

УДК 621.396

Д.А. Семенець, С.В. Хуторненко, Д.П. Васильчук

Українська інженерно-педагогічна академія, Харків, Артемівськ

ВИЗНАЧЕННЯ МОДУЛЯЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КЕРОВАНОГО КВАРЦОВОГО ГЕНЕРАТОРУ З МОДУЛЯЦІЄЮ МІЖЕЛЕКТРОДНОГО ЗАЗОРУ

Вдосконалена комп'ютерна модель керованого кварцового генератора з безпосереднім управлінням частоти кварцового резонатора модуляцією міжелектродного зазору лінійним індукційно-динамічним модулятором. Отримані динамічні і статичні характеристики управління частотою, проаналізований вплив типу модуляції імпульсного сигналу управління і параметрів лінійного індукційно-динамічного модулятора на якісні параметри управління частотою.

Ключові слова: кварцовий генератор, п'єзорезонансна система, міжелектродний зазор, лінійний індукційно-динамічний перетворювач, комп'ютерне моделювання, модуляційні характеристики.

Вступ

Постановка проблеми. Генератори керовані напругою (ГКН) широко використовуються у синтезаторах частот та інших радіотехнічних пристроях. Опорне високоякісне коливання, необхідне для їх функціонування, формується за допомогою керованого генератора (ККГ), частота якого стабілізується за допомогою кварцового резонатора. До таких генераторів пред'являються достатньо жорсткі вимоги – забезпечувати необхідний діапазон перебудови частоти, дозволяючи проводити управління процесом установки частоти за допомогою петлі фазового автопідстроювання частоти, низький фазовий шум, гармоніки основного сигналу і побічні складові з можливо малим рівнем.

ККГ отримали в синтезі частот менш широке застосування, чим ГКН, оскільки вони в змозі перебудовуватися в значно меншому діапазоні частот. Проте стабільність частоти і фазові шуми ККГ набагато перевершують подібні характеристики ГКН.

Для перебудови генераторів по частоті в певному діапазоні зазвичай використовуються варикапи. При цьому факторами, які визначають такі характеристики ККГ, як лінійність та крутизна характеристики управління, рівень фазових шумів ККГ є властивості варикапів, які в деяких випадках не задовольняють вимогам до якості сигналу. Актуальним завданням є розробка нових методів управління частоти ККГ та визначення характеристик і параметрів генераторів з підвищеним діапазоном перебудови частоти покращеними характеристиками управління частотою, зниженим рівнем фазових шумів.

Аналіз публікацій. В дійсний час активно розробляються нові типи керованих кварцових генераторів в яких управління частотою здійснюється не включенням зовнішніх реактивних елементів (варикапів), а безпосередньою дією на п'єзорезонансну систему (ПРС) кварцового резонатора. Це дозволяє покращити основні характеристики ККГ – підвищити відносний діапазон перебудови частоти до $(1...1,5) \times 10^{-3}$ (при існуючому рівні $(100...250) \times 10^{-6}$),

знижити рівень фазових шумів генератора на $(3...10)$ дБн/Гц. Одним з перспективних напрямів розробки таких пристроїв є застосування керованих по частоті ПРС з модуляцією міжелектродного зазору (МЕЗ). В якості модулятора міжелектродного зазору пропонується використовувати МЕМС – пристрої [1] або лінійні індукційно-динамічні модулятори [2]. В роботах [2, 3] запропонований лінійний індукційно-динамічний модулятор (ЛІДМ) МЕЗ, керований імпульсним сигналом, який характеризується частотою, амплітудою і шпаруватістю (коефіцієнтом заповнення). Це значно розширює функціональні можливості керування ПРС, дає можливості побудови нових типів систем ФАП, крім того можливо використовувати сигнал керування складної (відмінної від прямокутної) форми.

