

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МНОГОЧАСТОТНОЙ ПЬЕЗОРЕЗОНАНСНОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С ВНЕШНИМ ЁМКОСТНЫМ МЭМС УПРАВЛЕНИЕМ

Разработана адекватная математическая модель управляемой пьезорезонансной колебательной системы с внешним ёмкостным микроэлектромеханическим управлением. Сформулированы рекомендации по оптимизации характеристик управления генератора.

Ключевые слова: математическая модель, пьезорезонансная колебательная система, ёмкостное МЭМС управление.

A.A.Taranchuk, S.K. Pidchenko, R.P. Hoptinskiy,
Khmelnytskyi National University

A MATHEMATICAL MODEL OF A MULTI-FREQUENCY PZOREZONANSNOY VIBRATING SYSTEM WITH AN EXTERNAL CAPACITIVE MEMS CONTROL

The adequate mathematical model of controlled of the piezoresonance oscillating system is worked out with an external capacity MEMS control. The recommendations concerning the optimization of oscillator control characteristics are given.

Keywords: mathematical model, piezoresonance oscillating system, capacity MEMS control

Введение

Управляемость генерируемых колебаний - одна из самых важных характеристик пьезорезонансных колебательных систем, которые находят всё более широкое применение как в системах телекоммуникаций, где они традиционно используются для формирования высокостабильных сигналов и их обработки. При этом присутствуют две задачи управления: первая – обеспечение инвариантности частоты генерации по отношению к воздействию дестабилизирующих факторов (минимизация управляемости), что характерно для генераторов опорных сигналов и кварцевых фильтров; вторая – обеспечение заданной характеристики управления (кварцевые ЧМ – модуляторы). Особое значение характеристики управляемости приобретают при многочастотном возбуждении кварцевого резонатора, где, в подавляющем большинстве случаев, возникает необходимость одновременного решения двух задач: обеспечение инвариантности по отношению к одной частоте и формирование необходимой характеристики управления по отношению к другой. Перспективным на сегодняшний день является применение управляемых пьезорезонансных колебательных систем с внешним ёмкостным микроэлектромеханическим управлением (МЭМС) при решении задач управления в многочастотных генераторах [1-9].

Цель работы – разработка адекватной математической модели управляемой пьезорезонансной колебательной системы с внешним ёмкостным микроэлектромеханическим управлением (МЭМС), позволяющей оптимизировать характеристики управления кварцевых генераторов с произвольным количеством генерируемых частот.

1. Математическая модель управляемой пьезорезонансной колебательной системы

В качестве базовой используем обобщённую схему многочастотного кварцевого генератора (МКГ), к которой, прямо или косвенно, могут быть приведены все известные схемы МКГ [1,2,6]. Тогда, в соответствии с [6], обобщенная управляемая пьезорезонансная колебательная система (ОУПКС) (рис. 1) будет содержать m параллельных ветвей последовательного резонанса по количеству генерируемых частот, где каждая j -тая ветвь ($j = \overline{1, n}$) определяет динамические параметры L_{qj} , C_{qj} , R_{qj} многочастотного кварцевого резонатора (МКР) и эквивалентное сопротивление элемента управления z_{yj} для j -той частоты генерации, параллельную ёмкость МКР C_0 и дополнительную (паразитную) ёмкость $C_{0Д}$, а также комплексные эквивалентные сопротивления $z_{\Sigma_{вых}}$ и $z_{\Sigma_{вх}}$, учитывающие суммарное выходное сопротивление источников возбуждающих ОУПКС и суммарное входное сопротивление фильтрующих звеньев обратной связи.

