

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕРМОКОМПЕНСИРОВАННОГО КВАРЦЕВОГО ГЕНЕРАТОРА В САПР KEYSIGHT ADS

В статье предложен метод к проектированию термокомпенсированного кварцевого генератора в САПР Keysight ADS, который позволяет: исследовать условия возникновения автоколебаний в заданной схеме генератора; проанализировать температурно-частотные характеристики резонатора; сформировать требования к функции управления частотой; моделировать шумовые характеристики генератора; выполнить оптимизацию схемы по заданным параметрам. В отличие от известного численного проектирования термокомпенсированного кварцевого генератора в SPICE программах с последующим анализом результатов в математической программе, например, Mathcad предложенный метод позволяет исследовать форму колебаний, спектральную чистоту выходного сигнала, учитывать нелинейное влияние схемы и более тонкие эффекты.

**Ключевые слова:** кварцевый генератор, резонатор, термокомпенсация, САПР Keysight ADS, генератор Колпитца, SPICE программа.

**Актуальность.** К термокомпенсированным кварцевым генераторам предъявляются весьма жесткие требования по стабильности выходной частоты. При их проектировании необходимо не только определить точное значение частоты при какой-то температуре (например, 20 °С), но и форму всей температурно-частотной характеристики (ТЧХ), а также характеристику управления частотой управления напряжением [1]. Нелинейность характеристики управления может существенно усложнить процесс термокомпенсации. Таким образом, проектировщику в процессе разработки схемы генератора необходимо иметь возможность рассчитывать номинал выходной частоты, пределы перестройки и нелинейность характеристики управления.

Кварцевые генераторы являются нелинейными колебательными системами, форма и частота выходных колебаний которых может быть получена в результате решения системы нелинейных дифференциальных уравнений. Для реальной схемы генератора система уравнений является весьма сложной и трудно решаемой. Разработанные методы приближенного решения этих систем (метод медленно меняющихся амплитуд, метод Ван Дер Поля, метод Пуанкаре [2], метод укороченных уравнений Евтянова [3] и др. все равно остаются достаточно сложными для использования в инженерных задачах и в практической деятельности используются редко.

Для инженерных расчетов обычно используются более простые методики [4–6], основанные не на решении системы дифференциальных уравнений, а на анализе баланса амплитуд и фаз, как условия самовозбуждения колебаний. Такие методики не позволяют определять реальную форму

колебаний, учитывать нелинейное влияние схемы и более тонких эффектов, таких как влияние высших гармоник на сдвиг частоты колебаний [7].

С появлением методов моделирования электронных схем на ЭВМ появились попытки использования этих программ для анализа кварцевых генераторов, однако их использование столкнулось с рядом сложностей. Большинство программ моделирования электронных устройств на уровне принципиальных схем (программные пакеты MiltiSim (Electronics Workbench), MicroCAP, CircuitMaker и др.) в качестве вычислительного ядра используют программу SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis). Перечисленные САПР отличаются простотой и доступностью, однако не имеют в своем составе средств для моделирования автогенератора, поскольку основные доступные виды анализа — это анализ режима по постоянному току; анализ отклика схемы на вариации источников постоянного напряжения (тока) и иных параметров составляющих цепь компонентов; исследование частотных характеристик схемы, линеаризованной в окрестности рабочей точки; исследование переходных процессов при воздействии сигналов, задаваемых в виде функций времени. Специфической сложностью моделирования кварцевых генераторов в SPICE программах является высокая добротность резонатора (как минимум — десятки тысяч, а для высокодобротных образцов — более миллиона), приводящая к необходимости решения сотен тысяч уравнений, что занимает нереально большое время моделирования. При этом в [8] при моделировании генератора в программе NI Multisim (одна из лучших SPICE-программ) вообще делается вывод, что достоверность полученных в результате моделиро-

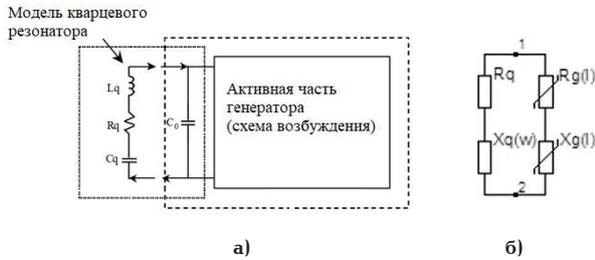


Рис. 1. Биполярное представление генератора (генератор в виде параллельного соединения двухполюсников)

вания параметров генератора будет невысока, так как слишком много факторов могут влиять на работоспособность схемы или приводить к несоответствию полученных результатов реальным схемам, и строить модели кварцевых генераторов в программе NI Multisim нецелесообразно. Это совпадает с выводами и других исследователей. Типовое решение проблемы — замена в схеме высокодобротного кварцевого резонатора на низкодобротный LC-контур позволяет смоделировать колебания, но их форма и частота очень далеки от реальных. Для точных расчетов такой метод неприемлем. Другим принципиальным ограничением использования численно-аналитического метода моделирования кварцевых генераторов в программах SPICE является невозможность подключения PDK (Process Design Kit) — набора файлов, используемых в полупроводниковой промышленности для разработки интегральной схемы и тем самым обеспечения сквозного проектирования и контроля характеристик генератора.

Рядом ученых [9–16] активно разрабатывалась методика моделирования высокостабильных генераторов, основанная на дипольном представлении схемы генератора (линейная узкополосная схема резонатора плюс широкополосная нелинейная схема каскада возбуждения (рис. 1 [14])).

