

РАСЧЁТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМЫ ГЕНЕРАТОРА ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ С КВАРЦЕВЫМ РЕЗОНАТОРОМ

Ю. Ю. Разуваев

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 01.07.2017 г.

Аннотация. Статья посвящена расчёту и моделированию схемы генератора прямоугольных импульсов с кварцевым резонатором, которая широко применяется для тактирования цифровых схем. Рассчитываются коэффициент усиления и выходное сопротивление КМОП-инвертора. Анализируется устойчивость инвертирующего усилителя, охваченного петлёй обратной связи, содержащей кварцевый резонатор. Показано, что резонатор позволяет получить фазовый сдвиг не более $\pm 90^\circ$, поэтому баланс фаз достигается за счёт введения в схему дополнительных ёмкостей. Генерация происходит на частоте между частотами последовательного и параллельного резонансов. Анализируются основные результаты моделирования генератора в САПР Cadence, реализованного в КМОП-технологии 180 нм: зависимость запаса усиления и частоты генератора от температуры.

Ключевые слова: генератор Пирса, кварцевый резонатор, схемотехническое моделирование.

CALCULATION AND SIMULATION OF THE SQUARE-WAVE GENERATOR WITH QUARTZ RESONATOR

Yu. Yu. Razuvaev

Abstract. This paper is dedicated to calculation and simulation of the scheme of square-wave generator with quartz resonator, which is widely used for digital circuits clocking. Gain and output resistance of CMOS-inverter are calculated. Stability of the inverting amplifier with feedback, containing quartz resonator, is analyzed. It was shown, that resonator allows obtaining phase shift no more than $\pm 90^\circ$. That's why additional capacitances are included in the scheme to perform phase balance. Generation frequency is between serial and parallel resonance frequencies. General findings, obtained by a simulation in Cadence CAD of the generator, realized in 180 nm CMOS-technology, are analyzed: temperature influence on gain margin and generation frequency.

Keywords: Pierce generator, quartz resonator, circuit simulation.

ВВЕДЕНИЕ

Схема генератора Пирса [1, 2] с кварцевым резонатором, изображённая на рис. 1, широко применяется для тактирования цифровых схем. В данной статье мы рассмотрим принцип работы этого генератора, рассчитаем коэффициент усиления и выходное сопротивление усилителя, амплитудно- и фазо-частотные характеристики (АЧХ и ФЧХ) цепи обратной связи. Проанализируем результаты моделирования в САПР Cadence генератора Пирса, выполненного по КМОП технологии 180 нм, а именно, температурную стабильность частоты генерации.

КМОП-ИНВЕРТОР В КАЧЕСТВЕ УСИЛИТЕЛЯ

В качестве усилителя в схеме генератора Пирса рис. 1 используется КМОП-инвертор, схема которого изображена на рис. 2а. При увеличении входного напряжения ток насыщения п-канального транзистора увеличивается, а р-канального, наоборот, уменьшается, как показано на рис. 2б. В результате выходное напряжение может изменяться в диапазоне от 0 до напряжения питания $E_{п}$. Если на вход инвертора подать напряжение смещения около $E_{п}/2$, то оба транзистора будут открыты и смогут усиливать входной сигнал по напряжению.

Рассчитаем коэффициент усиления КМОП-инвертора в режиме малого сигнала. N- и р-канальный транзисторы включены последовательно, следовательно через них течёт одинаковый ток:

$$dI_N = S_N dU_{BX} + \frac{dU_{ВЫХ}}{r_N} = -S_P dU_{BX} - \frac{dU_{ВЫХ}}{r_P} \quad (1)$$

Для р-канального транзистора напряжения взяты с отрицательным знаком, потому что рабочие напряжения р-канального транзистора отрицательные.

