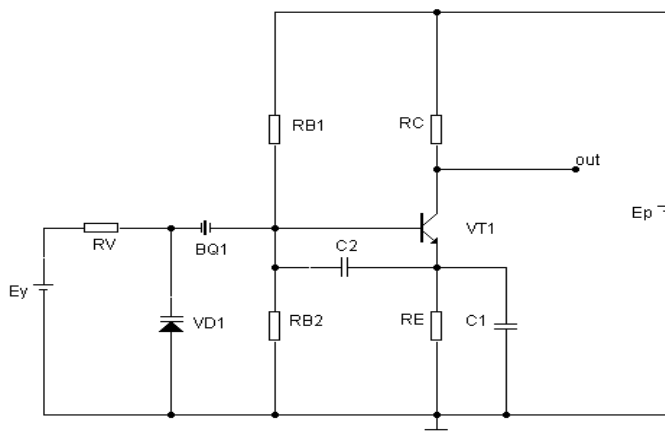
**Рис. 6.** Схема емкостной трехточки

В зависимости от того, какой электрод транзистора будет заземлен, схема будет называться с общим эмиттером, общей базой или с общим коллектором. Каждая из этих схем имеет особенности применения, позволяющие использовать их в различных типах генераторов.

В стационарном режиме колебания устанавливаются в результате снижения средней крутизны транзистора, за счет уменьшения угла отсечки коллекторного тока.

#### 4. Методика расчета кварцевого генератора

В качестве примера проведем анализ и расчет наиболее распространенной схемы управляемого напряжением кварцевого генератора (рис. 7), которая практически применяется в большей части радиотехнических устройств. В ней  $R_{B1}$  и  $R_{B2}$  – сопротивления базового делителя,  $R_C$  – коллекторная нагрузка,  $R_E$  – резистор в цепи эмиттера,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $BQ_1$  и  $VD_1$  – элементы контура генератора и  $R_V$  – резистор цепи управления варикапа. Варикап  $R_V$  может использоваться также для подстройки частоты в неуправляемом генераторе, расчет которого производится аналогичным образом.



**Рис. 7.** Принципиальная схема управляемого кварцевого генератора

Анализ и расчет работы генератора целесообразно начать с расчета режима работы по постоянному току. Для этого совсем необязательно иметь весь набор параметров и характеристик транзистора. Дело в том, что современные кремниевые транзисторы, используемые в качестве активного элемента кварцевых генераторов, как правило, имеют коэффициент усиления по току  $\beta \geq 100$ , а частоту единичного усиления  $f_t \geq 1500 \dots 2000$  МГц, что позволяет пренебречь инерционными свойствами транзистора вплоть до частот порядка 100 МГц.

Прежде всего, найдем значение тока коллектора в рабочей точке. Так как напряжение перехода база-эмиттер транзистора в открытом состоянии составляет (0,6...0,7) В, ток коллектора (без учета тока базы) определяется по формуле

$$I_c = \frac{\left[ \frac{E_p \cdot R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} - 0,7 \right]}{R_E} \quad (3)$$

Далее находим крутизну вольтамперной характеристики

$$Y_{21} = \frac{Ic}{\varphi t} \approx \frac{T[K]}{11600} [mA/B], \quad (4)$$

где  $\varphi t = \frac{q}{k \cdot T}$  - температурный потенциал;  $k$  - постоянная Больцмана;  $T$  - абсолютная температура;  $q$  - заряд электрона.

Затем определяем управляющее сопротивление  $Ry$ , равное произведению сопротивления нагрузки на коэффициент обратной связи резонансной цепи генератора

$$Ry = \frac{Koo}{\omega^2 \cdot C_2^2 \cdot Rq}, \quad (5)$$

где  $Koo = C1/C2$ ;  $C_2 = \frac{C1 \cdot C2}{C1 + C2}$ ;  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ .

Для проверки условия баланса амплитуд определяем фактор регенерации  $G$

$$G = Y_{21} \cdot Ry \geq 3. \quad (6)$$

Определение значения рабочей частоты генерации включает в себя:

- определение емкости варикапа при среднем значении напряжения перестройки;
- определение емкости генератора;
- расчет частоты генерации при различных напряжениях перестройки.

