

МИКРОСХЕМА МЭМС ГЕНЕРАТОРА ОПОРНОЙ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ ТРАНСИМПЕДАНСНОГО УСИЛИТЕЛЯ

К.В. Мурасов

В статье представлены результаты разработки микросхемы МЭМС генератора на основе кремний - германиевой технологии с топологическими нормами 0,25 мкм. Схема генератора основана на трансимпедансном усилителе с дифференциальными входом и выходом, охваченным петлями положительной и отрицательной обратной связи. Применение системы автоматической регулировки размаха выходного сигнала генератора, позволяет обеспечить оптимальный режим работы усилителя. Система активной компенсации искажений позволяет решить проблему загрязненного высшими гармониками сигнала обратной связи.

Ключевые слова: трансимпедансный усилитель, МЭМС резонатор, компаратор, фазовые шумы, источник опорного тока, источник опорного напряжения, управляемое сопротивление.

ВВЕДЕНИЕ

Источник опорных колебаний является важнейшим узлом многих радиотехнических устройств, используемых для радиосвязи, сотовой телефонии, систем навигации, беспроводных сетей передачи данных, спутниковой связи и т.д., на основе которого формируется несущая частота канала связи. В различных вычислительных системах важным элементом является источник синхронизирующих импульсов, обеспечивающий стабильную работу микропроцессорных ядер, запоминающих устройств и т.д. Все большее развитие получает радиочастотная идентификация, где основным требованием является минимальное энергопотребление радиочастотной метки. В настоящее время основную долю рынка источников опорных колебаний занимают кварцевые генераторы.

Принципы создания новых устройств, в частности миниатюризация и уменьшение потребляемой мощности, обостряют проблему несовместимости технологических процессов производства кварцевых резонаторов и интегральных микросхем, невозможность создания систем на кристалле, содержащих стабильный источник опорных колебаний. Проблемы снижения энергопотребления кварцевого резонатора и уменьшения габаритных размеров кварцевых генераторов способствуют их постепенному замещению генераторами на основе микро электромеханических (МЭМС) резонаторов. Неоспоримым преимуществом МЭМС генераторов является стойкость к механическим вибрациям и ударам силой в десятки тысяч g, гарантирующая работоспособность систем передачи данных

в экстремальных ситуациях и специфических применениях, когда кварцевые генераторы выходят из строя. Отсутствие отечественных наработок в направлении МЭМС генераторов является существенной проблемой. Исследование направлено на разработку микросхемы МЭМС генератора методами компьютерного моделирования.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для анализа генераторов с МЭМС резонаторами, МЭМС заменяется эквивалентной RLC схемой. На рис.1 представлен чертеж I – образного резонатора с паразитными параметрами и эквивалентной схемой в поперечном сечении [1].

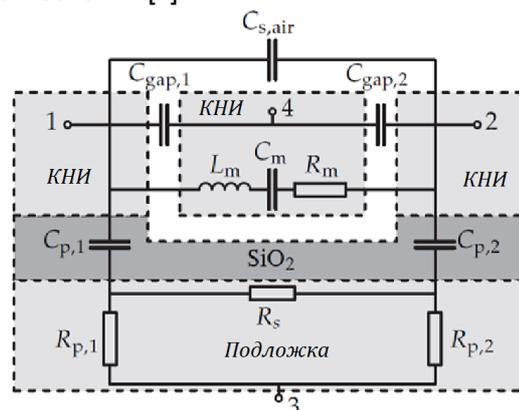


Рисунок 1 – Эквивалентная схема I – образного МЭМС резонатора

Терминалы 1 и 2 являются входным и выходным портами резонатора, терминалы 3 и 4 применяются для заземления резонатора. Cgap1 и Cgap2 – емкости зазоров между резонаторами и электродами. Cp1, Cp2 - емко-

МИКРОСХЕМА МЭМС ГЕНЕРАТОРА ОПОРНОЙ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ ТРАНСИМПЕДАНСНОГО УСИЛИТЕЛЯ

сти между подложкой и электродами, через слой оксида кремния. КНИ – кремний на изоляторе. C_s – емкостная связь между электродами. $L_m C_m R_m$ - эквивалент резонатора.