Из (1) найдём коэффициент усиления:

$$dU_{ВЫХ} \left(\frac{1}{r_N} + \frac{1}{r_P} \right) = -dU_{BX} (S_N + S_P),$$

$$K = -(S_N + S_P) \cdot (r_N || r_P). \quad (2)$$

В идеале комплементарные транзисторы имеют одинаковые параметры, тогда для $S_N = S_P = S$ и $r_N = r_P = r_{СИ}$:

$$K = -S r_{СИ}. \quad (3)$$

Поскольку сопротивление сток-исток транзисторов может быть весьма большим, схема может иметь большой коэффициент усиления. Однако выходное сопротивление тоже будет большим:

$$\frac{dU_{ВЫХ}}{r_N} = -\frac{dU_{ВЫХ}}{r_P} - dI_{ВЫХ},$$

$$r_{ВЫХ} = (r_N || r_P) = \frac{r_{СИ}}{2}. \quad (4)$$

В схеме генератора рис. 1а сопротивление R образует отрицательную обратную связь и обеспечивает автоматическое смещение усилителя. Это сопротивление должно быть достаточно большим (на практике порядка 1 МОм и более), иначе оно будет занижать коэффициент усиления.

СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ КВАРЦЕВОГО РЕЗОНАТОРА

Для моделирования кварцевого резонатора можно использовать эквивалентную схему замещения, представленную на рис. 3 [3, 4]. Это последовательный колебательный контур с большой индуктивностью L_K и очень малой ёмкостью C_K . Некоторые типичные значения параметров схемы замещения приведены в таблице 1 [3]. Если учесть паразитную ёмкость C_P , то в схеме замещения кварцевого резонатора появляется ещё и параллельный колебательный контур.

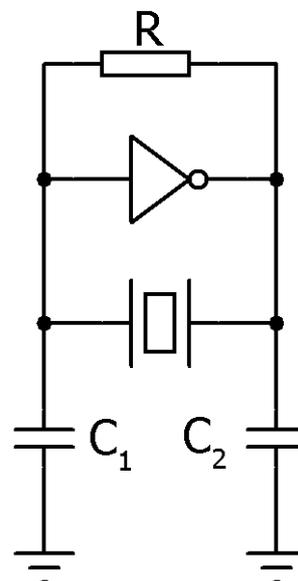


Рис. 1. Схема генератора Пирса

Таблица 1. Параметры схемы замещения кварцевых резонаторов

f, МГц	L_k , мГн	C_k , фФ	r_k , Ом	C_0 , пФ
1	1910	13.3	200	5
10	28.6	8.86	12	4
12	24	7.368	12	4
20	11.94	5.3	10	3.5

Рассчитаем комплексный коэффициент передачи схемы (рис. 3):

$$Z(f) = \left(\frac{1}{Z_{C_0}(f)} + \frac{1}{r_K + Z_{L_k}(f) + Z_{C_k}(f)} \right)^{-1} \quad (5)$$

АЧХ и ФЧХ схемы рис. 3 с параметрами для 10 МГц кварцевого резонатора изображены на рис. 4а и рис. 4б соответственно. В окрестности номинальной частоты 10 МГц можно наблюдать две резонансные частоты, определяемые параметрами последовательного и параллельного колебательных контуров:

$$f_{\text{посл}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_k C_k}} \approx 9.998 \text{ МГц}, \quad (6)$$

$$f_{\text{пар}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_k \left(\frac{1}{C_k} + \frac{1}{C_0} \right)^{-1}}} \approx 10.009 \text{ МГц}. \quad (7)$$

В области между этими частотами кварцевый резонатор поворачивает фазу на $+90^\circ$, т. е. ведёт себя как индуктивность, а вне этой области, поворачивает фазу на -90° , т. е. ведёт себя как ёмкость. При этом сопротивление резонатора в области частот между последовательным и параллельным резонансами изменяется на несколько порядков.

Для возбуждения усилителя рис. 1 необходима положительная обратная связь, которая поворачивала бы фазу на 180° . Очевидно, что один только кварцевый резонатор не сможет обеспечить такой поворот фазы. Поэтому в схему дополнительно вводятся конденсаторы C_1 и C_2 . Без них генератор может заработать, только если его ФЧХ обеспечит дополнительный сдвиг фазы на -90° в области резонансов, и если при этом будет достаточно большой коэффициент усиления.