Данный метод хорошо моделирует нелинейные свойства активной части схемы и позволяет учитывать изменение этой нелинейности от тока через резонатор, что является основой точности моделирования, однако встроенные средства SPICE программ не позволяют полностью решить задачу моделирования генератора. В [13] предложена гибридная численно-аналитическая методика моделирования кварцевых генераторов, в которой:

- SPICE — программа анализирует зависимость активного и реактивного сопротивления активной части (рис. 1) генератора от тока через резонатор;

- эта зависимость аппроксимируется полиномом  $n$ -ой степени в любой математической программе (MathCAD или MATLAB);

- в схеме рис. 1а кварцевый резонатор представляется суммой двух сопротивлений  $R_q$  (активная часть сопротивления резонатора) и  $X_q(\omega)$  (мнимая часть, зависящая от частоты), а активная часть моделируется двумя последовательно соединенными сопротивлениями  $R_g(i)$  (активная часть входного сопротивления как функция входного тока) и  $X_g(i)$  (реактивная часть входного сопротивления как функция входного тока) (рис. 1б);

- полученная формула (полином) подставляется как параметр нелинейности в схему на рис. 1б  $R_g(i)$  и  $X_g(i)$ . При этом

**1. Условия самовозбуждения.** Задаются неравенством:

$$Rq + Rg(0) < 0, \quad (1)$$

где  $Rg(0)$  — активное сопротивление схемы возбуждения при нулевом токе резонатора. Граница области самовозбуждения определяется максимальным сопротивлением резонатора, при котором автогенератор способен самовозбуждаться и находится из равенства  $Rq + Rg(0) = 0$ .

**2. Параметры стационарного режима.** Амплитуда и частота колебаний определяются из условий баланса амплитуд и фаз, которые для эквивалентной схемы рис. 1б имеют вид:

$$Rq + Rg(I) = 0. \quad (2)$$

$$Xq(\omega) + Xg(I) = 0. \quad (3)$$

Уравнение (2) определяет величину тока резонатора в стационарном режиме. На основе (3) рассчитывается частота колебаний и частотная расстройка. Расчет других параметров (напряжений в узлах схемы, выходной мощности и др.) производится в программах моделирования в режиме transient (расчет переходных процессов) при замене резонатора эквивалентным источником гармонического тока с параметрами, соответствующими стационарному режиму.

**3. Переходные процессы установления амплитуды и частоты колебаний в резонаторе.** Расчет переходных процессов производится путем решения нелинейного дифференциального уравнения, которое для эквивалентной схемы рис. 1б имеет следующий вид:

$$\frac{d^2 i}{dt^2} - \omega_q \cdot \frac{1}{Q} \left( \frac{-Rg(I)}{Rq} - 1 \right) \frac{di}{dt} + \omega_q^2 \left( \frac{Xg(I)}{Xq(\omega_q)} + 1 \right) i = 0, \quad (4)$$

где  $Q$  — добротность резонатора,  $\omega_q^2 = \frac{1}{Lq \cdot Cq}$ .

Укороченные дифференциальные уравнения для амплитуды и фазы колебаний получены методом медленно меняющихся амплитуд и записываются в виде:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{I \cdot \omega_q}{2Q} \left( \frac{-Rg(I)}{Rq} - 1 \right), \quad (5)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\omega_q}{2} \cdot \frac{Xg(I)}{Xq(\omega_q)} = \frac{\omega_q \cdot Xg(I)}{2Q \cdot Rq}. \quad (6)$$

Решения уравнений (5) и (6) могут быть получены с помощью любого математического пакета, например Mathcad. Уравнение (5) определяет переходный процесс установления амплитуды, а уравнение (6) — переходный процесс установления частоты колебаний в резонаторе

К сожалению, стандартные программы не позволяют сделать это в одном цикле и разработчики вынуждены создавать либо свои специфические программы [17], либо использовать комбинацию существующих программ [13].

Для моделирования генераторов и других нелинейных радиочастотных систем (модуляторы, смесители и др) удобно использовать метод

гармонического баланса [18, 19], предложенный Н. М. Крыловым и Н. Н. Боголюбовым. В моделировании этот метод сначала использовался для СВЧ нелинейных устройств, а впоследствии стал применяться и для анализа автоколебательных систем [20, 21].

С нашей точки зрения, актуальным является комплексный подход к исследованию и разработке кварцевого генератора, в том числе термокомпенсированного КГ, в САПР, который позволяет быстро и максимально достоверно:

- исследовать процессы в схеме генератора на основе классических методик и подходов;
- исследовать полную схему автогенератора на схемотехническом уровне;
- исследовать зависимость точности термокомпенсации от параметров термокомпенсирующего устройства;
- анализировать влияние того или иного способа синтеза компенсирующей функции на уровень фазового шума;
- выполнять оптимизацию схемы генератора с акцентом на необходимый параметр или ряд параметров генератора.

**Методология.** Целью статьи — предложить новую методологию исследования работы автогенератора. Предлагаемая методология моделирования основана на использовании метода гармонического баланса в САПР Keysight ADS, которая является одним из мировых лидеров среди САПР телекоммуникационных систем и устройств и метода двухполюсного представления генератора.

Порядок моделирования и разработки термокомпенсированного кварцевого генератора включает в себя действия: 1) исследование импедансов активной и пассивной частей автогенератора (схемы возбуждения); 2) исследование температурно-частотной характеристики кварцевого резонатора (КР) на основе данных спецификации; 3) исследование импеданса пассивной части в диапазоне температур; 4) формирование требований к управляющему напряжению для управления частотой КР.

## Моделирование и разработка термокомпенсированного кварцевого генератора

1. Исследование импедансов активной и пассивной частей автогенератора.