Комплексное эквивалентное сопротивление ОУПКС для j -той частоты ω_j в соответствии с рис. 1 определяется как

$$z_{эj} = \frac{(z_{мкрj} + z_{yj}) \cdot z_{0Д}}{z_{мкрj} + z_{yj} + z_{0Д}} + z_{вн}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где $z_{\text{мкр}j} = \frac{(w_j^2 L_{qj} C_{qj} - 1) - jw_j C_{qj} R_{qj}}{w_j^2 C_{qj} C_{o} R_{qj} - -jw_j (C_o + C_{qj} - w_j^2 L_{qj} C_{qj} C_o)}$, $z_{0Д} = 1/jw_j C_{0Д}$ и $z_{yj} = 1/jw_j C_{yj}$ - эквивалентные сопротивления МКР, дополнительной ёмкости $C_{0Д}$ и элемента управления для j -той частоты колебаний;

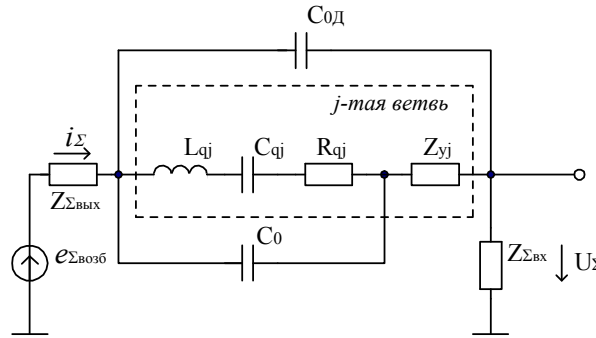


Рис. 1. Эквивалентная схема ОУПКС:

L_{qj} , C_{qj} , R_{qj} и z_{yj} - параметры динамической ветви МКР и элемента управления для j -той частоты; C_0 и $C_{0Д}$ - параллельная ёмкость МКР и дополнительная ёмкость; $z_{\Sigma \text{вых}}$ и $z_{\Sigma \text{вх}}$ - эквивалентные сопротивления присоединяемых цепей; $e_{\Sigma \text{возб}}$ - источник возбуждения

$z_{\text{вн}} = \frac{R_{\text{вн}}}{1 + jw_j C_{\text{вн}} R_{\text{вн}}}$, $R_{\text{вн}} = R_{\Sigma \text{вх}} + R_{\Sigma \text{вых}}$, $C_{\text{вн}} = \frac{C_{\Sigma \text{вх}} C_{\Sigma \text{вых}}}{(C_{\Sigma \text{вх}} + C_{\Sigma \text{вых}})}$ - эквивалентные вносимые сопротивления и ёмкость присоединённых к МКР цепей.

После ряда преобразований эквивалентное сопротивление (1) приводится к виду

$$z_{\text{э}j} = \frac{A_j + jB_j}{C_j + jD_j}, \quad (2)$$

где $A_j = -w_j \cdot T_{\text{вн}} \cdot (\gamma_1 \cdot (\delta_j^2 P_j - s_j) + k_j \cdot (\delta_j^2 - M_j) - \eta_{qj} P_j / T_{\text{вн}})$; $B_j = -P_j \cdot (\delta_j^2 + w_j^2 \eta_{qj} T_{\text{вн}} \gamma_1) + s_j$; $C_j = w_j \cdot (C_{0Д} \cdot (\delta_j^2 P_j - s_j) + C_{yj} \cdot (\delta_j^2 - M_j) + w_j^2 \eta_{qj} T_{\text{вн}} \cdot (P_j C_{0Д} + C_{yj} / R_{qj}))$; $D_j = w_j^2 \cdot (T_{\text{вн}} \cdot (C_{0Д} \cdot (\delta_j^2 P_j - s_j) + C_{yj} \cdot (\delta_j^2 - M_j)) + \eta_{qj} \cdot (P_j C_{0Д} + C_{yj} / R_{qj}))$.

Здесь приняты следующие обозначения:

$\delta_j = \frac{w_j}{W_{qj}}$ - мера расстройки рабочей частоты w_j ОУПКС относительно j -той собственной резонансной частоты МКР $W_{qj} = (L_{qj} C_{qj})^{0.5}$; $\eta_{qj} = R_{qj} C_{qj}$, $T_{\text{вн}} = R_{\text{вн}} C_{\text{вн}}$ - постоянные времени;

$M_j = m_j + 1$; $P_j = p_j + 1$; $s_j = 1 + m_j + p_j$, где $m_j = C_{qj} / C_o$, $k_j = C_{yj} / C_{\text{вн}}$, $p_j = C_{yj} / C_o$ - ёмкостные соотношения; $\gamma_1 = 1 + \frac{C_{0Д}}{C_{\text{вн}}}$ - приведенное значение дополнительной ёмкости $C_{0Д}$.

