

УДК 621.396

С.В. Хуторненко, Д.А. Семенець

Українська інженерно-педагогічна академія, Харків, Артемівськ

## МОДЕЛЮВАННЯ П'ЄЗОРЕЗОНАНСНОГО ПРИСТРОЮ З УПРАВЛІННЯМ ЧАСТОТИ ЛІНІЙНИМ ІНДУКЦІЙНО-ДИНАМІЧНИМ МОДУЛЯТОРОМ

*Запропонована комп'ютерна модель п'єзореzonансного пристрою з безпосереднім управлінням частоти модуляцією міжелектродного зазору п'єзореzonатора лінійним індукційно-динамічним перетворювачем.*

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

### Вступ

**Постановка проблеми.** При розробці п'єзореzonансних пристроїв з управлінням за частотою перспективним напрямком є використання керованих кварцових резонаторів (КР) з модуляцією міжелектродного зазору між рухомих електродом та поверхнею п'єзокристалу [1]. Використання керованих п'єзореzonансних систем (ПРС) дозволяє відмовитися від використання варикапів, які вносять додаткові фазові шуми генератора та обмежують відносну девіацію частоти на рівні (200 – 400) ppm. [1], [2]. Модуляцію міжелектродного зазору можливо здійснювати за допомогою різноманітних електромеханічних перетворювачів, найпоширенішими з яких є електростатичні, електромагнітні, п'єзоелектричні та електрострикційні. В роботі [2] запропоновано використання лінійного індукційно-динамічного модулятора зазору з збудженням індуктора від джерела прямокутних імпульсів напруги з визначеною амплітудою, частотою та шпаруватістю. Представлена математична модель такого перетворювача дозволяє виконувати інженерні розрахунки системи управління керованим по частоті КГ, але складність моделі, виконані припущення та наявність в ній нелінійних ланок потребує розробки більш досконалої та функціональної моделі системи.

**Аналіз публікацій.** Відомі схеми керованих п'єзореzonансних генераторів використовують включення варикапів в коливальну систему генератора послідовно з кварцовим резонатором. Вплив параметрів електричної еквівалентної схеми КР на вихідну частоту генератора та зв'язок резонансних частот КР з вихідною частотою добре відомий [4]. В роботах [3, 5] проаналізований вплив величини міжелектродного зазору на частоту послідовного резонансу ПРС та параметри електричної еквівалентної схеми. Показано, що при маніпуляції величиною зазору в межах 0...200 мкм при резонансній частоті 10 МГц можлива девіація частоти (25 – 30) кГц.

Для модуляції міжелектродного зазору ПРС в роботі [1] запропоновано використання МЕМС, але їх складність та висока ціна стримує використання

таких засобів управління для серійного виробництва. Лінійний індукційно-динамічний перетворювач (ЛІДП) переміщення рухомого електроду докладно розглянутий в роботах [2, 6]. Принцип дії електромеханічних перетворювачів такого типу оснований на взаємодії магнітного поля, збуджуваного змінним періодичним, імпульсним або аперіодичним струмом статорної обмотки (обмотки індуктора), з індуктованим струмом в короткозамкненій (одно- або багатовитковою) обмотці якоря, що переміщується. При підключенні до джерела енергії обмотка індуктора наводить в якорі струм, спричиняючи його переміщення уздовж осі  $X$  під дією електродинамічної сили. Перевагами цього перетворювача є: можливість безконтактного руху якоря відносно індуктора; відсутність щітково-контактних і ерозійних процесів, а також підвищеного зносу контактних елементів; прискорення якорів практично будь-яких форм і розмірів; можливість розподілу електродинамічних сил по всій довжині рухомого якоря; можливість послідовного підводу енергії до секцій обмотки індуктора, які розподілені у просторі в напрямку переміщення якоря; «м'які» вимоги до параметрів імпульсного джерела енергії; наявність аксіально центруючих електродинамічних зусиль, які діють на рухомий якор і можуть забезпечувати його магнітний підвіс відносно індуктора.