Генератор удобно рассматривать в виде параллельного соединения двухполюсников: активного двухполюсника (входное сопротивление является отрицательным (активным) и емкостным ( $-R_{act}$  и  $X_{act}$ )) и пассивного двухполюсника (входное сопротивление имеет характер сопротивления потерь и индуктивности) [12, 16]. Условием самовозбуждения является превышение величины отрицательного сопротивления активного двухполюсника над величиной сопротивления потерь в пассивном двухполюснике, причем генерирование колебаний осуществимо только на частоте, где равны и комплексно сопряжены реактивные части входного сопротивления активного и пассивного двухполюсников. С увеличением амплитуды генерируемых колебаний происходит ее дальнейшее ограничение и, как следствие, — уменьшение значения эффективного отрицательного сопротивления активного двухполюсника до значения, при котором величина отрицательного сопротивления активного двухполюсника и сопротивления потерь пассивного двухполюсника становятся равны:  $|R_{act}| = |R_{pas}|$ ,  $X_{act} = -X_{pas}$  (рис. 1).

В качестве примера этапы проектирования термокомпенсированного кварцевого генератора выполняются с использованием КР NX2520SG с номинальной частотой 26 МГц [22]. Активная часть автогенератора выполнена на биполярном транзисторе по схеме емкостной трехточки (рис. 2), где компоненты источника шума SRC16 и OscPort используются для моделирования характеристики фазового шума и исследования кольца автогенератора соответственно. На полевом p-канальном транзисторе J310 реализован буферный каскад.

Импеданс активной части генератора (рис. 2) при изменении уровня возбуждения при частоте сигнала  $f = 26$  МГц показан на рис. 3. Заштрихованной областью на рис. 3 отмечен диапазон возможных значений реактивной (а) и активной (б)

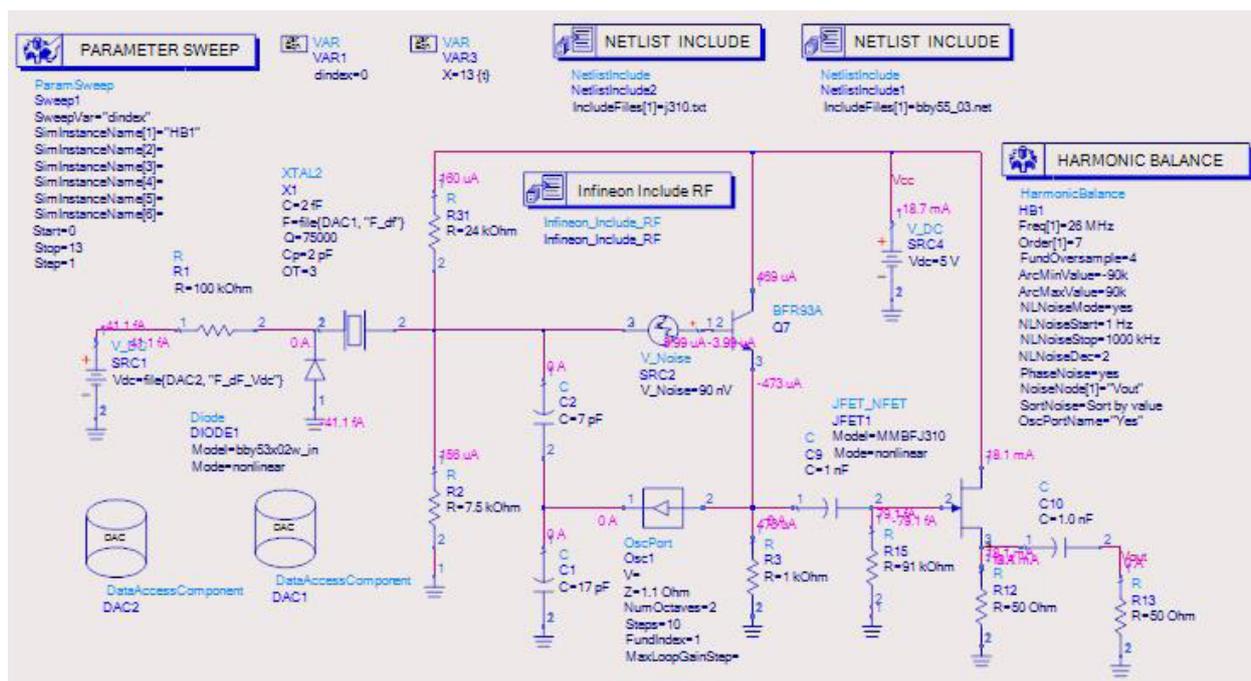


Рис. 2. Схема генератора

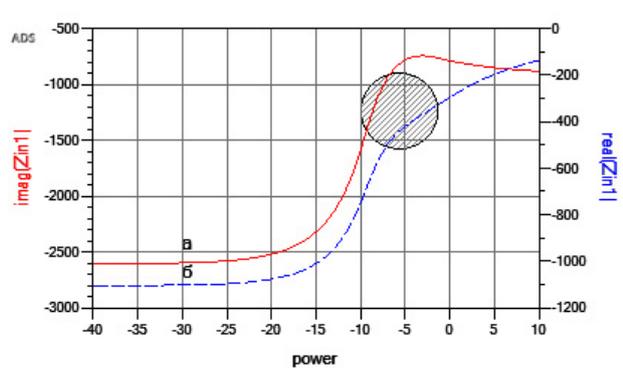


Рис. 3. Реактивная (а) и активная (б) части импеданса схемы возбуждения при изменении уровня