Передаточная характеристика модели резонатора может быть описана выражением:

$$H(S) = \frac{R_{load} S}{L_m S^2 + (R_m + R_{load}) S + \frac{1}{C_m}}$$

Ввиду большого сопротивления R_m , величиной в сотни и тысячи Ом, характерного для МЭМС резонаторов, типовые схемы генераторов, применяемые для кварцевых резонаторов, величина сопротивления R_m для которых составляет единицы и десятки Ом, не обеспечивают требуемого усиления для компенсации рассеиваемой в резонаторе. Одним из вариантов решения описанной проблемы является использование усилителей с большим коэффициентом усиления [2, 3], что обеспечивает компенсацию потерь в резонаторе. На рис. 2 показана структурная схема генератора на трансимпедансном усилителе.

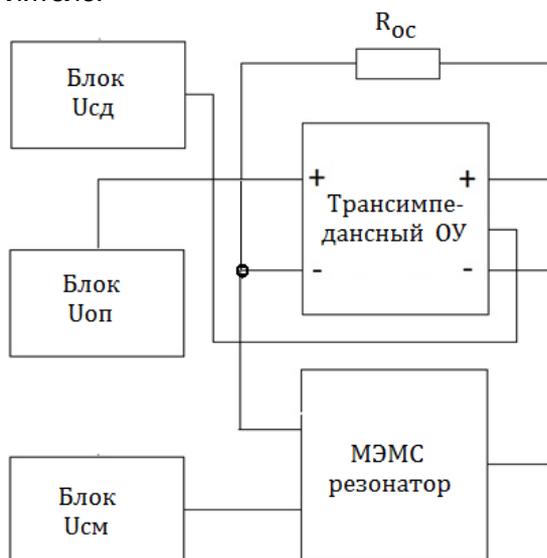


Рисунок 2 – Структурная схема генератора на трансимпедансном усилителе

Блок Усд формирует напряжение середины диапазона выходного напряжения трансимпедансного усилителя. Блок Уоп формирует постоянное напряжение смещения неинвертирующего входа усилителя. Блок Усм формирует постоянное напряжение смещения для МЭМС резонатора. Для проведения анализа во временной области были установлены

ны начальные условия, отметим, что вместо начальных условий возможно применение импульсного воздействия или включения питания в момент времени, отличный от нуля. Однако указанные методы непригодны для проведения серии анализов Periodic steady state (PSS), при котором система воспринимает источники импульсного воздействия в качестве источников исследуемого сигнала.

На рис. 3 представлены результаты малосигнального анализа модели резонатора.

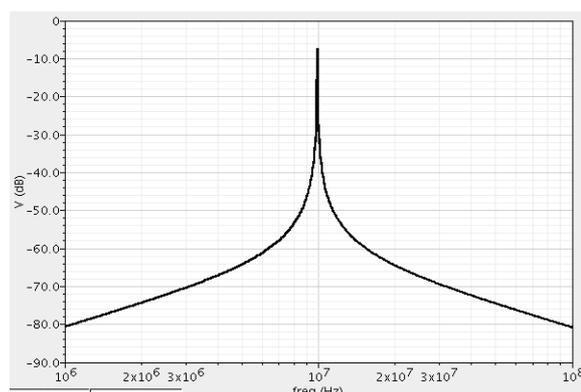


Рисунок 3 – Результаты малосигнального анализа модели резонатора

На рис. 4 приведены результаты моделирования МЭМС генератора во временной области.