Властивості ПРС при наявності міжелектродного зазору у статичному режимі розглянуті у роботі [4]. Відомі співвідношення, які описують залежність частоти резонансів КР та параметрів електричної еквівалентної схеми від величини зазору. Математична модель п'єзорезонансного пристрою, яка запропонована в роботі [2] описує систему "ЛІДМ – ПРС – ККГ" як лінійну стаціонарну, що є спрощенням. Система розглянута у одномірному вигляді "вхід – вихід", що не дозволяє досліджувати внутрішні параметри системи. Отримання характеристик управління у чисельному вигляді пов'язане з певними труднощами. Запропонована у роботі [3] комп'ютерна модель ПРС дозволяє досліджувати динамічні процеси у керованому п'єзорезонансному пристрої, оцінювати вплив параметрів системи та керуючого впливу на вихідні параметри генератора.

Мета публікації. Задача, що розв'язуються в роботі. Подальша розробка ККГ з модуляцією МЕЗ ЛІДМ потребує визначення функціональних залежностей параметрів ККГ від сигналу управління та обґрунтування оптимального керуючого впливу для отримання бажаних статичних і динамічних характеристик генератору.

В роботі вдосконалена комп'ютерна модель ККГ з модуляцією МЕЗ ЛІДМ та представлені отримані модуляційні характеристики пристрою.

Основна частина

Узагальнена структурна схема керованого кварцового генератора з модуляцією міжелектродного зазору ЛІДМ показана на рис. 1.

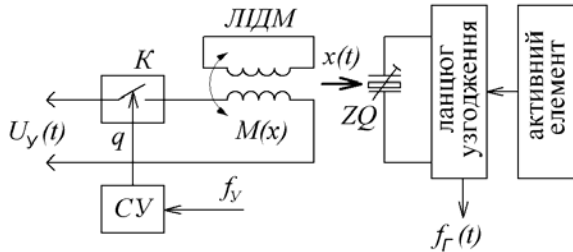


Рис. 1. Структурна схема керованого кварцового генератора

Управління частотою генератора здійснюється безпосередньою дією на кварцовий резонатор модуляцією міжелектродного зазору. Переміщення рухомого електроду виконує лінійний індукційно-динамічний модулятор, збудження якого здійснюється імпульсним сигналом управління з амплітудою $U_y(t)$, формування тривалості імпульсу (шпаруватості q) виконується електронним ключовим елементом K , стан якого визначається схемою управління CV , що працює з частотою управління f_y . Формувач сигналу управління реалізує дію на індуктор ЛІДМ відповідно до заданого закону, встановлюючи величину міжелектродного зазору, у свою чергу, що визначає вихідну частоту генератора.

Для осциляторної схеми частота генерації визначається співвідношенням:

$$f_{\Gamma} = f_K \left(1 - \frac{(1 + \chi) X_1}{2\sqrt{L_1 / C_1}} \right), \quad (1)$$

де f_K - частота послідовного резонатору кварцового

резонатору; L_1, C_1 - параметри електричної еквівалентної схеми кварцового резонатору; X_1 - ємкісний опір між колектором і емітером транзистора; χ - коефіцієнт, який визначається елементами ланцюга узгодження генератора.

При подальшій розробці комп'ютерної моделі ККГ з модуляцією міжелектродного зазору прийнято, що частота послідовного резонансу керованого КР f_K і частота генерації КР f_{Γ} є функцією амплітуди сигналу управління U_y , його частоти f_y і шпаруватості q_y :

$$f_{\Gamma} = f_K(U_y, f_y, q_y) [1 + \delta(U_y, f_y, q_y)], \quad (2)$$

де δ - коефіцієнт впливу параметрів схеми генератора і електричної еквівалентної схеми кварцового резонатора. У фільтрових схемах $\delta \rightarrow 0$, в осциляторних схемах вплив даного коефіцієнта незначний. Таким чином, основним та найбільш складним для математичного опису чинником, що визначає закон зміни частоти генерації є величина міжелектродного зазору кварцового резонатора, яка, у свою чергу, встановлюється параметрами сигналу збудження ЛІДМ.

Комп'ютерна модель ЛІДМ (рис. 2), розроблена на підставі диференціальних рівнянь, які описують електричні та механічні процеси в модуляторі.