Приравнивая мнимую часть (2) к нулю ($B_j C_j - A_j D_j = 0$), получим уравнение относительно частоты w_j , позволяющее определить резонансные частоты ОУПКС:

$$a_{6j} \cdot w_j^6 + a_{4j} \cdot w_j^4 + a_{2j} \cdot w_j^2 + a_{0j} = 0, \quad (3)$$

где $a_{6j} = \frac{T_{\text{вн}}^2}{W_{qj}^2} \cdot (P_j C_{0Д} + C_{yj}) \cdot (P_j \gamma_1 + k_j)$;

$$a_{4j} = -2 T_{\text{вн}}^2 \cdot \left(s_j P_j C_{0Д} \gamma_1 + C_{yj} \cdot \left(\left(s_j + \frac{m_j p_j}{2} \right) \cdot \gamma_2 + k_j M_j \right) \right) + \frac{P_j}{W_{qj}^2} \cdot (P_j C_{0Д} + C_{yj});$$

$$a_{2j} = T_{\text{вн}}^2 W_{qj}^2 \cdot \left(s_j^2 C_{0Д} \gamma_1 + C_{yj} M_j \cdot (k_j M_j + s_j \gamma_2) \right) - 2 \cdot \left(s_j P_j C_{0Д} + C_{yj} \left(s_j + \frac{p_j m_j}{2} \right) \right);$$

$$a_{0j} = C_{\Sigma j} W_{qj}^2 \cdot \left(s_j \cdot \frac{C_{0Д}}{C_0} + M_j p_j \right); C_{\Sigma j} = C_{qj} + C_o + C_{yj}; \gamma_2 = 1 + \frac{2C_{0Д}}{C_{вн}}.$$

Коэффициенты $a_{0j} \dots a_{6j}$ уравнения (3) получены при условии $Q_{0j} > 10^3$, где $Q_{0j} = \frac{1}{W_{qj} C_{qj} R_{qj}}$ -

добротность ненагруженного МКР для j -той собственной резонансной частоты W_{qj} , что справедливо для большинства типов кварцевых резонаторов.

Выражения (2) позволяют определить основные характеристики ОУПКС: эквивалентные сопротивления последовательного и параллельного резонансов (ESR и EPR)

$$ESR_j = \Phi(w) \Big|_{w=w_j^r} \text{ и } EPR_j = \Phi(w) \Big|_{w=w_j^a}, \quad (4)$$

где $\Phi(w) = \frac{A_j(w) \cdot C_j(w) + B_j(w) \cdot D_j(w)}{(C_j(w))^2 + (D_j(w))^2}$; w_j^r , w_j^a - частоты последовательного и параллельного

резонансов, а также фиксирующую способность σ_j и эквивалентную добротность $Q_{\Sigma j}$

$$\sigma_j = 2Q_{\Sigma j} = w_j \cdot \left| \frac{d\phi_j(w)}{dw} \right|_{w=w_j}, \quad (5)$$

$$\left| \frac{d\phi_j(w)}{dw} \right| = \left| \frac{A_j(w) \cdot \frac{dB_j(w)}{dw} - B_j(w) \cdot \frac{dA_j(w)}{dw}}{(A_j(w))^2 + (B_j(w))^2} - \frac{C_j(w) \cdot \frac{dD_j(w)}{dw} - D_j(w) \cdot \frac{dC_j(w)}{dw}}{(C_j(w))^2 + (D_j(w))^2} \right| - \text{крутизна}$$

фазочастотной характеристики ОУПКС для частоты w [6].