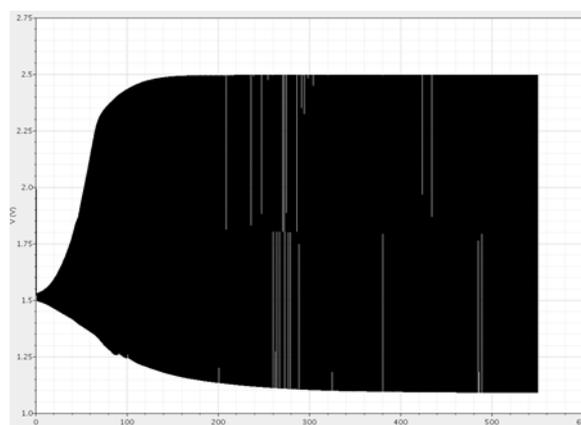


Рисунок 4 – Результаты анализа МЭМС генератора во временной области

Из рисунка видно, что выходной сигнал возрастает до напряжения питания сверху и минимально возможного снизу, ограничиваемого рабочим напряжением синфазной обратной связи усилителя. Что негативно сказывается на работе усилителя. Для удержания уровня выходного сигнала в допустимых пределах, без перегрузки усилителя структурная схема была модернизирована (рис. 5).

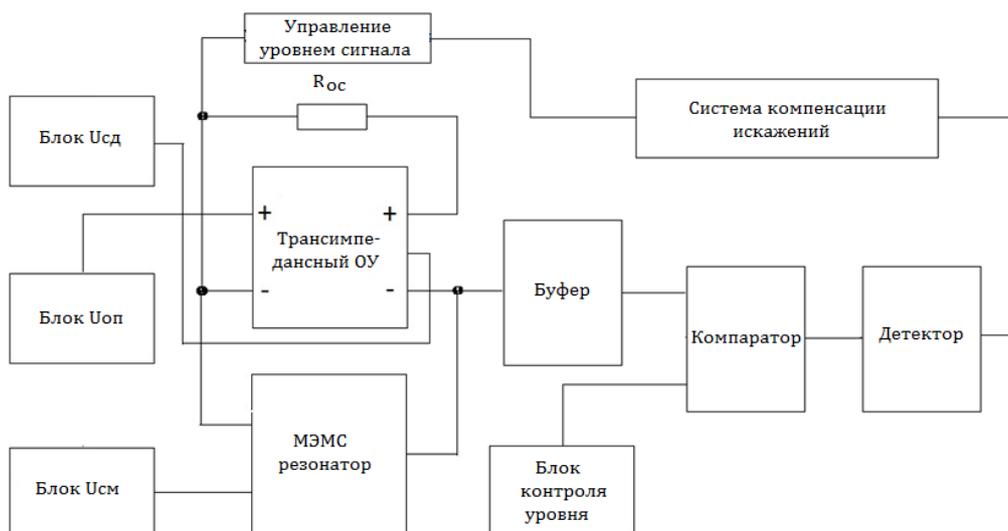


Рисунок 5 – Структурная схема МЭМС генератора на трансимпедансном усилителе с контролем уровня выходного сигнала

По сравнению со схемой на рис. 2 добавлены следующие блоки: блок контроля уровня, задающий размах выходного сигнала генератора, компаратор, буфер, детектор, система компенсации искажений и блок управления уровнем сигнала генератора, обеспечивающий регулировку глубины отрицательной обратной связи, охватывающей усилитель. На рис. 6 представлена схема электрическая

принципиальная МЭМС генератора, за исключением блоков опорных токов и напряжений. Усилитель основан на дифференциальной паре транзисторов N8, N10, нагруженных активной нагрузкой на транзисторах P7, P8. Синфазная обратная связь, необходимая для установки выходного напряжения в середину