При подальшому моделюванні використані параметри ЛІДМ, визначені відповідно до рекомендацій [5] для зовнішнього діаметру індуктора $d_1 = 12$ мм: кількість витків котушок індуктора, якорі $w_1 = 600$; $w_2 = 150$; опір котушки індуктора $R_1 = 55,6$ Ом; опір котушки якоря $R_2 = 23,6$ Ом; індуктивність котушок $L_1 = 2,97$ мГн; $L_2 = 2,2$ мГн; початкове значення взаємної індуктивності – $M_0 = 0,326$ мГн; коефіцієнт зниження взаємної індуктивності $k_M = -1,5$; маса якоря з рухомих електродом $m = 3,92 \cdot 10^{-6}$ кг; коефіцієнт пружності механічної частини $K = 0,1$ м/Н; коефіцієнт динамічного тертя $B = 0,001$.

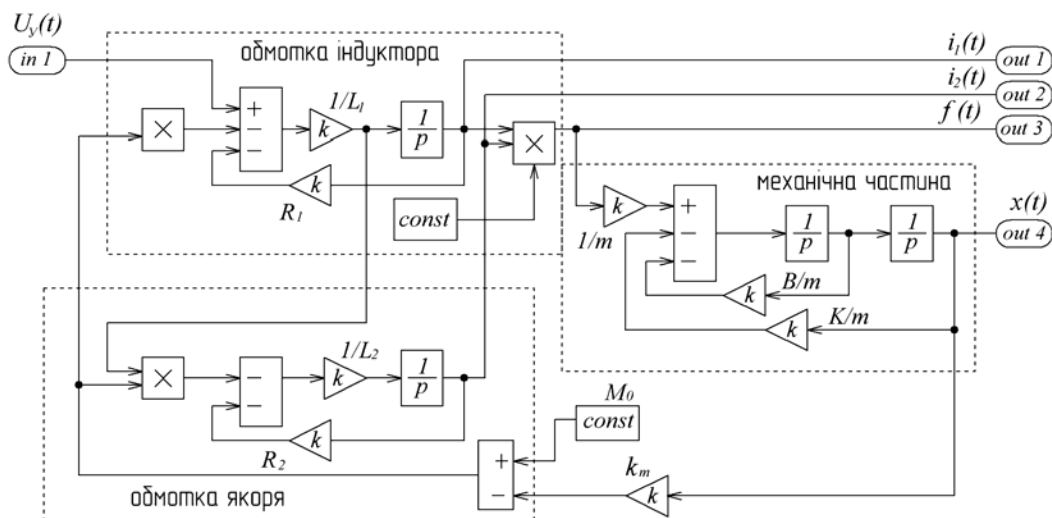


Рис. 2. Комп'ютерна модель лінійного індукційно-динамічного модулятора для середовища Matlab – Simulink

Модулі визначення частоти послідовного резонансу та параметрів електричної еквівалентної схеми для керованого п'єзокварцового резонатору з модуляцією міжелектродного зазору визначаються наведеними нижче співвідношеннями.

Частота послідовного резонансу:

$$f_K(x) = f_{K0}(k_2 + x)/(k_1 + x). \quad (3)$$

Динамічний опір:

$$R_1(x) = k_3(1 + k_4x)^2. \quad (4)$$

Статична ємкість:

$$C_0(x) = \frac{k_5}{k_1 + x}. \quad (5)$$

Динамічна індуктивність:

$$L_1(x) = k_6(1 + k_7x)^2. \quad (6)$$

Динамічна ємкість:

$$C_1(x) = k_8(k_9 + x)^{-2}. \quad (7)$$

Ємкісне відношення:

$$m(x) = \frac{C_1}{C_0} = k_{10}(k_1 + x)^{-1}, \quad (8)$$

де: $k_1 = 2h\varepsilon_0 / \varepsilon_{22}$; $k_2 = k_1 \left(1 - \frac{4k_{26}^2}{\pi^2}\right)$; $k_3 = \eta_S h \pi^2$;

$$k_4 = \frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_0(2h)} = 1/k_1; \quad k_5 = S_{el}\varepsilon_0; \quad k_6 = \frac{h^3\rho}{S_{el}e_{26}^2};$$