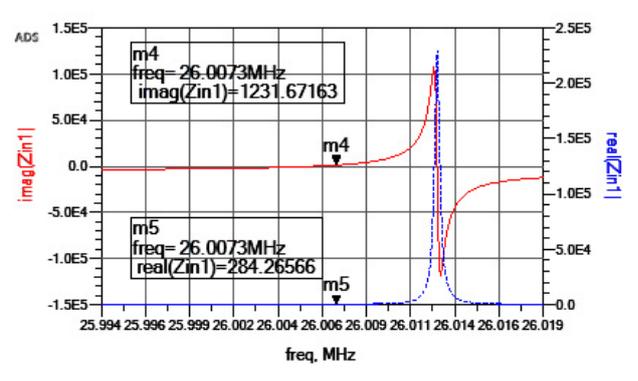


Рис. 4. Реактивная (m4) и активная (m5) части импеданса пассивной части

|     |  |   |      |      |      |                                      |  |
|-----|--|---|------|------|------|--------------------------------------|--|
| 8   | Temperature coefficient                |   |      |      |      |                                      |  |
| 8-1 | Inflection point                       | - | 29   | 30.5 | 32   | °C                                   |  |
| 8-2 | To                                     | - |      | 30.5 | -    | °C                                   |  |
| 8-3 | Third-order curve fitting coefficient  | - | 8.5  | -    | 11.5 | $\times 10^{-5}$ ppm/°C <sup>3</sup> | The curve can be modeled as a third-order polynomial.<br>$f(t) = c_3(t - t_0)^3 + c_2(t - t_0)^2 + c_1(t - t_0)$ |
| 8-4 | Second-order curve fitting coefficient | - | -4.5 | -    | +4.5 | $\times 10^{-4}$ ppm/°C <sup>2</sup> |  |
| 8-5 | First-order curve fitting coefficient  | - | -0.4 | -    | -0.1 | ppm/°C                               |  |

Рис. 5. Фрагмент спецификации на резонатор NX2520SG [22]

| Tx    | F_df1      | dF_ppm |
|-------|------------|--------|
| -40.0 | 25999969.0 | -31.0  |
| -30.0 | 25999982.2 | -17.8  |
| -20.0 | 25999991.4 | -8.6   |
| -10.0 | 25999997.1 | -2.9   |
| 0.0   | 26000000.2 | 0.2    |
| 10.0  | 26000001.2 | 1.2    |
| 20.0  | 26000001.0 | 1.0    |
| 30.0  | 26000000.1 | 0.1    |
| 40.0  | 25999999.2 | -0.8   |
| 50.0  | 25999999.1 | -0.9   |
| 60.0  | 26000000.4 | 0.4    |
| 70.0  | 26000003.8 | 3.8    |
| 80.0  | 26000010.1 | 10.1   |
| 85.0  | 26000014.5 | 14.5   |

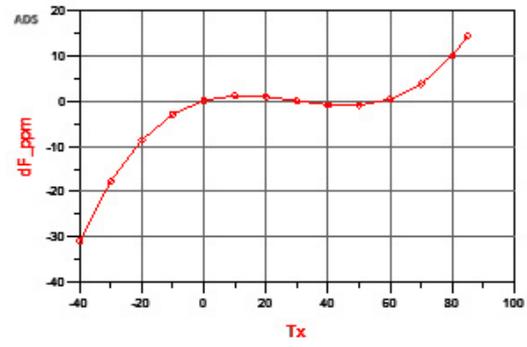


Рис. 6. Температурно-частотная характеристика КР NX2520SG при аппроксимации полиномом 3-ей степени на основе данных спецификации

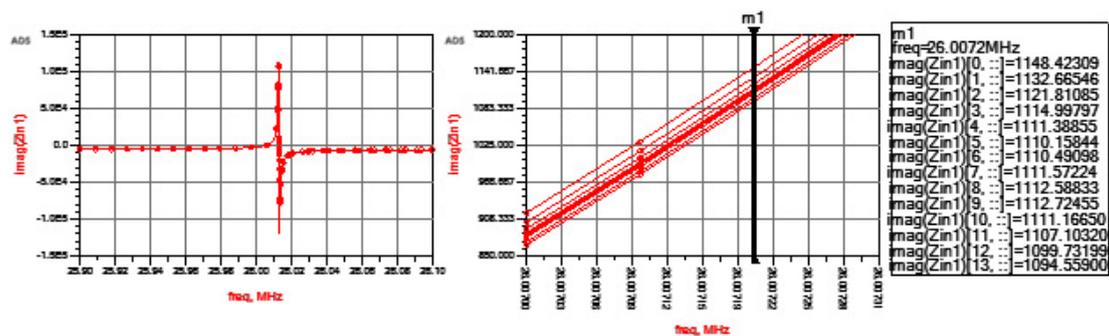


Рис. 7. Реактивная часть импеданса пассивной части

части импеданса схемы возбуждения генератора в зоне увеличения и ограничения амплитуды генерируемых колебаний. На рис. 4 показаны зависимость реактивной и активной частей импеданса пассивной части от частоты. Данные зависимостей на рис. 3, 4 показывают, что, в соответствии с моделью двухплюсового автогенератора, частота генерации должна быть в окрестности частоты 26,0073 МГц.

2. Исследование температурно-частотной характеристики кварцевого резонатора (КР) на основе данных спецификации.

Известно, что температурно-частотная характеристика кристалла кварца может быть аппроксимирована полиномом 3-ей степени [1, 22]:

$$\Delta f(T) = c_3 \cdot (T - T_0)^3 + c_2 \cdot (T - T_0)^2 + c_1 \cdot (T - T_0),$$

где  $\Delta f$  — стабильность частоты,  $c_1$ ,  $c_2$  и  $c_3$  — температурные коэффициенты, зависящие от угла среза,  $T_0$  — температура точки перегиба, а  $T$  — фактическая температура.