Це ставить електромеханічні перетворювачі індукційно-динамічного типу в особливе становище по відношенню до решти імпульсних електромеханічних пристроїв, призначених для створення високих прискорень. Так, показник використання активних матеріалів на одиницю зусилля у них у 7 – 8 разів вище, ніж в електромагнітних, і в 1,6 рази вище, ніж у електродинамічних перетворювачів. В роботі [6] визначені основні положення стосовно аналізу і синтезу лінійних індукційно-динамічних перетворювачів, але слід зазначити, що розглянуті пристрої відносяться до потужних приладів з діаметром індуктора (100...120) мм та масою 0,3...1,3 кг. Мініатюрні перетворювачі, та їх робота в режимі забезпечення точного позиціонування якорю в межах ( $10^{-6}$  ...  $10^{-5}$ ) м у відомих роботах у відомих роботах практично не розглянуті.

**Мета публікації. Задачі, що розв'язуються в роботі.** Метою даної роботи є розробка комп'ютерної моделі п'єзореzonансного генератора з безпосереднім управлінням частотою модуляцією міжелектродного зазору лінійним індукційно-динамічним модулятором для отримання його робочих характеристик, аналізу властивостей при визначенні типу, параметрів керуючого впливу та оптимізації системи управління генератором згідно заданих вимог.

**Основна частина**

Структурна схема керованого за частотою КГ з модуляцією міжелектродного зазору ЛДП представлена на рис. 1. При використанні керованої п'єзореzonансної системи в генераторі з КР в ланцюзі зворотного зв'язку частота генерації практично дорівнює частоті послідовного резонансу ПРС [3]:

$$f_{ГФ} = \frac{1}{2(2h)} \sqrt{\frac{c_{66}}{\rho}} \left( 1 - \frac{4(2h)k_{26}^2 \epsilon_0}{\pi^2 (2\epsilon_0 h + \epsilon_{22} x)} \right), \quad (1)$$

де  $S_{EL}$  – площа електродів ПР;  $c_{\lambda\mu}$  – компоненти тензора пружності;  $e_{i\lambda}$  – п'єзоелектричні коефіцієнти;  $\epsilon_{ij}$  – діелектричні коефіцієнти;  $\rho$  – щільність матеріалу п'єзореzonатора;  $k_{26}^2 = e_{26}^2 / \bar{c}_{66} \epsilon_{22}^s$  – коефіцієнт електромеханічного зв'язку;  $K_{CX}$  – коефіцієнт співвідношення ємкостей у схемі генератора;  $h$  – товщина кристалічного елемента.

В осциляторних схемах, коли ПР має комплексний опір індуктивного характеру, частота генерації обумовлена як частотою послідовного резонансу, так і параметрами коливальної системи генератора:

$$f_{ГО} = \frac{1}{2(2h)} \sqrt{\frac{c_{66}}{\rho}} \left( 1 - \frac{4(2h)k_{26}^2 \epsilon_0}{\pi^2 (2\epsilon_0 h + \epsilon_{22} x)} \right) \times \left( 1 - \frac{K_{CX} S_{EL} e_{26}^2}{\sqrt{c_{66} \rho} h^2 \pi} \frac{(2h\epsilon_0)^2}{(2\epsilon_0 h + \epsilon_{22} x)^2} \right), \quad (2)$$

На рис. 2 представлені модуляційні характеристики КГ, отримані згідно рівнянь (1), (2) за умов:  $f_{КВ} = 10$  МГц,  $\chi = 2$ ,  $C_1 = 20$  пФ. Модуляція міжелектродного зазору в межах (0...200) мкм.

Забезпечений діапазон перебудови частоти в межах 60 кГц, причому використання осциляторної схеми призводить до незначного збільшення меж перебудови частоти.

Таким чином, при розробці комп'ютерної моделі КГ можливе використання співвідношення (1) у вигляді:

$$f_{ГФ}(t) = f_{КВ} \left( 1 - \frac{A}{B + C \cdot x(t)} \right), \quad (3)$$

де  $f_{КВ} = \frac{1}{2(2h)} \sqrt{\frac{c_{66}}{\rho}}$ ;  $A = 4(2h)k_{26}^2 \epsilon_0$ ;

$B = 2\pi^2 \epsilon_0 h$ ;  $C = \pi^2 \epsilon_{22}$ .