$$k_7 = \frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_0 h}; \quad k_8 = \frac{8S_{el}e_{26}^2\varepsilon_0^2(2h)}{\pi^2\bar{c}_{66}\varepsilon_{22}^2}; \quad k_9 = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_{22}(2h)};$$

$$k_{10} = \frac{\varepsilon_0(2h)8e_{26}^2}{\pi^2\bar{c}_{66}\varepsilon_{22}^2}; \quad f_{K0} = (4h)^{-1}(\bar{c}_{66}/\rho)^{0,5} \text{ - базове}$$

значення частоти послідовного резонансу керованого п'єзорезонатору; $2h$ - частотовизначальний розмір п'єзокристалу; k_{26}^2 - коефіцієнт електромеханічного зв'язку п'єзокварцу; ρ - щільність п'єзокристалу; S_{el} - площа електродів; \bar{c}_{66} - компоненти тензора пружності п'єзокристалу; e_{26} - п'єзоелектричний коефіцієнт п'єзокристалу; ε_{22} - діелектричний коефіцієнт п'єзокристалу; ρ - щільність матеріалу п'єзокристалу; $k_{26}^2 = e_{26}^2 / \bar{c}_{66}\varepsilon_{22}^2$ - коефіцієнт електромеханічного зв'язку; h_S - величина внутрішнього тертя п'єзокристалічного елемента; x - величина міжелектродного зазору п'єзокварцового резонатору.

При моделюванні процесів встановлення параметрів ЕЕС ПРС і резонансної частоти використані параметри п'єзокристалу: $\bar{c}_{66} = 39,88 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$, $e_{26} = -0,171 \text{ Кл/м}^2$; $\varepsilon_{22} = 39,21 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ - пружні, п'єзоелектричні і діелектричні постійні п'єзокварцу Y-зрізу; частотовизначальний розмір п'єзокристалу $2h = 1,958 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; модифікований пружний коефіцієнт $\bar{c}_{66}' = \bar{c}_{66}^E + e_{26}^2 / \varepsilon_{26}^2 = 40,626 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$; щіль-

ність п'єзокристалу $\rho = 2649 \text{ кг/м}^3$; коефіцієнт електромеханічного зв'язку $k_{26}^2 = 0,0184$; площа рухомого електроду $S_{el} = 2,827 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$.

Розроблені модулі ЛІДМ та окремих параметрів електричної еквівалентної схеми керованого п'єзокварцового резонатору дозволяють синтезувати моделі керованих кварцових генераторів різної конфігурації. Узагальнена комп'ютерна модель ККГ представлена на рис. 3.

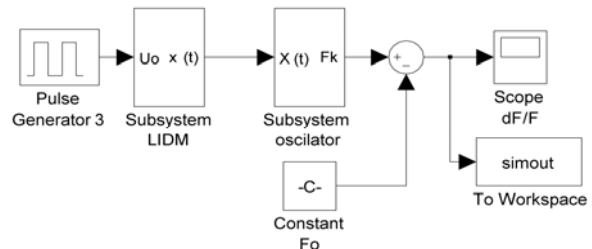


Рис. 3. Комп'ютерна модель ККГ з модуляцією міжелектродного зазору для середовища Matlab – Simulink

При розробці керованих по частоті генераторів важлива інформація як про параметри електричної еквівалентної схеми керованого п'єзокварцового резонатору, так і про внутрішні параметри ЛІДМ. Розроблена модель дозволяє досліджувати динамічні (часові) характеристики встановлення частоти, статичні – регульовальні характеристики перетворювача. Можливий аналіз величин струмів в обмотках індуктора і якоря, механічних зусиль в пружному підвісі ЛІДМ. На рис. 4 – 6 представлені часові діаграми встановлення частоти генератора при різних типах сигналу управління – амплітудноімпульсній модуляції (АІМ), частотноімпульсній модуляції (ЧІМ) та широтноімпульсній модуляції (ШІМ).