2. Особенности МЭМС управления многочастотной колебательной системой

В качестве элемента управления z_{yj} в модели на рис.1 в работе предлагается применить управляемый высокочастотный микроконденсатор - двухэлектродный MEMS-КУН с электростатическим управлением. Конструкция, функциональная модель и градуировочная характеристика простейшего двухэлектродного MEMS-КУН с электростатическим управлением представлена на рис. 2. Нижний электрод устройства механически закреплен на кремниевой подложке и выполнен из поликремния Poly1 с удельным сопротивлением $\rho = 10 \text{ Ом/}$, верхний - подвешен над нижним с помощью закрепленного подвеса, обладающего механической упругостью, и технологически выполнен из поликремния Poly2 ($\rho = 20 \text{ Ом/}$), покрытого слоем золота с $\rho = 0,06 \text{ Ом/}$ для минимизации удельного сопротивления электрода. При возникновении разности потенциалов между электродами возникает электростатическая сила, вынуждающая подвешенный электрод притягиваться в направлении к нижнему до наступления равновесия между электростатической силой и механической силой упругости подвеса.

Состояние равновесия может быть описано следующим уравнением:

$$kx = \frac{1}{2} \cdot \frac{dC_{\Sigma j}}{dx} \cdot U^2 = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\varepsilon \cdot S \cdot U^2}{(d+x)^2}, \quad (6)$$

где k - коэффициент упругости подвеса; U - управляющее напряжение; S - площадь электрода; d - зазор между электродами в момент отсутствия разности потенциалов; ε - диэлектрическая постоянная среды.

Условие равновесия выполняется только тогда, когда величина воздушного зазора между электродами составляет 2/3 величины зазора в исходном состоянии. Если электростатическая сила будет больше силы упругости, между электродами может образоваться контакт (явление «слипания» электродов). Таким образом, теоретически максимальный диапазон изменения емкости ограничивается 50 % из-за явления «слипания» электродов. Однако на практике диапазон перестройки часто занижен из-за технологических паразитных емкостей.

Ток через проектируемый КУН может быть рассчитан по формуле

$$i(t) = C_{\Sigma j}(t) \cdot \frac{dU(t)}{dt} + U(t) \cdot \frac{dC_{\Sigma j}(t)}{dt}. \quad (7)$$

Эквивалентная электрическая добротность КУН определяется выражением

$$\frac{Q+1}{Q-1} = \frac{\sin(\sqrt{2w\tau}) + 2 \cosh\left(\sqrt{\frac{w\tau}{2}}\right) \sin\left(\sqrt{\frac{w\tau}{2}}\right)}{\sinh(\sqrt{2w\tau}) + 2 \sinh\left(\sqrt{\frac{w\tau}{2}}\right) \cos\left(\sqrt{\frac{w\tau}{2}}\right)}, \quad (8)$$

где $\tau = R_p C$; R_p – сопротивление неподвижного электрода КУН, выполненного из поликремния Poly1 (толщина пленки 2 мкм, поверхностное сопротивление 10 Ом/мм), C – расчетная емкость КУН.