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ СХЕМЫ ГЕНЕРАТОРА

Предположим, что усилитель идеальный, имеет единичный коэффициент усиления, бесконечно большое входное сопротивление и выходное сопротивление $r_{\text{ВЫХ}}$. Ёмкости C_1 и C_2 , как правило, берутся одинаковыми. Введём обозначение $C_1 = C_2 = C_{12}$ и рассчитаем коэффициент петлевого усиления. Коэффициент передачи усилителя с учётом нагрузки, которую создаёт обратная связь:

$$K_y(f) = \frac{Z_1(f)}{r_{\text{вых}} + Z_1(f)}, \quad (8)$$

где

$$Z_1(f) = \left(\frac{1}{Z_{C_{12}}(f)} + \frac{1}{Z_2(f) + Z_{C_{12}}(f)} \right)^{-1},$$

$$Z_2(f) = \left(\frac{1}{Z(f)} + \frac{1}{R} \right)^{-1},$$

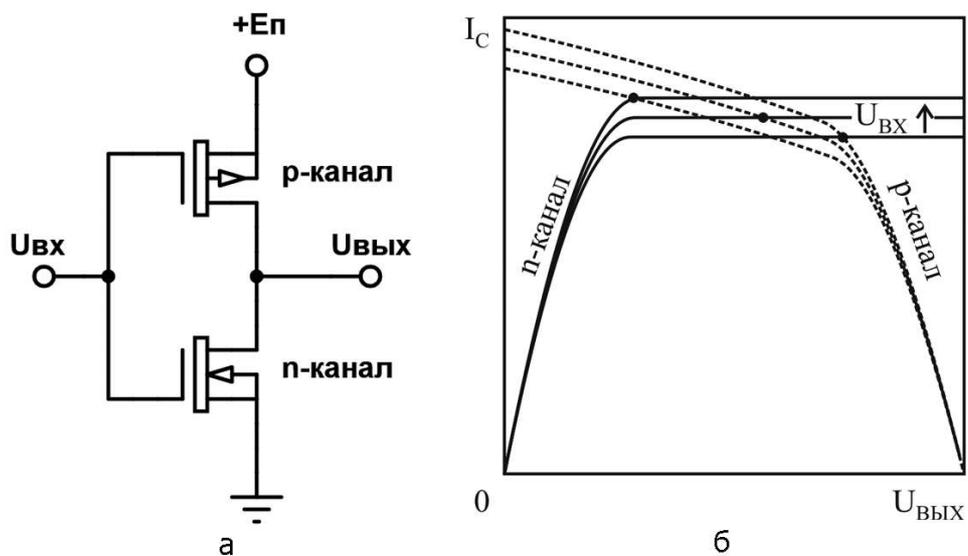


Рис. 2. Схема усилителя (а) и передаточные ВАХ транзисторов (б)