В перестраиваемых генераторах для получения больших пределов перестройки частоты и хорошей линейности ее характеристики обычно применяют варикапы со сверхрезким переходом. Аналитическая зависимость емкости варикапа от напряжения обратного смещения аппроксимируется следующим образом

$$Cv = \frac{Cv_0}{1 + 0,4 \cdot Ey}, \quad (7)$$

где  $Cv_0$  - емкость варикапа при напряжении управления  $Ey=0$ .

Относительная отстройка от частоты последовательного резонанса

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{Cq}{2(Cosc + Co)}, \quad (8)$$

где  $1/Cosc = 1/C1 + 1/C2 + 1/Cv$ .

Рабочая частота генератора  $fosc = fo(1 + \frac{\Delta f}{f})$ . (9)

После этого приступаем к анализу энергетических характеристик генератора.

Из анализа спектральной характеристики коллекторного тока известно, что амплитуда первой гармоники коллекторного тока  $Icm$  при  $G \geq 3$  равна  $2Ic$ . Поэтому амплитуда переменного напряжения база-эмиттер  $Ube = Icm \cdot Ry$ .

Ток, протекающий в контуре генератора, а также через кварцевый резонатор можно определить из следующего выражения

$$Icont = Ube \cdot \omega \cdot C2. \quad (10)$$

Мощность, рассеиваемая на кварцевом резонаторе, определяется как

$$Pq = I^2 cont \cdot Rq / 2. \quad (11)$$

Амплитуда первой гармоники выходного напряжения генератора равна

$$Uout = Icm \cdot Rc. \quad (12)$$

## 5. Пример расчета кварцевого генератора

В качестве примера рассчитаем кварцевый генератор, управляемый напряжением со следующими параметрами:

- номинальная частота,  $f_0$  10 МГц;
- перестройка частоты,  $\delta$   $\pm 100 \cdot 10^{-6}$ ;
- диапазон изменения напряжения управления,  $E_y$  0...5 В;
- амплитуда 1-й гармоники выходного напряжения,  $U_{cm}$   $\geq 250$  мВ;
- сопротивление коллекторной нагрузки,  $R_c$  200 Ом;
- напряжение питания,  $E_p$  5 В  $\pm 10\%$ .

Кварцевый резонатор берем со следующими типовыми параметрами:

- номинальная частота 10 МГц;
- динамическое сопротивление 10 Ом;
- динамическая емкость 10 Ф;
- статическая емкость 3 пФ.

1. По формуле (3) определяем ток коллектора в рабочей точке

$$I_{c0} = \frac{U_{cm}}{R_c \cdot 2} = \frac{250}{200 \cdot 2} = 0,625 \text{ мА}. \quad (13)$$

2. Крутизна коллекторного тока согласно формуле (4) будет равна

$$Y_{21} = 0,625 \cdot \frac{11600}{300} = 24,2 \text{ мА/В}. \quad (14)$$

3. Для обеспечения широкого диапазона перестройки частоты генератора задаемся фактором регенерации  $G=5$  и определяем управляющее сопротивление  $R_y$

$$R_y = G / Y_{21} = 5 / 24,2 = 207 \text{ Ом}. \quad (15)$$

4. Определяем эквивалентную емкость генератора  $C_2$

$$C_2 = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \sqrt{\frac{1}{\omega^2 \cdot R_y \cdot R_q}} \approx \sqrt{\frac{1}{40 \cdot 10^{14} \cdot 207 \cdot 10}} = 347 \text{ нФ}. \quad (16)$$

Если  $C_1=C_2$ , то  $C_1=C_2=347 \times 2=794$  пФ. Из ряда E24 выбираем ближайшие значения емкостей конденсаторов  $C_1=C_2=750$  пФ.

5. Определяем элементы схемы генератора, задающие режим по постоянному току

$$R_E = \frac{E_p}{2 \cdot I_{c0}} = \frac{5}{2 \cdot 0,625} = 4 \text{ кОм}. \quad \text{Выбираем } R_E = 3,9 \text{ кОм}. \quad (17)$$

6. Определяем элементы цепи базового смещения, для чего находим:

$$\text{а) ток делителя } I_{\partial} = \frac{E_p}{R_{B1} + R_{B2}} = 20 \cdot I_{b0} = \frac{(5 \dots 20) \cdot I_{c0}}{\beta} = \frac{20 \cdot 0,625}{100} = 0,125 \text{ мА}; \quad (18)$$

$$\text{б) напряжение на базе транзистора } U_B = \frac{E_p}{2} + 0,75 = 3,25 \text{ В}, \quad (19)$$

$$\text{тогда } R_{B2} = U_B / I_{\partial} = 3,25 / 0,125 = 26 \text{ кОм}. \quad \text{Выбираем } R_{B2} = 27 \text{ кОм}, \quad (20)$$

$$\text{при этом } R_{B1} = \frac{E_p - U_B}{I_{\partial}} = \frac{5 - 3,25}{0,125} = 14 \text{ кОм}. \quad \text{Выбираем } R_{B1} = 13 \text{ кОм}. \quad (21)$$