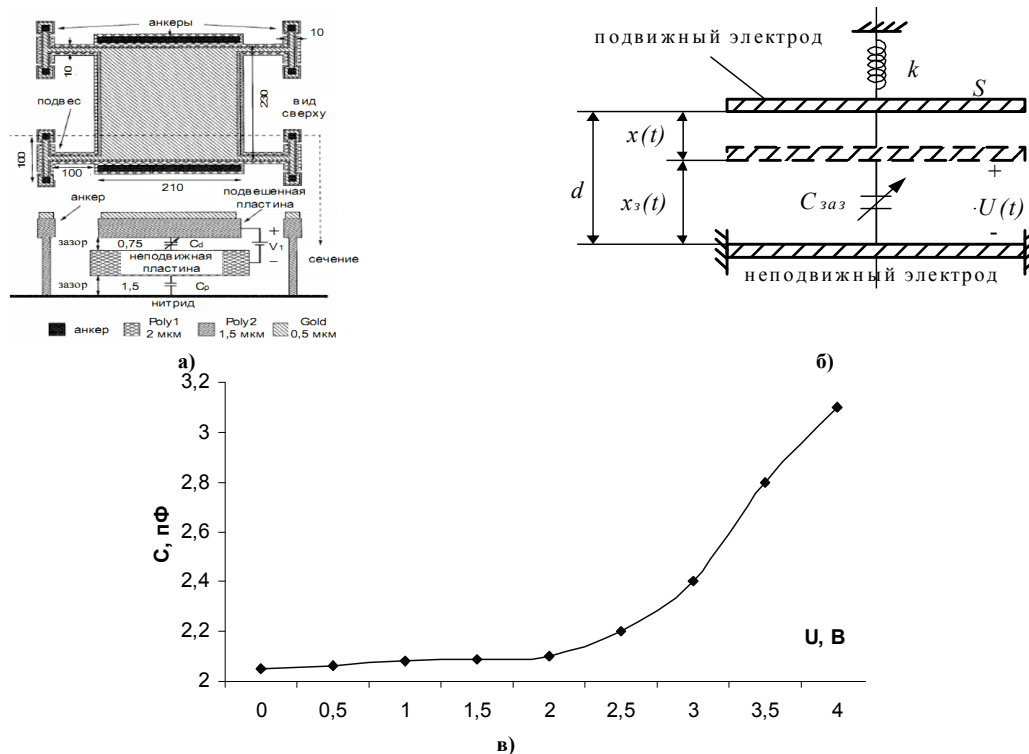


Рис. 2. Двухэлектродный MEMS-КУН с электростатическим управлением: а - конструкция; б - функциональная модель; в - градуировочная характеристика

Величина добротности Q ограничивается, таким образом, активным сопротивлением нижнего электрода, что вызвано конструктивными особенностями. Устранение этого ограничения позволит существенно повысить добротность прибора.

Реализованное устройство характеризовалось следующими параметрами: величина воздушного зазора $h=0,75$ мкм, площадь электродов – 210×230 мкм; коэффициент упругости подвеса – $37,2$ Н/м; масса подвешенного электрода – $0,6$ мкг; частота механического резонанса – 39 кГц; $Q=20$ на частоте 1 ГГц; средняя номинальная емкость $C_{ном}$ (по 14 КУН) составила $1,98$ пФ при девиации $0,14$ пФ, диапазон изменения емкости – $(1,5:1)C_{ном}$ при управляющих напряжениях до 4 В. Частота механического резонанса MEMS-КУН должна быть значительно ниже, чем частота электрического сигнала, в противном случае она может накладываться на основной сигнал так же, как фазовый шум [5,6]

3. Компьютерное моделирование управляемой многочастотной колебательной системой

Проведём анализ характеристик управления МКГ. В качестве примера моделирования МКР используем плоский резонатор АТ-среза (диаметр 12 мм), для которого экспериментально определены следующие параметры: частота основного резонанса $f_{q1}=10009987$ Гц при добротности $Q_{01}=103000$ и динамическом сопротивлении $R_{q1}=24$ Ом; частоты двух ангармоник $f_{q2}=10197018$ Гц и $f_{q3}=10268125$ Гц при добротностях $Q_{02}=84000$, $Q_{03}=61000$ и динамических сопротивлениях $R_{q2}=60$ Ом и $R_{q3}=120$ Ом соответственно; параллельная ёмкость $C_0=3.5$ пФ.

На рис.3 для данного типа АЭ представлены зависимости абсолютного изменения частоты $\Delta f_j = f_j - f_{qj}$, эквивалентного последовательного сопротивления ESR_j и нормированной добротности $\hat{Q}_j = Q_{0j}/Q_{0j}$ при изменении управляющей ёмкости C_{uj} и постоянной времени $T_{внj}$ ($C_{0Д}=5$ пФ).