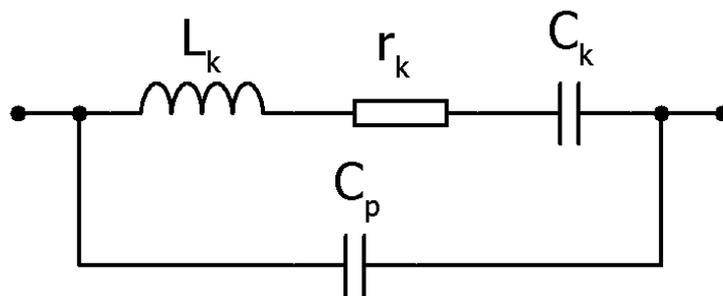


Рис. 3. Схема замещения кварцевого резонатора

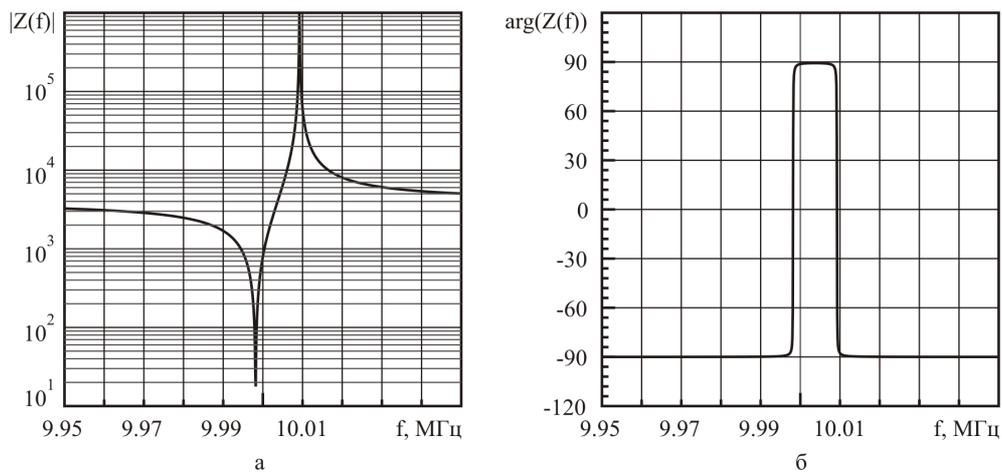


Рис. 4. АЧХ (а) и ФЧХ (б) схемы замещения кварцевого резонатора

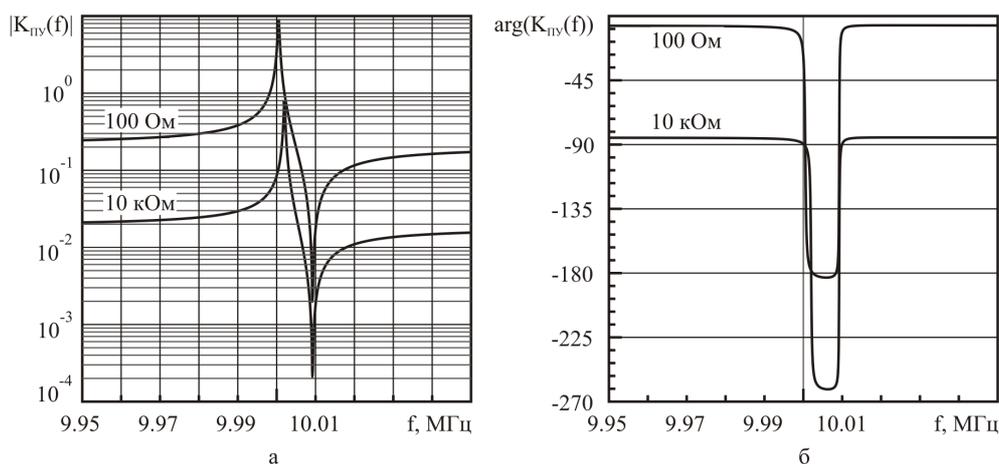


Рис. 5. АЧХ (а) и ФЧХ (б) петли обратной связи для единичного коэффициента усиления усилителя и двух значений $r_{\text{ВЫХ}}$ 100 Ом и 10 кОм с $C_1 = C_2 = 15$ пФ

$Z(f)$ определяется формулой (5). Коэффициент петлевого усиления:

$$K_{\text{ПУ}}(f) = K_{\text{У}}(f) \frac{Z_{C12}(f)}{Z_2(f) + Z_{C12}(f)}. \quad (9)$$

На рис. 5 представлены графики модуля и аргумента коэффициента петлевого усиления (9) для $r_{\text{ВЫХ}} = 100$ Ом и $r_{\text{ВЫХ}} = 10$ кОм при типичном значении ёмкостей $C_1 = C_2 = 15$ пФ. Видно, что чем меньше выходное сопротивление усилителя, тем больше коэффициент петлевого усиления и меньше фазовый сдвиг. Однако в области частот между последовательным и параллельным резонансами фазовый сдвиг в цепи обратной связи достигает 180° , что при достаточно большом коэффициенте усиления обеспечивает возбуждение усилителя и генерацию тактового сигнала на частоте, близкой к номинальной частоте кварцевого резонатора.