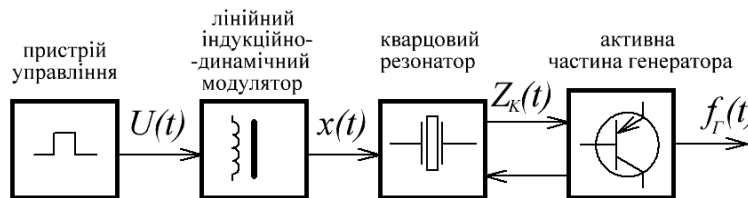


Рис. 1. Структурна схема керованого за частотою кварцового генератору

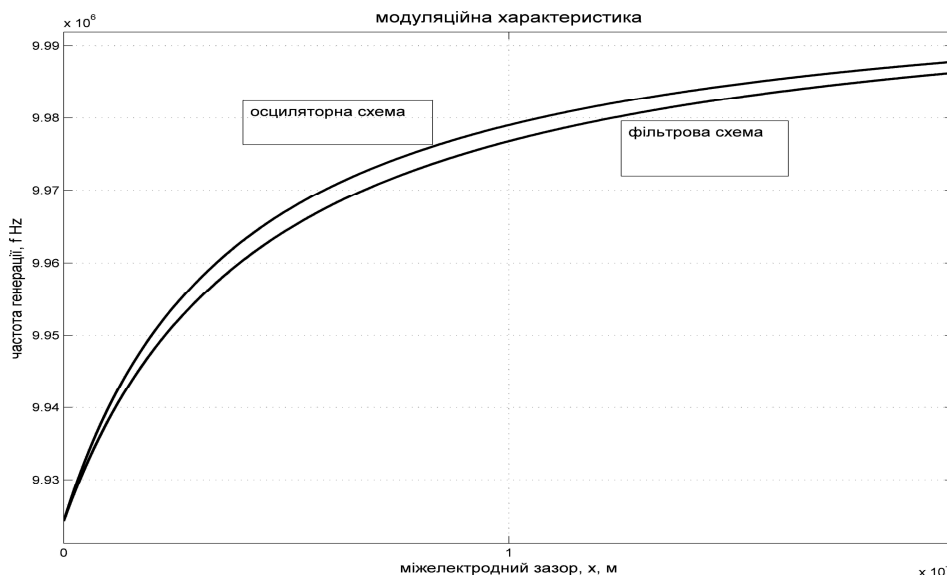


Рис. 2. Модуляційні характеристики КГ з модуляцією міжелектродного зазору

Прийняті наступні припущення:

– усі елементи перетворювача, крім індуктора і якоря, виготовлені з ізоляційного або слабопровідникового матеріалу і практично не впливають на електромагнітні процеси;

– впливом підвідних і з'єднувальних проводів знехтуємо, оскільки їхні значення можна задавати окремо при аналізі конкретного пристрою;

– усі елементи перетворювача, крім зворотної пружини, виконані абсолютно жорсткими і не деформуються в процесі роботи;

– індуктор взаємозв'язаний з масивним упором, відача якого при роботі не враховується;

– якорі і з'єднаний з ним рухомий електрод п'єзорезонансної системи відносно індуктора встановлені і переміщуються коаксіально; усі вони мають осьову симетрію. Устрій керованої ПРС з модуляцією міжелектродного зазору показаний на рис. 3.

При підключенні індуктора з параметрами  $L_1, R_1$  до джерела живлення в ньому тече струм  $i_1$ , який створює магнітне поле, що індуктує в рухомому якорі з параметрами  $L_2, R_2$  струм  $i_2$ .