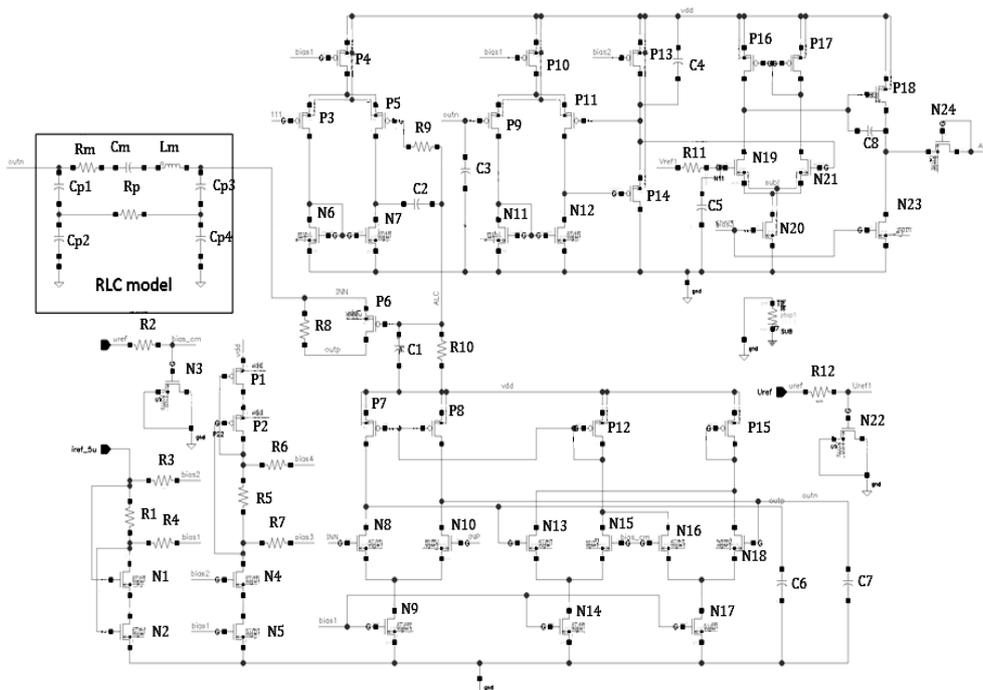


Рисунок 6 – Схема электрическая принципиальная МЭМС генератора на трансимпедансном усилителе с контролем уровня выходного сигнала

МИКРОСХЕМА МЭМС ГЕНЕРАТОРА ОПОРНОЙ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ ТРАНСИМПЕДАНСНОГО УСИЛИТЕЛЯ

диапазона выходного сигнала, основана на двух дифференциальных каскадах N13, N15 и N16, N18, с диодной нагрузкой на транзисторах в диодном включении P12, P15. Токи через дифференциальные каскады усилителя и синфазной обратной связи задаются источниками токов на транзисторах N9, N14, N17, масштабирование позволяет получить необходимое соотношение токов в дифференциальном каскаде усилителя и каскадах синфазной обратной связи. Синфазная обратная связь производит выравнивание токов через диоды P15 и P12, падение напряжения на котором является управляющим для активной нагрузки P7, P8. Таким образом, синфазное напряжение на выходе усилителя удерживается близким к напряжению на затворах транзисторов N15, N16. Буфер основан на дифференциальном каскаде P9, P11, нагруженном на токовое зеркало N11, N12, и истоковом повторителе P14, P13. Компаратор включает в себя дифференциальный каскад N19, N21, нагруженный токовым зеркалом P16, P17 и выходной буфер на инверторе N23, P18. Детектор выполнен на цепочке N24, C1, R10. Система компенсации искажений, основанная на дифференциальном усилителе P3, P5, N6, N7, связанная через конденсатор C2 с выходом детектора, существенно

подавляет биения после детектора. Глубина отрицательной обратной связи регулируется транзистором P6. На рис. 7 представлены результаты анализа схемы во временной области