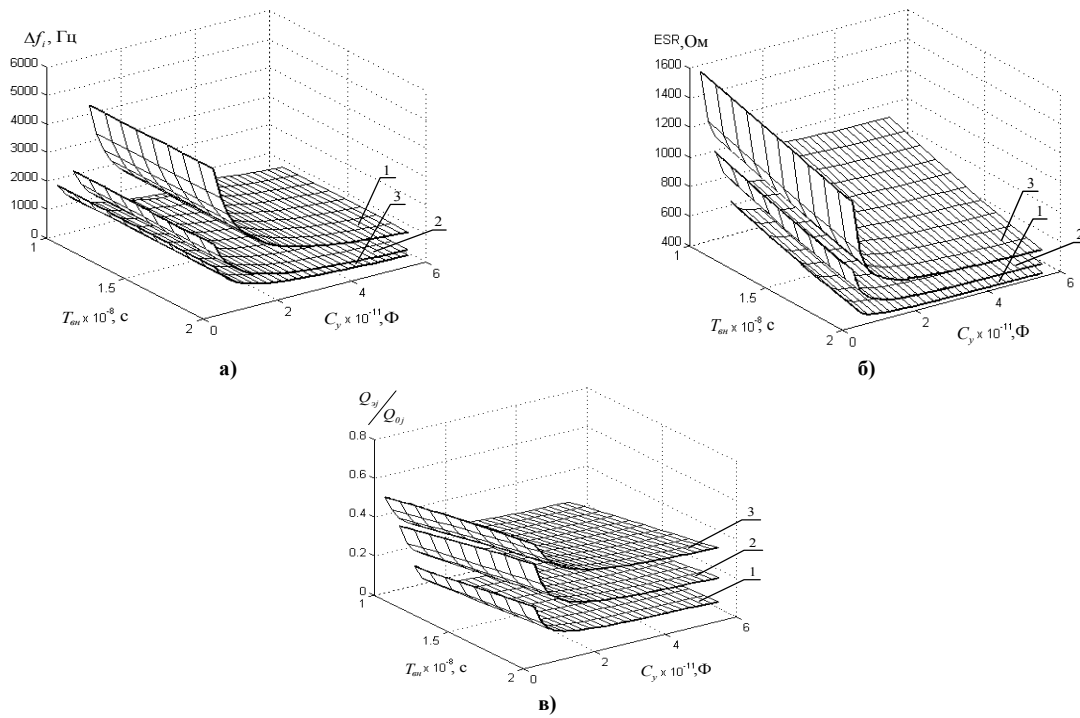


Рис.3. Зависимости абсолютного изменения частоты Δf_i (а), эквивалентного последовательного сопротивления ESR_j (б) и нормированной добротности Q_{yj}/Q_{0j} (в) от изменения параметров ОУПКС:

1 – частота f_{q1} ; 2 – частота f_{q2} и 3 – частота f_{q3}

Анализ полученных данных показывает, что для достаточно больших значений ёмкости управления ($C_{yj} \geq 20$ пФ) характеристики управления (рис. 3,а) носят характер слабо выраженной нелинейности с низкой крутизной управления S_{yj} от 4,5 Гц/пФ для f_{q3} до 13,5 Гц/пФ для f_{q1} . При малых значениях ёмкости C_{yj} ($C_{yj} < 20$ пФ) проявляется ярко выраженный нелинейный характер характеристик управления при резком возрастании крутизны управления от 110 Гц/пФ для f_{q3} до 322 Гц/пФ для f_{q1} , что обусловлено существенным возрастанием влияния сопротивления z_{yj} на общее эквивалентное сопротивление ОУПКС. Для оценки параметров управляемости ОУПКС без снятия полных характеристик управления для всех генерируемых частот, справедливо приблизительное соотношение $\frac{\max_{1 \leq j \leq n} S_{yj}}{S_{yj}} \approx \frac{\max_{1 \leq j \leq n} \Delta f_{epj}}{\Delta f_{epj}}$, где Δf_{epj} – девиация частоты, соответствующая началу участков характеристик с ярко выраженной нелинейностью ($C_{yj} \approx 20$ пФ).