На підставі результатів моделювання визначені параметри електричної еквівалентної схеми керованого п'єзокварцового резонатору при АІМ-сигналі управління (табл. 1), на рис 7 показані модуляційні характеристики управління ККГ – залежності відносної перебудови частоти генератора $\Delta f / f$ при різних величинах амплітуди сигналу управління, шпаруватості і його частоти.

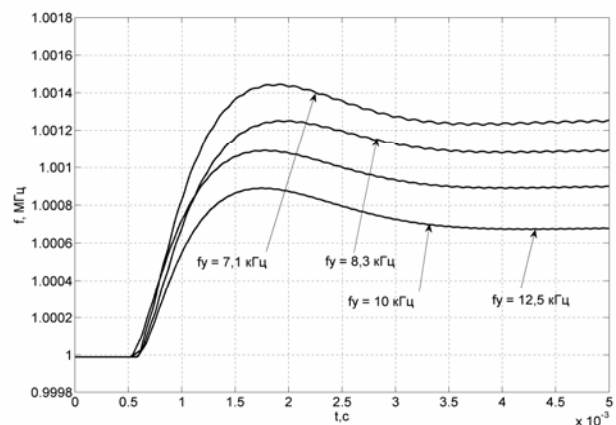


Рис. 4. Часові характеристики встановлення частоти

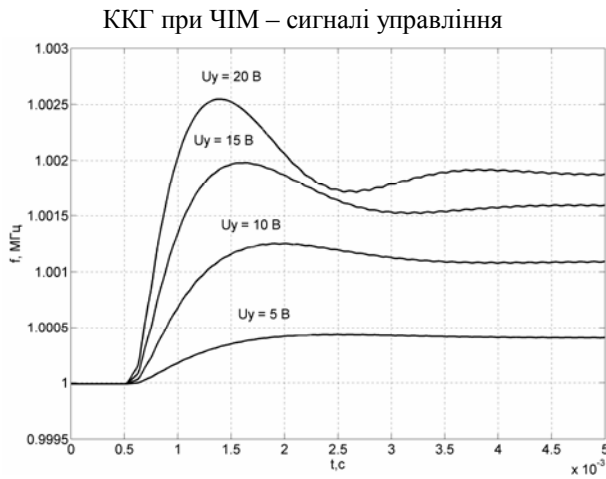


Рис. 5. Часові характеристики встановлення частоти ККГ при АІМ – сигналі управління

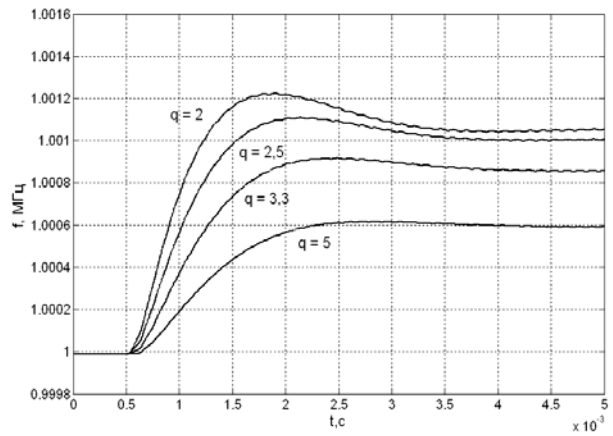
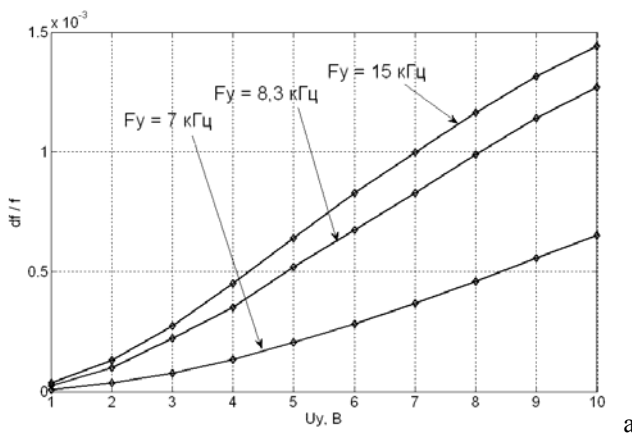