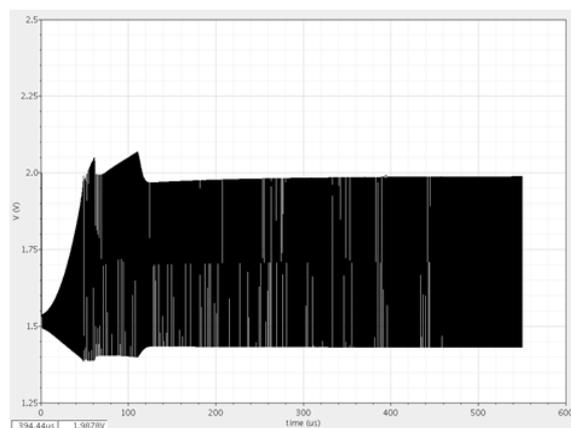


Рисунок 7 – Результаты анализа МЭМС генератора с работающей системой контроля уровня сигнала во временной области

Время стабилизации колебаний не превышает 130 мкс. Форма колебаний близка к синусоидальной. На рис. 8 приведены характеристики фазовых шумов при различных уровнях выходного сигнала.

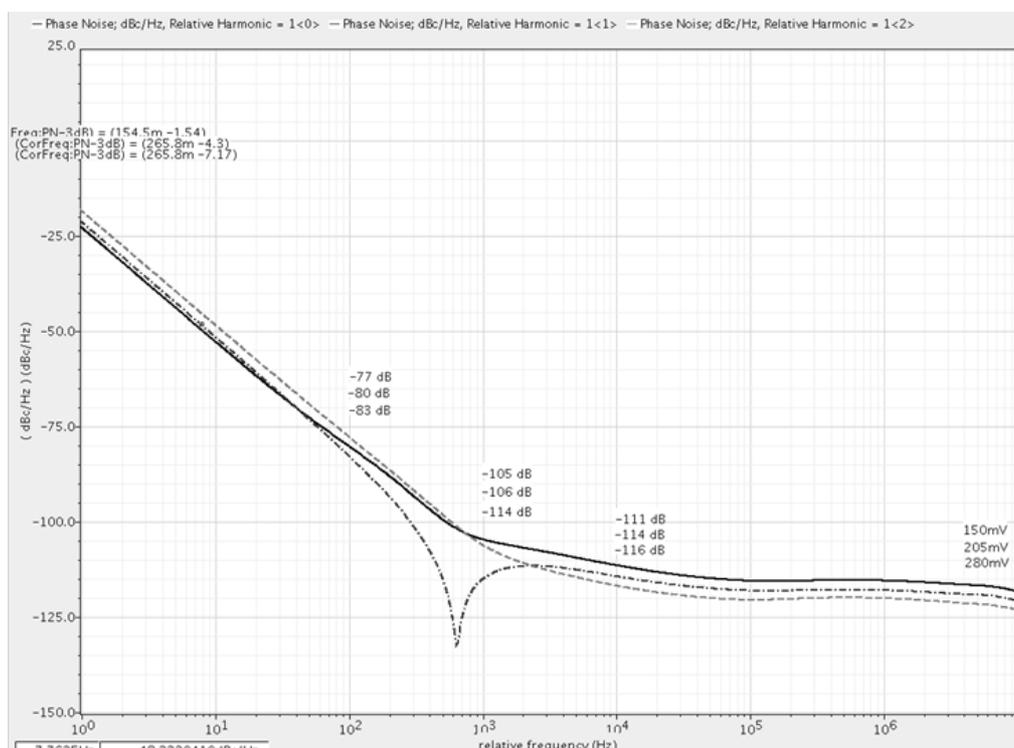


Рисунок 8 – Фазовые шумы для различных амплитуд выходного сигнала МЭМС генератора