Режимная нестабильность АЭ, выражающаяся в изменении постоянных времени $T_{внj}$, отражается и на частотной нестабильности колебаний генерируемых МКГ. Так, изменение постоянной составляющей тока эмиттера $I_{0э} = \varphi_T / r_s$ ($\varphi_T = kT/q$ – температурный потенциал, r_s – сопротивление эмиттерного перехода) относительно номинального значения $I_{0э} = 3,5$ мА на 25% обуславливает вариацию $T_{внj}$ в пределах 5...8% и вызывает относительное изменение частоты в пределах $(5...10) \cdot 10^{-7}$. Одной из важных характеристик прецизионных многочастотных ОУПКС является величина сопротивлений ESR_j (рис.3,б) и их

соотношения $\frac{\max_{1 \leq j \leq n} ESR_j}{ESR_j}$, что определяет как устойчивость многочастотного режима генерации, так и динамические характеристики МКГ в целом. Для обеспечения приемлемой устойчивости колебаний в широком диапазоне изменения питающих напряжений и температуры окружающей среды при вариации соотношения $\frac{\max_{1 \leq j \leq n} ESR_j}{ESR_j}$ в пределах от 1,2 до 4 раз (при управлении одной частотой по отношению к

другой) необходимо обеспечить подавление межканальных помех на уровне –25...–30 дБ с одновременной оптимизацией параметров МКГ, так как, в противном случае, возможно существенное ухудшение динамических свойств генератора, в частности, увеличение времени установления колебаний на порядок и

более по отношению к времени установления колебаний неуправляемого МКГ с такими же параметрами [6].

Вывод

Подключение низкочастотных цепей ($z_{\text{вн}}$) резко ухудшает эквивалентную добротность $Q_{\text{э}}$ и, как следовало ожидать, оказывает наибольшее влияние на самую высокочастотную цепь ОУПКС (рис. 3,в). Однако, уменьшением коэффициента связи ($C_{\text{эж}} < 20$ пФ), возможно повышение в определенных пределах $Q_{\text{э}}$, что необходимо учитывать при проектировании ОУПКС.

Полученные данные показывают, что для достижения высоких характеристик МКГ на основе ОУПКС целесообразно использование методик рационализации параметров генератора, изложенных в [6].

Литература

1. Колпаков Ф. Ф. Анализ характеристик управляемого многочастотного кварцевого генератора / Ф. Ф. Колпаков, С. К. Пидченко, А. А. Акулиничев // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2000. – № 3. – С. 70–75.
2. Пидченко С. К. Моделирование колебательной системы многочастотного фильтрового кварцевого генератора / С. К. Пидченко, А. А. Акулиничев, Ф. Ф. Колпаков // Авіаційно-космічна техніка і технологія : зб. наук. праць. – Х. : Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», 2000. – Вип. 20. – С. 75–79.
3. Zelensky A. A. Mathematical Model of Multi-Frequency Piezoresonance Oscillation System / A. A. Zelensky, S. K. Pidchenko, A. A. Taranchuk // Communications. – Science Publishing Group : New York, U.S.A., 2013. – Vol. 1, No. 1. – Pp. 1–8. – ISSN: 2328–5966 (Print). DOI: 10.11648/j.com.20130101.11.
4. Зеленский А. А. Инвариантные пьезорезонансные устройства с управляемой динамикой / А. А. Зеленский, С. К. Пидченко // Физические основы приборостроения. – М. : Науч.-технолог. центр уникального приборостроения РАН, 2013. – № 2, т. 2. – С. 38–49.
5. Taranchuk A. Frequency Measuring Transducers Based on the Piezoresonance Oscillator Systems with External MEMS Control / A. Taranchuk, S. Pidchenko // International Journal of Sensors and Sensor Networks. – Science Publishing Group : New York, U.S.A., 2013. – Vol. 1, No. 4. – Pp. 41–49. DOI: 10.11648/j.ijssn.20130104.11.
6. Dec A., Suyama K. Micromachined electro-mechanically tunable capacitors and their applications to RF IC's // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – December 1998. – Vol. 46. – N 12. – P.p. 489–492.
7. Пидченко С.К. Теорія і реалізаційні основи інваріантних багаточастотних п'єзореzonансних пристроїв та систем. – Хмельницький: ХНУ, 2014. – 400 с.
8. Пидченко С.К. Віброкомпенсація нестабільності частоти кварцових генераторів в режимі багаточастотного збудження п'єзореzonатора / С.К. Пидченко, А.А. Таранчук, В.І. Стецюк // Вісник НТУУ «КПІ». Серія - Радіотехніка. Радіоапаратобудування, 2014. - № 57. С- 104–112
9. Таранчук А.А. Динамика температурно-частотных процессов в многочастотных кварцевых генераторах с цифровой компенсацией режимной нестабильности резонатора / А.А. Таранчук, С.К. Пидченко, Р.П. Хоптинский // Радиоэлектроника. – 2015. – Т. 58, № 6. – С. 13–21. – (Изв. вузов).