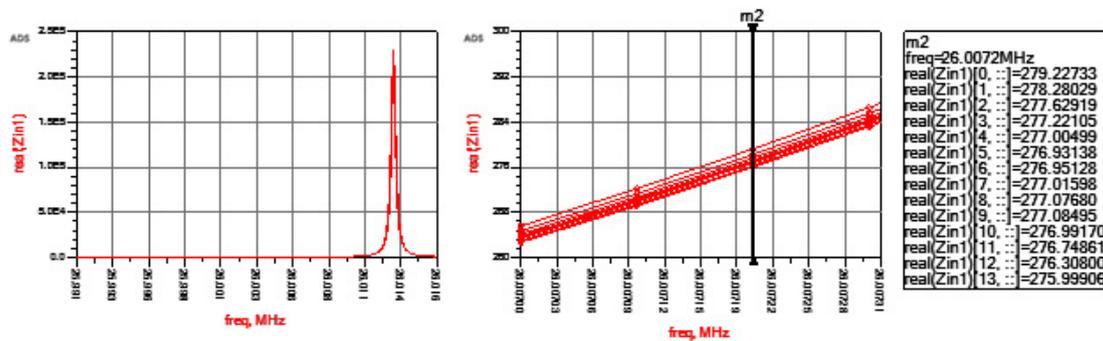


Рис. 8. Активная часть импеданса пассивной части

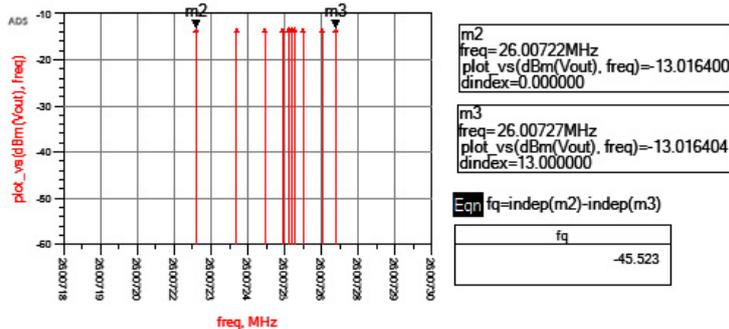


Рис. 9. Изменение частоты некомпенсированного КГ

На рис. 5 приведен фрагмент спецификации на КР NX2520SG [22] со сведениями о значениях температурно-частотных коэффициентов.

Изменение частоты для  $f_0 = 26$  МГц в промышленном диапазоне температур от минус 40 до плюс 85 °С представлено на рис. 6.

Данные зависимости на рис. 6 показывают, что изменение частоты КР в диапазоне температур минус 40 плюс 85 °С составляет 45,5 ppm.

3. Исследование импеданса пассивной части в диапазоне температур.

Для исследования импеданса пассивной части в диапазоне температур используется схема на рис. 2.

Частота последовательного резонанса  $F$  исследуемого резонатора  $X1$  задается с помощью компонента DAC1 (читаются значения  $F\_dF1$  на рис. 6), статическая емкость КР задана равной  $C_p = 2$  пФ. Для изменения частоты  $F$  КР является варикап bby53x02w.

На рис. 7, 8 соответственно показаны изменения реактивной и активной частей импеданса КР в окрестности, которые соответствуют области значений реактивной и активной частей импеданса схемы возбуждения (рис. 2). На рис. 7, 8 индексы от 0 до 13 (в выражении  $\text{imag}(Zin)$  и  $\text{real}(Zin)$  для значений маркера  $m1$ ,  $m2$ ) соответствуют значениям температур от минус 40 до плюс 85 с шагом 10 °С (см. рис. 6)).

Данные зависимостей на рис. 7, 8 показывают, что, вследствие изменения температуры, пассивная часть автогенератора обеспечивает диапазон изменения значений, соответствующих области на рис. 3, и гарантирует условия генерирования автоколебаний.

4. Формирование требований к управляющему напряжению для управления частотой кварцевого генератора (КГ).

КГ с температурной компенсацией (ТККГ) состоит из датчика температуры, генератора компен-

сационного напряжения и кварцевого генератора, управляемого напряжением. Принцип работы ТСХО заключается в стабилизации изменения частоты кварцевых резонаторов в зависимости от изменения температуры окружающей среды.

Анализ литературы показал, что существует несколько причин, ограничивающих температурную стабильность частоты: 1) погрешности формирования компенсирующей функции, обусловленные структурой термокомпенсирующего устройства; 2) погрешности настройки системы компенсации, вызванные неточностью подбора элементов; 3) старение элементов системы компенсации. Кроме того, существует еще несколько малоизученных факторов ухудшения стабильности частоты, связанных с реакцией генератора на нестационарные тепловые воздействия: 1) гистерезис ТЧХ КР; 2) температурно-динамические искажения ТЧХ резонатора; 3) неоднородность пространственно-временного распределения теплового поля в объеме генератора. Термокомпенсирующее устройство на базе микроконтроллера позволяет реализовать синтез компенсирующей функции с учетом перечисленных факторов, в частности, табличным способом, когда в область памяти микроконтроллера заносятся экспериментально полученные коды цифроаналогового преобразователя (ЦАП) (задают управляющее напряжение) по адресам, определяемым по кодам аналого-цифрового преобразователя (АЦП), значение которых зависит от температуры.

Для формирования требований к управляющему напряжению для управления частотой кварцевого генератора была промоделирована схема КГ на основе ранее исследованных пассивной и активной частей автогенератора (рис. 2).

Точность температурной компенсации определяется точностью управления частотой характеристикой при воздействии дестабилизирующих факторов. Зависимость управляющего напряже-