За рахунок електродинамічної взаємодії відбувається переміщення якоря з рухомих електродом вздовж осі  $X$  зі швидкістю  $V$ , спричиняючи змінювання взаємної індуктивності обмоток індуктора і якоря  $M_{12}$ . Опори індуктора і якоря в процесі роботи зростають через нагрів струмом і магніторезистивний ефект.

Механічні процеси ЛІДП в загальному випадку можна описати рівняннями

$$i_1(t)i_2(t)\frac{dM(x)}{dx} = m\frac{dV(t)}{dt} + Kx(t) + BV(t), \quad (4)$$

де  $m$  – маса якоря і рухомого електроду;  $K$  – коефіцієнт пружності буферного елемента;  $x(t)$  – величина переміщення;  $B$  – коефіцієнт динамічного тертя.

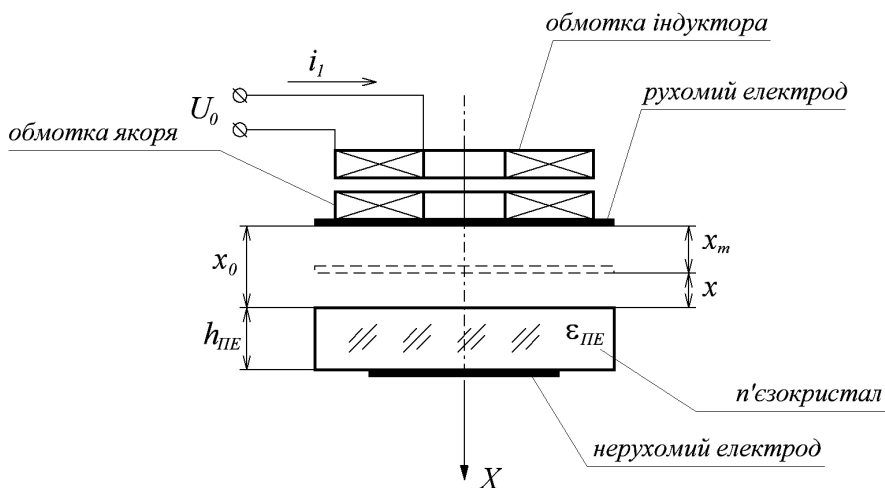


Рис. 3. Устрій п'єзорезонансного пристрою з ЛІДП

При живленні індуктора від джерела постійної напруги  $U_0$ , електричні процеси в індукторі описуються рівняннями

$$i_1(t)R_1 + L_1 \frac{di_1(t)}{dt} + M(x)\frac{di_2(t)}{dt} + i_2(t) \cdot V(t)\frac{dM(x)}{dx} = U_0; \quad (5)$$

$$L_2 \frac{di_2(t)}{dt} + M(x)\frac{di_1(t)}{dt} + i_1(t) \cdot V(t)\frac{dM(x)}{dx} + i_2(t)R_2(t) = 0. \quad (6)$$

Проведений в [5] аналіз характеру зміни взаємної індуктивності обмоток  $dM_{12}(x)/dx$  в межах робочого переміщення електроду показує можливість в подальших розрахунках прийняти похідну лінійною, тобто:

$$M(x) \approx M_0 - kx, \quad (7)$$

де початкове значення  $M_0$  та коефіцієнт пропорційності  $k$  визначаються технічними параметрами катушок на підставі інженерних розрахунків.

На підставі представлених рівнянь та параметрів в середовищі MATLAB-SIMULINK розроблена комп'ютерна модель КГ з ЛІДП, представлена на рис. 4.

Параметри:

частота послідовного резонансу п'єзорезонатора  $f_{KB} = 1$  МГц,

діаметр п'єзокристалу 12 мм,

діаметр рухомого електроду 6 мм,

кількість витків кожної з обмоток катушок  $w = 00$ ;

діаметр обмотувального дроту – 0,1 мм;

опори обмоток  $R_1=35,6$  Ом;  $R_2=33,6$  Ом;

індуктивності обмоток  $L_1=L_2=2,97$  мГн;

початкове значення взаємної індуктивності –  $M_0 = 0,326$  мГн;

коефіцієнт зниження взаємоіндуктивності  $k=1,5$ ;

вага якоря з електродом  $m = 3,92 \times 10^{-6}$  кг;

коефіцієнт пружності механічної частини  $K=0,1$  мН;

коефіцієнт динамічного тертя  $B=0,001$ .