References

1. Kolpakov F. F., Pidchenko S. K., Akulinichev A. A. Analiz harakteristik upravlyаемого mnogochastotnogo kvartseвого генератора. Vимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2000. – № 3. – С. 70–75.
2. Pidchenko S. K., Akulinichev A. A., Kolpakov F. F. Modelirovanie kolebatel'noy sistemy mnogochastotnogo filtrovogo kvartseвого генератора. Avіatsіyno-kosmіchna tehnіka і tehnologіya : zб. nauk. prats. – H. : Nats. aerokosm. un-t Im. M.E. Zhukovskogo «HAI», 2000. – Vip. 20. – S. 75–79.
3. Zelensky A. A., Pidchenko S. K., Taranchuk A. A. Mathematical Model of Multi-Frequency Piezoresonance Oscillation System. Communications. – Science Publishing Group : New York, U.S.A., 2013. – Vol. 1, No. 1. – Pp. 1–8. – ISSN: 2328–5966 (Print). DOI: 10.11648/j.com.20130101.11.
4. Zelenskiy A. A., Pidchenko S. K. Invariantnyie pezeorezonansnyie ustroystva s upravlyаемoy dinamikoй. Fizicheskie osnovy priborostroeniya. – M. : Nauch.-tehnolog. tsentr unikal'nogo priborostroeniya RAN, 2013. – № 2, t. 2. – S. 38–49.
5. Taranchuk A., Pidchenko S. Frequency Measuring Transducers Based on the Piezoresonance Oscillator Systems with External MEMS Control. International Journal of Sensors and Sensor Networks. – Science Publishing Group : New York, U.S.A., 2013. – Vol. 1, No. 4. – Pp. 41–49. DOI: 10.11648/j.ijssn.20130104.11.
6. Dec A., Suyama K. Micromachined electro-mechanically tunable capacitors and their applications to RF IC's // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – December 1998. – Vol. 46. – N 12. – P.p. 489–492.
7. Pidchenko S.K. Teoriya і realizatsiyni osnovi Invariantnih bagatochastotnih p'ezorezonansnih pristroyiv ta sistem. – Hmel'niitskiy: HNU, 2014. – 400 s.
8. Pidchenko S.K., Taranchuk A.A., Stetsyuk V.I. Vibrokompensatsiya nestabil'nostі chastoti kvartsovih generatoriv v rezhimі bagatochastotnogo zbudzhennya p'ezorezonatora. Vіsник NTUU «KPI». Seriya - Radіotehnіka. Radіoaparatabuduvannya, 2014. - № 57. S- 104–112
9. Taranchuk A.A., Pidchenko S.K., Hoptinskiy R.P. Dinamika temperaturno-chastotnyih protsessov v mnogochastotnyih kvartsevyih generatorah s tsifrovoy kompensatsiyeй rezhimnoy nestabil'nosti rezonatora. Radioelektronika. – 2015. – T. 58, № 6. – S. 13–21.

Рецензія/Peer review : 9.6.2015 р. Надрукована/Printed : 24.6.2015 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Параска Г.Б.