Рис. 6. Часові характеристики встановлення частоти ККГ при ШІМ – сигналі управління



б

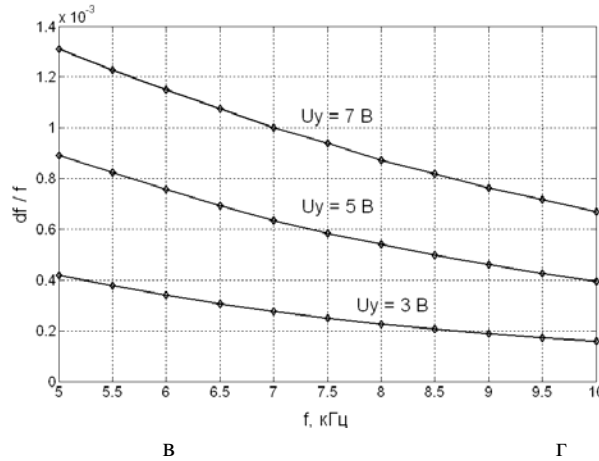


Рис. 7. Модуляційні характеристики ККГ з модуляцією МЕЗ: $\Delta f / f = F(U_Y) - (a, б)$; $\Delta f / f = F(f_Y) - (в)$; $\Delta f / f = F(K_3) - (г)$.

Таблиця 1

Залежність параметрів ЕЕС ПРС з модуляцією МЕЗ від амплітуди керуючого сигналу

| $U_y, В$ | $R_1, Ом$ | $C_1, пФ$ | $C_0, пФ$ | $L_1, Гн$ |
|----------|-----------|----------------------|-----------|-----------|
| 5 | 97 | $7,7 \times 10^{-3}$ | 0,54 | 3,75 |
| 10 | 114 | $6,5 \times 10^{-3}$ | 0,49 | 5,0 |
| 15 | 136 | $5,5 \times 10^{-3}$ | 0,63 | 6,5 |
| 20 | 150 | $5,0 \times 10^{-3}$ | 0,43 | 7,8 |

..Враховуючи те, що управління ЛІДМ можливо здійснювати варіацією трьох змінних – амплітуди сигналу управління, його частоти і шпаруватості, важливий вибір оптимального закону управління встановлення частоти з погляду швидкодії, якості регулювання і лінійності характеристики управління.

Отримані результати моделювання показують можливість отримання задовільної лінійності характеристик при використанні амплітудноімпульсної модуляції керуючого сигналу (АІМ) для отримання вели-

ких значень перебудови частоти і частотно-імпульсної модуляції (ЧІМ) для отримання малих значень перебудови частоти. Регулювання частоти при АІМ з амплітудою керуючого сигналу більше 10 В супроводжується значним перерегулюванням ($\sigma > 30\%$).

Широко-імпульсна модуляція (ШІМ) ефективна при значеннях шпаруватості в межах $q = 5 \dots 3$, подальше зниження шпаруватості приводить до значного перерегулювання вихідного сигналу, при значеннях $q < 2$ вихідний сигнал знижується. Регулювальні характеристики при широко-імпульсній модуляції характеризуються найменшою лінійністю, окрім цього слід зазначити технічну складність реалізації ШІМ.

Проведено моделювання при незмінних параметрах сигналу управління та аналіз впливу параметрів ЛІДМ на динамічні характеристики встановлення частоти ККГ. Отримані результати показують незначний вплив на величину частоти ККГ зовнішнього опору пристрою управління. Основними чинниками, що впливають на значення сталої резонансної частоти є величина початкової взаємної індуктивності між обмотками і габаритний розмір якоря, що побічно впливає на величину взаємної індуктивності. Аналіз часових характеристик при варіюванні параметрами механічної частини ЛІДМ – коефіцієнтом пружності, коефіцієнтом динамічного тертя і приєднаній масі якоря (рухомого електроду) показує значний вплив даних параметрів на характер динамічних характеристик – перерегулювання і час встановлення частоти, що вимагає подальшого аналізу і оптимізації конструктивних параметрів механічної частини з метою отримання максимальної швидкодії і мінімального перерегулювання частоти. При виборі частоти сигналу управління слід використовувати частотні характеристики ЛІДМ при відомих параметрах електричної і механічної частини перетворювача, що можливо при використанні передавальної функції ЛІДМ, отриманої в [2]. При цьому слід враховувати рівень низькочастотного шуму у вихідному сигналі з частотою керуючого сигналу, який може бути обмежений вимогами до каналу зв'язку.