ЗАВИСИМОСТЬ ЧАСТОТЫ ГЕНЕРАЦИИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

В САПР Cadence была спроектирована схема кварцевого генератора с усилителем, выполненным по КМОП-технологии 180 нм по схеме рис. 2а, и внешним кварцевым резонатором. Для моделирования кварцевого резонатора применялась идеализированная схема замещения рис. 3. Средствами встроенного в Cadence анализа устойчивости (STB-анализ) была проанализирована температурная стабильность генератора. Поскольку температурный дрейф параметров кварцевого резонатора не учитывался, стабильность генератора определялась только температурными изменениями АЧХ и ФЧХ усилителя.

STB-анализ позволяет рассчитывать коэффициент петлевого усиления. По рассчитанным АЧХ и ФЧХ можно вычислить частоту генерации. Для этого требуется найти точку пересечения ФЧХ петли обратной связи с уровнем 0° (или, точнее, 360°). По АЧХ для найденного значения частоты генерации определяется запас усиления. Поскольку коэффициент усиления зависит от температуры, необходимо иметь запас усиления $K_{\text{ПУ}} \gg 1$, чтобы гарантировать работоспособность генератора.

На рис. 6 представлены зависимости коэффициента петлевого усиления от частоты, полученные с помощью STB-анализа, для кварцевых резонаторов на 11 МГц и 20 МГц при температурах -40°C , 27°C и 125°C . Видно, что усиление сильно зависит от температуры и частоты. Температурный сдвиг фазочастотных характеристик приводит к сдвигу частоты генерации, как показано в таблице 2.

Чем выше частота генерации, тем, очевидно, меньше запас усиления усилителя. Поэтому

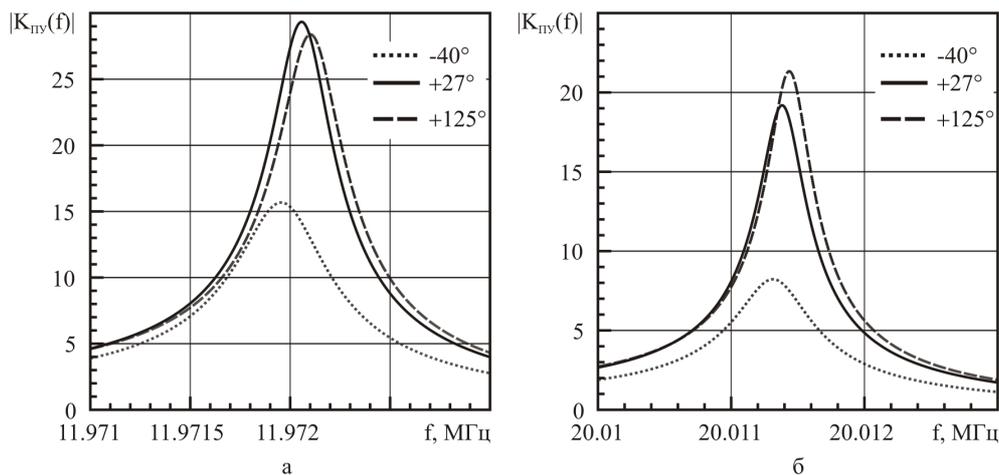


Рис. 6. Петлевое усиление для кварцевых резонаторов на 11 МГц (а) и 20 МГц (б) для трёх значений температур: -40°C , 27°C и 125°C

Таблица 2. Результаты расчёта частоты генерации и запаса усиления

Температура, $^{\circ}\text{C}$	Резонатор на 12 МГц		Резонатор на 20 МГц	
	$f_{\text{ген}}$, МГц	Запас усиления	$f_{\text{ген}}$, МГц	Запас усиления
-40	11.971867	14.550	20.011117	6.738
27	11.972045	29.233	20.011344	18.736
125	11.972106	28.373	20.011428	21.307