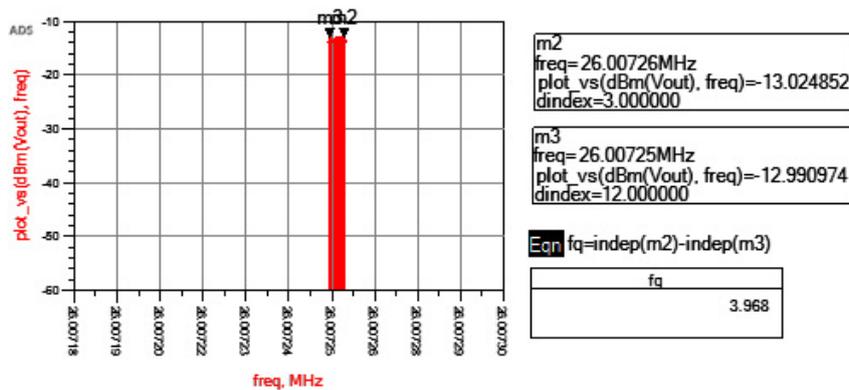


Рис. 10. Изменение частоты компенсированного КГ

ния от температуры для схемы на рис. 2 сформирована для условий: диапазон температур от  $-40$  до  $+85$  °C; в диапазоне температур взято 14 точек с шагом 10 °C; шаг управляющего напряжения (на выходе ЦАП) задан равным 10 мВ. На рис. 2 напряжение на выходе ЦАП смоделировано источником напряжения SRC1, который генерирует напряжение в соответствии с данными о температуре. В результате температурная стабильность повышена примерно с диапазона изменений  $-31..+14,5$  ppm (рис. 9) до  $\pm 2$  ppm (рис. 10), то есть примерно в 11 раз при изменении управляющего напряжения (В) на варикапе в модели: 4.07, 4.04, 4.02, 4.01, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 3.99, 3.97, 3.96.

В рамках предложенного подхода данные параметры могут быть улучшены, например, за счет уменьшения температурного шага и минимального шага управляющего напряжения. Также качество температурной компенсации может быть улучшено при рассмотрении значений дифференциальной нелинейности преобразования, нелинейности преобразования, абсолютной погрешности преобразования конкретного ЦАП и параметров термодатчика.

**Заключение.** Предложенная методика проектирования термокомпенсированного кварцевого генератора, реализованная в САПР Keysight ADS, в отличие от методик, в основе которых лежит использование SPICE программ позволяет проводить комплексный анализ схем термокомпенсированных генераторов в части:

- определения реальной частоты генерации в конкретной схеме с учетом влияния параметров активной части схемы и конструкции на частоту;
- определения характеристики управления частотой генератора от управляющего напряжения с учетом нелинейности использованного варикапа и схемы его включения;
- определения диапазона перестройки частоты;
- влияния параметров резонатора на перестройку частоты;
- исследования шумовой характеристики генератора.

Можно считать, что **предложенная методика позволяет высчитывать частоту генерации реальной схемы с высокой точностью** (частота генерации практически никогда не равна частоте резонанса резонатора и цифре, написанной на корпусе резонатора), а также позволяет проводить оптимизацию схемы генератора по критериям удовлетворения требованиям технического задания. В целом предложенный метод позволяет ужесточить требования к показателям качества и уменьшить время разра-

ботки КГ по сравнению с численно-аналитическим подходом проектирования КГ.

#### Библиографический список

1. Frerking M. Crystal oscillator design and temperature compensation. New York: Van Nostrand, 1978. 241 p.
2. Андронов А. А., Витт А. А., Хайкин С. Э. Теория колебаний. 2-е изд. Москва: Физматгиз, 1959. 916 с.
3. Евтянов С. И. Ламповые генераторы. Москва: Связь, 1967. 384 с.
4. Литвинов В. П. Инженерная методика анализа и расчета кварцевых генераторов // Научный вестник МГТУ ГА. 2011. № 171. С. 50–57.
5. Альтшуллер Г. Б. Кварцевая стабилизация частоты. Москва: Связь, 1974. 272 с.
6. Петров Б. Е., Романюк В. А. Радиопередающие устройства на полупроводниковых приборах. Москва: Высшая школа, 1989. 232 с.
7. Андреев В. С. Теория нелинейных электрических цепей. Москва: Радио и связь, 1982. 280 с.
8. Макаренко В. Проблемы моделирования кварцевых генераторов в среде NI Multisim // Моделирование радиоэлектронных устройств. 2010. № 7. С. 43–49.
9. Малышев В. В., Никитин А. Б. Моделирование автогенераторов в системах автоматизированного проектирования // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2016. № 1 (236). С. 15–22. DOI: 10.5862/JCSTCS.236.2. EDN: VUUBFH.
10. Brendel R., Gillet D., Ratier N. [et al.]. Nonlinear dipolar modelling of quartz crystal oscillators. 2000. URL: [https://www.researchgate.net/publication/228867063\\_Nonlinear\\_dipolar\\_modelling\\_of\\_quartz\\_crystal\\_oscillators](https://www.researchgate.net/publication/228867063_Nonlinear_dipolar_modelling_of_quartz_crystal_oscillators) (дата обращения: 15.05.2023).
11. Addouche M., Brendel R., Gillet D. [et al.]. Modeling of Quartz Crystal Oscillators by Using Nonlinear Dipolar Method // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2003. Vol. 50, no. 5. P. 487–495. DOI: 10.1109/TUFFC.2003.1201461.
12. Губарев А. А. Повышение эффективности моделирования кварцевых генераторов в схемотехнических САПР общего назначения // Омский научный вестник. 2003. № 2. С. 89–101.
13. Gubarev A. A., Kosykh A. V., Zavjalov S. A. [et al.]. SPICE simulation of high-Q crystal oscillators: single and dual-mode oscillator analysis // Proc. of the 2003 joint meeting IEEE IFCS and 17th EFTF. 2003. P. 606–614. DOI: 10.1109/FREQ.2003.1275160.
14. Gehring M. Fast crystal-oscillator-simulation methodology. 2005. URL: [https://designers-guide.org/forum/Attachments/GEHRING\\_-\\_Fast\\_Crystal-Oscillator-Simulation\\_Methodology.pdf](https://designers-guide.org/forum/Attachments/GEHRING_-_Fast_Crystal-Oscillator-Simulation_Methodology.pdf) (дата обращения: 02.01.2023).