7. Для определения перестройки частоты из выражения (8) находим

$$\frac{\Delta f_0}{f} = \frac{C_q}{2 \cdot (C_{v0} + C_0)}; \quad \frac{\Delta f_5}{f} = \frac{C_q}{2 \cdot (C_{v5} + C_0)},$$

тогда общая перестройка будет равна

$$2\delta = \frac{\Delta f_5}{f} - \frac{\Delta f_0}{f} \approx \frac{Cq}{2} \cdot \left( \frac{1}{Cv5} - \frac{1}{Cv0} \right). \quad (22)$$

Умножая левую и правую части равенства на  $Cv0$ , получаем

$$2 \cdot \delta \cdot Cv0 = \frac{Cq}{2} \cdot \left( \frac{Cv0}{Cv5} - 1 \right) = \frac{Cq}{2} \cdot (Kp - 1), \quad (23)$$

где  $Kp$  – коэффициент перекрытия варикапа по емкости.

Выбрав  $Kp=3$ , определим  $Cv0$ .

$$Cv0 = \frac{Cq}{2 \cdot 2 \cdot \delta} \cdot (Kp - 1) = \frac{10^{-14}}{400 \cdot 10^{-6}} \cdot 2 = 50 \cdot 10^{-12} = 50 \text{ pF}. \quad (24)$$

При этом

$$Cv5 = \frac{Cv0}{Kp} = \frac{50}{3} \approx 17 \text{ pF}. \quad (25)$$

Выбираем варикап ВВ659, у которого  $Cv0=55$  pF, а  $Cv5=18$  pF.

8. В заключение определим также мощность рассеяния на кварцевом резонаторе

$$Pq = I_q^2 \cdot Rq = (U_{bem} \cdot \omega \cdot C2)^2 \cdot Rq / 2 = (I_{cm} \cdot Ry \cdot \omega \cdot C2)^2 \cdot Rq / 2. \quad (26)$$

Подставляя в данное выражение значения параметров, получаем

$$Pq = (2 \cdot 0.625 \cdot 207 \cdot 6.28 \cdot 10^7 \cdot 750 \cdot 10^{-12})^2 \cdot 10 / 2 = 743 \mu W. \quad (27)$$

Допустимая мощность для данного типа резонаторов составляет  $1 \text{ mW}$  или  $1000 \mu W$ .

## Заключение

Предложенная последовательность расчета кварцевых генераторов позволила значительно повысить точность его расчета и упростить методику анализа кварцевых генераторов.

Поскольку известные основные расчетные формулы и соотношения для кварцевых генераторов приведены без выводов, повышена степень понимания и восприятия работоспособности кварцевых генераторов, что достаточно важно при обучении студентов. Несколько видоизмененная последовательность расчета кварцевого генератора позволила произвести, не только энергетический расчет и расчет основных элементов схемы, но и, что важно, мощность рассеяния на кварцевом резонаторе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Грановская Р.А. и др. Расчет кварцевых генераторов: учеб. пособие. - М.: МАИ, 1999.

## ENGINEER TECHNIQUE OF THE QUARTZ GENERATOR ANALYSIS AND CALCULATION

Litvinov V.P.

The objective of this paper is the development of engineer technique of different quartz generator circuit calculation, which allows calculating oscillator rapidly and with necessary accuracy. The supposed technique of quartz generator analysis and calculation is appropriated to as equipment developer, having experience in the analog electronic circuits (in particularly, oscillator) or quartz generators, and students during course or diploma design. At this time the known calculation equations and relations for oscillator are listed without derivation.

**Key words:** quartz oscillator, self-excitation condition, amplitude balance, phase balance, "capacity oscillator", quartz resonator.

## Сведения об авторе

**Литвинов Валентин Петрович**, 1935 г.р., окончил МЭИ (1962), кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехнических устройств и систем МГОУ, автор более 150 научных работ, область научных интересов – теория и практика высокостабильных колебаний.