Висновки

В роботі вдосконалена комп'ютерна модель ККГ з безпосереднім впливом на п'єзореzonансний резонатор та отримані результати, які дозволяють аналізувати статичні та динамічні характеристики управління частотою. Це дозволяє в подальшому виконати ідентифікацію динамічної системи "ЛІДМ – ПРС – ККГ" з метою уточнення передавальної функції керованого пристрою генерування та визначення типу керуючого сигналу, який би забезпечив мінімальне перерегулювання та максимальну швидкодійність встановлення частоти.

Отримані результати дозволяють визначити аналітичні співвідношення модуляційних характеристик ККГ, що важливо при розробці пристроїв управління та стабілізації частоти керованих кварцових генераторів.

Список літератури

1. Акулиничев А.А. Кварцевый частотный модулятор с подвижным микроэлектродом управляемой геометрии / А. Акулиничев // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2011. - №1(49). – С. 22-28.
2. Хуторненко С. В. Математична модель п'єзореzonансного пристрою в засобах автоматизації механотронних систем / С. Хуторненко, Д. Семенець // Наукові праці ДонНТУ – серія гірничо-електромеханічна. – 2011. - №21(189). – С. 159 – 167.
3. Хуторненко С.В. Моделювання п'єзореzonансного пристрою з управлінням частоти лінійним індукційно-динамічним модулятором / С. Хуторненко, Д. Семенець // Збірник наукових праць Харківського університету повітряних сил. - 2012. – №1(30). – С. 161 – 166.
4. Савченко В.М. Параметри електричної схеми Batterworth – Van Dyke п'єзоелемента з міжелектродним зазором і однобічним масонавантаженням / В. Савченко, С. Хуторненко // Системи озброєння і військова техніка. – 2008. – №2(14). – С. 104 – 107.

Надійшла до редколегії 4.12.2012

Рецензент: д-р техн. наук проф. Х.В. Раковський, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УПРАВЛЯЕМОГО КВАРЦЕВОГО ГЕНЕРАТОРА С МОДУЛЯЦИЕЙ МЕЖЭЛЕКТРОДНОГО ЗАЗОРА

Д.А. Семенец, С.В. Хуторненко, Д.П. Васильчук

Усовершенствована компьютерная модель управляемого кварцевого генератора с непосредственным управлением частоты кварцевого резонатора модуляцией межэлектродного зазора линейным индукционно динамическим модулятором. Получены динамические и статические характеристики управления частотой, проанализировано влияние типа модуляции импульсного сигнала управления и параметров линейного индукционно динамического модулятора на качественные параметры управления частотой.

Ключевые слова: кварцевый генератор, пьезорезонансная система, межэлектродный зазор, линейный индукционно динамический преобразователь, компьютерное моделирование, модуляционные характеристики.

DETERMINATION OF MTFs OF THE GUIDED CCO WITH MODULATION OF WORKPIECE-TO-ELECTRODE

D.A. Semehets, S.V. Khutarenko, D.P. Vasilchuk

The computer model of the guided quartz generator is improved with the direct management of frequency of quartz resonator by modulation of workpiece-to-electrode a linear induction dynamic keyer. Dynamic and static descriptions of management frequency are got, influence of type of modulation of impulsive signal of management and parameters of linear induction-dynamic keyer is analysed on the high-quality parameters of management frequency.

Keywords: quartz generator, of piezoresonators system, workpiece-to-electrode, linear induction dynamic transformer, computer design, modulation descriptions.