15. Ratier N., Bruniaux M., Galliou S. [et al.]. A very high speed method to simulate quartz crystal oscillator // 19th European Frequency and Time Forum (EFTF). 2005. URL: [https://www.researchgate.net/publication/29615543\\_A\\_Very\\_High\\_Speed\\_Method\\_to\\_Simulate\\_Quartz\\_Crystal\\_Oscillator](https://www.researchgate.net/publication/29615543_A_Very_High_Speed_Method_to_Simulate_Quartz_Crystal_Oscillator) (дата обращения: 02.01.2023).

16. Ляшук А. Н., Завьялов С. А. Генератор на поверхностных акустических волнах с широкой перестройкой по частоте // Омский научный вестник. 2011. № 3 (103). С. 300–303. EDN: OPFKAF.

17. Addouche M., Ratier N., Gillet D. [et al.]. ADOQ: a quartz crystal oscillator simulation software // 2001 IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition. 2001. P. 753–757. DOI: 10.1109/FREQ.2001.956375.

18. Крылов Н. М., Боголюбов Н. Н. Символические методы нелинейной механики в их приложениях к исследованию резонанса в электронном генераторе // Известия Российской академии наук. VII серия. Отделение математических и естественных наук. 1934. Вып. 1. С. 7–34.

19. Крылов Н. М., Боголюбов Н. Н. Введение в нелинейную механику. Киев: Изд-во АН УССР, 1937. 364 с.

20. Rohde U. L. Harmonic Balance Method Handles Nonlinear Microwave CAD Problems // Microwave Journal. 1987. № 10. P. 203–210.

21. Горгадзе С. Ф., Максимов А. А. Теория гармонического баланса для схемотехнического проектирования // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. С. 21–32. DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-11-21-32. EDN: NVPJJN.

22. Specification. URL: [https://datasheet.lcsc.com/lcsc/1912111437\\_NDK-EXS00A-CS11019\\_C280829.pdf](https://datasheet.lcsc.com/lcsc/1912111437_NDK-EXS00A-CS11019_C280829.pdf) (дата обращения: 02.01.2023).

**ЛЯШУК Алексей Николаевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 1635-6235

AuthorID (РИНЦ): 742615

ORCID: 0000-0002-6394-9390

ResearcherID: R-2812-2016.

Адрес для переписки: [pribor78@mail.ru](mailto:pribor78@mail.ru)

**КОСЫХ Анатолий Владимирович**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Радиотехнические устройства и системы диагностики» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2971-4057

AuthorID (SCOPUS): 6701547176

ORCID: 0000-0001-6705-4255

ResearcherID: G-5127-2013

Адрес для переписки: [avkosykh@omgtu.ru](mailto:avkosykh@omgtu.ru)

#### Для цитирования

Ляшук А. Н., Косых А. В. Проектирование термокомпенсированного кварцевого генератора в САПР Keysight ADS // Омский научный вестник. 2023. № 4 (188). С. 132–139. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-132-139.

Статья поступила в редакцию 20.06.2023 г.

© А. Н. Ляшук, А. В. Косых

UDC 621.373.5.001.5

DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-132-139

EDN: UJETYF

**A. N. LYASHUK**

**A. V. KOSYKH**

**Omsk State  
Technical University,  
Omsk, Russia**

## TEMPERATURE COMPENSATED CRYSTAL OSCILLATOR DESIGN IN KEYSIGHT ADS

The article proposes an all-embracing approach to designing a temperature compensated crystal oscillator in Keysight ADS CAD system, which allows: to investigate the conditions for the occurrence of self-oscillations in a given oscillator circuit; analyze the temperature-frequency characteristics of the resonator; form requirements for the frequency control function; simulate noise characteristics of the generator; optimize the circuit according to the given parameters. In contrast to the well-known numerical design of a thermally compensated crystal oscillator in SPICE programs with subsequent analysis of the results in a mathematical program, for example, Mathcad, the proposed method allows us to investigate the real shape of oscillations, the spectral purity of the output signal, take into account the nonlinear influence of the circuit and more subtle effects.

**Keywords:** crystal oscillator, resonator, thermal compensation, Keysight ADS CAD, Colpitts oscillator, SPICE program.

#### References

1. Frerking M. Crystal oscillator design and temperature compensation. New York: Van Nostrand, 1978. 241 p. (In Engl.).

2. Andronov A. A., Vitt A. A., Khaykin S. E. Teoriya kolebaniy [Vibration theory]. 2nd ed. Moscow, 1959. 916 p. (In Russ.).