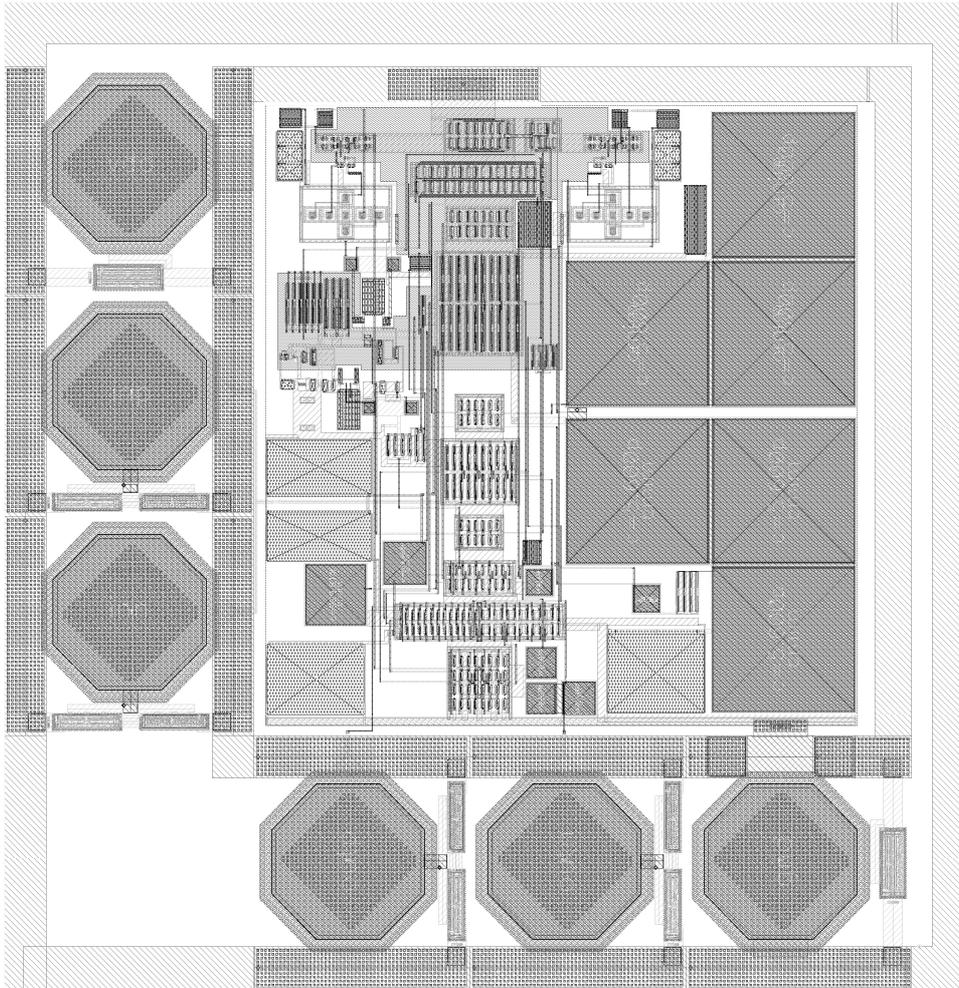


Рисунок 9 – Топология микросхемы МЭМС генератора на основе трансимпедансного усилителя

Топология разработанной микросхемы приведена на рис. 9. Для минимизации уходов в процессе производства микросхемы применены методы согласования транзисторов, входящих в состав дифференциальных пар и источников тока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная структура генератора на основе трансимпедансного усилителя может быть использована как в качестве источника опорных колебаний при разработке систем на кристалле, так и в качестве отдельной микросхемы. В то же время дополнительное исследование требует проблема снижения уровня фазовых шумов, вносимых системой контроля уровня выходного сигнала

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J.T.M van Beek, Thibaut Guilloteau. Technical Note PR-TN-2004/00659, Sub-micron gap MEMS resonators for RF applications. September 2004.
2. Lavasani, S. Design and phase-noise modeling of temperature-compensated high frequency MEMS-CMOS reference oscillators / Seyed Hossein Miri Lavasani // Ph. D. Thesis, Georgia Institute of Technology, 2010. - 239 p.
3. Razavi, B. RF Microelectronics / Behzad Razavi. – New York : Prentice Hall, 2011. – 916 p.

Мурасов Константин Владимирович
– к.т.н., с.н.с. кафедры радиотехнических устройств и систем диагностики Омского государственного технического университета, (3812)652-598