при проектировании универсальных генераторов нередко вводят в схему несколько усилителей, рассчитанных на работу в определённых частотных полосах. Для улучшения стабильности частоты генерации целесообразно применение систем автоматического регулирования усиления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был детально проанализирован принцип работы генератора Пирса с кварцевой стабилизацией частоты. Было показано, что инвертор КМОП-логики может использоваться в качестве инвертирующего усилителя. Причём обратная связь в виде высокоомного сопротивления обеспечивает автоматическое смещение рабочей точки данного усилителя. Кварцевый резонатор имеет две резонансные частоты, поскольку его эквивалентная схема замещения содержит последовательный колебательный контур и параллельный, возникающий за счёт паразитной ёмкости между выводами резонатора. Генерация происходит на частоте, находящейся между этими резонансными частотами. Она зависит от ФЧХ усилителя и цепи обратной связи. Для повышения точности задания частоты необходимо, чтобы разница между резонансными частотами была как можно меньше, и чтобы фазочастотные характеристики усилителя слабо менялись при изменении температуры.

Ошибочным является предположение, что одного лишь кварцевого резонатора в цепи обратной связи достаточно, чтобы возникла генерация. Поскольку кварцевый резонатор может повернуть фазу только лишь на 90° , требуются дополнительные элементы в цепи обратной связи, дающие дополнительный фазовый сдвиг. В качестве таких элементов используют дополнительные конденсаторы, подключаемые между выводами резонатора и «землёй».

В результате схемотехнического моделирования схемы генератора в пакете Cadence было показано, что частота генерации и запас усиления сильно зависят от температуры. Поэтому рассмотренный вариант схемы генератора Пирса является довольно простым и эффективным

решением, но для получения высокой стабильности частоты требуется усовершенствование этой схемы, например, за счёт введения системы автоматической регулировки усиления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hague, M. Use of the CMOS Unbuffered Inverter in Oscillator Circuits / M. Hague, E. Cox // Appl. Report of Texas Instrum. SZZA043. — January 2004. — P. 1–25.
2. Колесников, Д. В. Схемотехника высокочастотного кварцевого генератора в элементной базе КМОП 0,18 мкм / Д. В. Колесников, П. А. Кондратович, Е. Н. Бормонтов // Известия вузов. Электроника. — 2014. — № 1. — С. 45–50.
3. Разевиг, В. Д. Применение программ P-CAD и PSpice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ. Выпуск 2 : Модели компонентов аналоговых устройств / В. Д. Разевиг. — Москва : Радио и связь, 1992. — 64 с.
4. Макаренко, В. Проблемы моделирования кварцевых генераторов в среде NI MULTISIM / В. Макаренко // Электронные компоненты и системы. — 2010. — № 7. — С. 43–49.

REFERENCES

1. Hague M., Cox E. Use of the CMOS Unbuffered Inverter in Oscillator Circuits. Appl. Report of Texas Instrum. SZZA043, January 2004, pp. 1–25.
2. Kolesnikov D.V., Kondratovich P.A., Bormontov E.N. The schematics of high-frequency quartz generator in CMOS 0,18 um process. [Kolesnikov D.V., Kondratovich P.A., Bormontov E.N. Shemotekhnika visokochastotnogo qartzevogo generatora v elementnoy base КМОП 0,18 mkm]. *Izvestiya vusov. Electronica — High school proceedings. Electronics*, 2014, no. 1, pp. 45–50.
3. Razevig V.D. P-CAD and PSpice software application for circuit simulation on personal computer. Issue 2: Components models of analog devices. [Razevig V.D. Primenenie program P-CAD i PSpice dlya shemotekhnicheskoho modelirovaniya na PEVM. Vipusk 2: Modeli componentov analogovih ystroistv]. Moscow: Radio and communication, 1992, 64 p.
4. Makarenko V. Simulation problems of quartz generators in NI MULTISIM CAD. [Makarenko V. Problemy modelirovaniya qartzevih generatorov v srede NI MULTISIM]. *Electronnie komponenty i systemy — Electronic components and systems*, 2010, no. 7, pp. 43–49.

Разуваев Юрий Юрьевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия
E-mail: RazuvaevYY@mail.ru
Тел.: +7 (473)220-82-84

Razuvaev Yury Yuryevich, PhD, associated professor of physics, department of electronics, faculty of physics at Voronezh State University, Voronezh, Russia
E-mail: RazuvaevYY@mail.ru
Tel.: +7 (473)220-82-84