3. Evtyanov S. I. Lampovyye generatory [Lamp generators]. Moscow, 1967. 384 p. (In Russ.).

4. Litvinov V. P. Inzhenernaya metodika analiza i rascheta kvartsevykh generatorov [Engineer technique of the quartz generator analysis and calculation] // Nauchnyy vestnik MGTU GA. *Civil Aviation High Technologies (Nauchnyi Vestnik MGTU GA)*. 2011, no. 171. P. 50–57. (In Russ.).
5. Altshuller G. B. Kvarsevaya stabilizatsiya chastoty [Frequency stabilisation by quartz]. Moscow, 1974. 272 p. (In Russ.).
6. Petrov B. E., Romanyuk V. A. Radioperedayushchiye ustroystva na poluprovodnikovykh priborakh [Radio transmitting devices on semiconductor devices]. Moscow, 1989. 232 p. (In Russ.).
7. Andreyev V. S. Teoriya nelineynykh elektricheskikh tsepey [Theory of non-linear electrical circuits.]. Moscow, 1982. 280 p. (In Russ.).
8. Makarenko V. Problemy modelirovaniya kvartsevykh generatorov v srede NI Multisim [Quartz generator modelling problems in NI Multisim environment] // Modelirovaniye radioelektronnykh ustroystv. *Modelling of Radio Electronic Devices*. 2010. No. 7. P. 43–49. (In Russ.).
9. Malyshev V. V., Nikitin A. B. Modelirovaniye avtogeneratorov v sistemakh avtomatizirovannogo proyektirovaniya [An oscillator designing using cad simulation] // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti Sankt-peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye. *Computing, Telecommunication and Control*. 2016. No. 1 (236). P. 15–22. DOI: 10.5862/JCSTCS.236.2. EDN: VUUBFH. (In Russ.).
10. Brendel R., Gillet D., Ratier N. [et al.]. Nonlinear dipolar modelling of quartz crystal oscillators. 2000. URL: [https://www.researchgate.net/publication/228867063\\_Nonlinear\\_dipolar\\_modelling\\_of\\_quartz\\_crystal\\_oscillators](https://www.researchgate.net/publication/228867063_Nonlinear_dipolar_modelling_of_quartz_crystal_oscillators) (accessed: 15.05.2023). (In Engl.).
11. Addouche M., Brendel R., Gillet D. [et al.]. Modeling of Quartz Crystal Oscillators by Using Nonlinear Dipolar Method // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2003. Vol. 50, no. 5. P. 487–495. DOI: 10.1109/TUFFC.2003.1201461. (In Engl.).
12. Gubarev A. A. Povysheniye effektivnosti modelirovaniya kvartsevykh generatorov v skhemotekhnicheskikh SAPR obshchego naznacheniya [Increase of quartz oscillator modelling efficiency in general-purpose circuit CAD] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2003. No. 2. P. 89–101. (In Russ.).
13. Gubarev A. A., Kosykh A. V., Zavjalov S. A. [et al.]. SPICE simulation of high-Q crystal oscillators: single and dual-mode oscillator analysis // Proc. of the 2003 joint meeting IEEE IFCS and 17th EFTF. 2003. P. 606–614. DOI: 10.1109/FREQ.2003.1275160. (In Engl.).
14. Gehring M. Fast crystal-oscillator-simulation methodology. 2005. URL: [https://designers-guide.org/forum/Attachments/GEHRING\\_-\\_Fast\\_Crystal-Oscillator-Simulation\\_Methodology.pdf](https://designers-guide.org/forum/Attachments/GEHRING_-_Fast_Crystal-Oscillator-Simulation_Methodology.pdf) (accessed: 02.01.2023). (In Engl.).
15. Ratier N., Bruniaux M., Galliou S. [et al.]. A very high speed method to simulate quartz crystal oscillator // 19th European Frequency and Time Forum (EFTF). 2005. URL: [https://www.researchgate.net/publication/29615543\\_A\\_Very\\_High\\_Speed\\_Method\\_to\\_Simulate\\_Quartz\\_Crystal\\_Oscillator](https://www.researchgate.net/publication/29615543_A_Very_High_Speed_Method_to_Simulate_Quartz_Crystal_Oscillator) (accessed: 02.01.2023). (In Engl.).
16. Lyashuk A. N., Zavjalov S. A. Generator na poverkhnostnykh akusticheskikh volnakh s shirokoy perestroykoy po chastote [Surface acoustic wave generator with wide frequency tuning range] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2011. No. 3 (103). P. 300–303. EDN: OPFKAF. (In Russ.).
17. Addouche M., Ratier N., Gillet D. [et al.]. ADOQ: a quartz crystal oscillator simulation software // 2001 IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition. 2001. P. 753–757. DOI: 10.1109/FREQ.2001.956375. (In Engl.).
18. Krylov N. M., Bogolyubov N. N. Simvolicheskiye metody nelineynoy mekhaniki v ikh prilozheniyakh k issledovaniyu rezonansa v elektronnom generatore [Symbolic methods of Nonlinear Mechanics in their application to the study of resonance in the electronic generator] // Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. VII seriya. Otdeleniye matematicheskikh i estestvennykh nauk. *Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Series VII. Class of Mathematical and Natural Sciences*. 1934. Issue. 1. P. 7–34. (In Russ.).
19. Krylov N. M., Bogolyubov N. N. Vvedeniye v nelineynuyu mekhaniku [Introduction to non-linear mechanics]. Kiev, 1937. 364 p. (In Russ.).
20. Rohde U. L. Harmonic Balance Method Handles Nonlinear Microwave CAD Problems // Microwave Journal. 1987. No. 10. P. 203–210. (In Engl.).
21. Gorgadze S. F., Maksimov A. A. Teoriya garmonicheskogo balansa dlya skhemotekhnicheskogo proyektirovaniya [Harmonic balance theory for scheme technical design] // T-Comm: Telekommunikatsii i transport. *T-Comm: Telecommunications and Transport*. 2020. Vol. 14. P. 21–32. DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-11-21-32. EDN: NVPJN. (In Russ.).
22. Specification URL: [https://datasheet.lcsc.com/lcsc/1912111437\\_NDK-EXS00A-CS11019\\_C280829.pdf](https://datasheet.lcsc.com/lcsc/1912111437_NDK-EXS00A-CS11019_C280829.pdf) (accessed: 02.01.2023) (In Russ.).

**LYASHUK Aleksey Nikolayevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Radio Engineering Devices and Diagnostic Systems Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.  
 SPIN-code: 1635-6235  
 AuthorID (RSCI): 742615  
 ORCID: 0000-0002-6394-9390  
 ResearcherID: R-2812-2016  
 Correspondence address: pribor78@mail.ru  
**KOSYKH Anatoliy Vladimirovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of Radio Engineering Devices and Diagnostic Systems Department, OmSTU, Omsk.  
 SPIN-code: 2971-4057  
 AuthorID (SCOPUS): 6701547176  
 ORCID: 0000-0001-6705-4255  
 ResearcherID: G-5127-2013  
 Correspondence address: avkosykh@omgtu.ru

#### For citations

Lyashuk A. N., Kosykh A. V. Temperature compensated crystal oscillator design in Keysight ADS // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 4 (188). P. 132–139. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-132-139.

Received June 20, 2023.

© A. N. Lyashuk, A. V. Kosykh