На рис. 5 і 6 представлені результати моделювання ЛІДП – часові характеристики величини міжелектродного зазору  $x(t)$ , струмів у обмотках індуктора та якоря  $i_1(t), i_2(t)$  при збудженні обмотки індуктора від джерела прямокутних імпульсів з амплітудою  $U_0 = 4,5$  В, частотою  $f_0 = 6,67$  кГц, шпаруватістю  $q = 2$ .

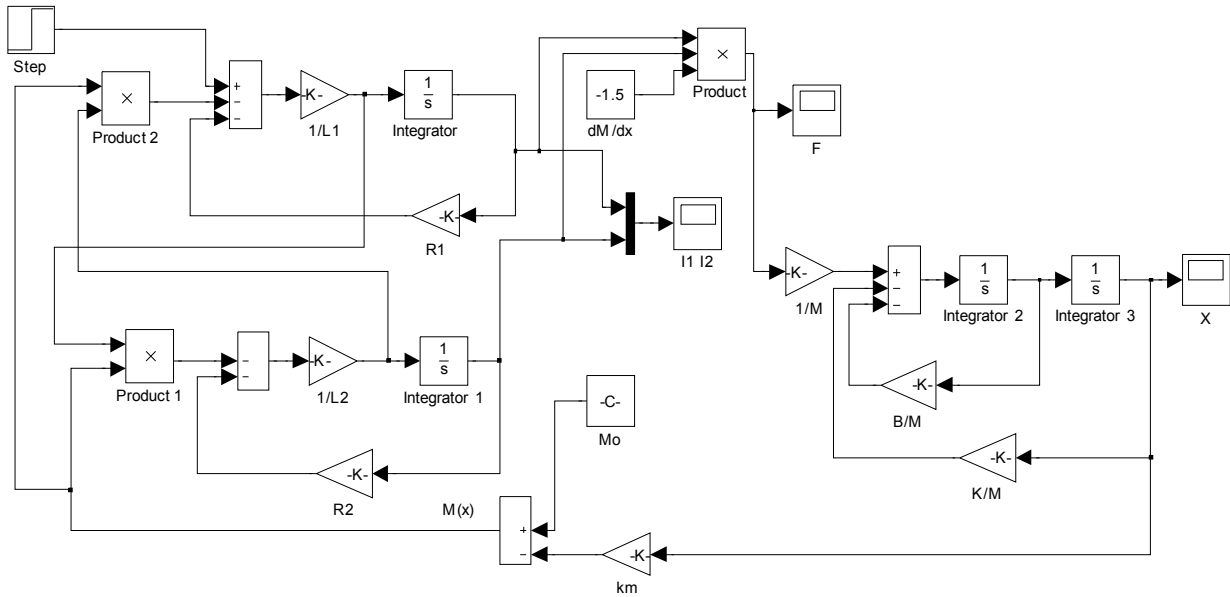


Рис. 4. Комп'ютерна модель КГ з лінійного індукційно-динамічним модулятором

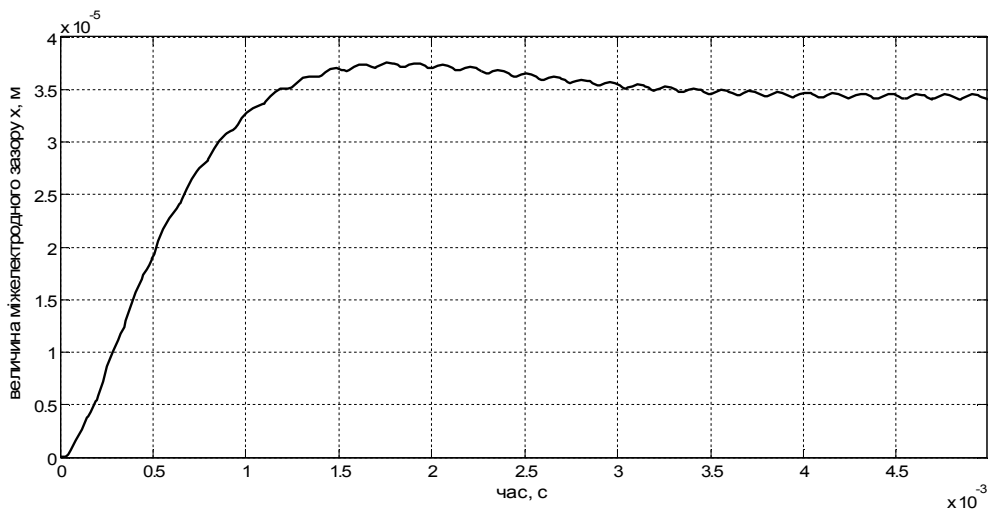


Рис. 5. Часова характеристика встановлення міжелектродного зазору в КГ з ЛІДП

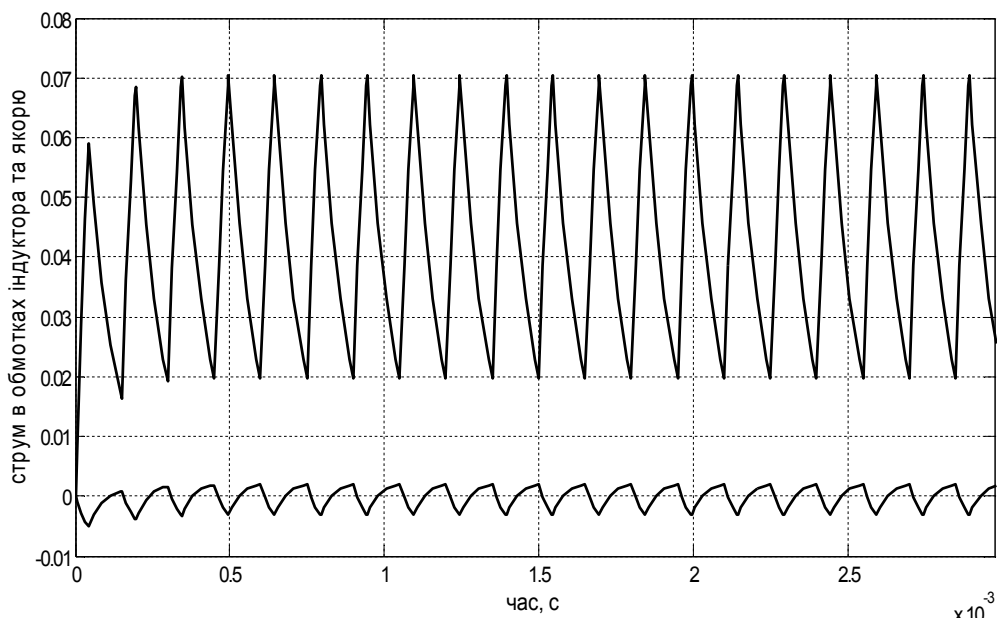


Рис. 6. Часова характеристика струмів обмоток індуктора та якорю модулятора КГ з ЛІДП

Як видно, час позиціонування рухомого електроду складає 3 мс, рівень пульсації вихідної координати не перевищує 3%, діюче значення струму в обмотці індуктора дорівнює 45 мА.

Модуль розрахунку вихідної частоти генератору згідно рівняння (3) представлений на рис. 7.

У відповідності з відомими співвідношеннями [2] для КР з частотою  $f_{\text{КВ0}} = 1$  МГц, отримано:

$$A = 1,264 \times 10^{-15};$$

$$B = 1,695 \times 10^{-13};$$

$$C = 3,87 \times 10^{-12}.$$

На рис. 8 представлені результати моделювання керованого за частотою кварцового генератору з ЛДП при амплітуді імпульсів  $U_0 = 4,5$  В, частоті імпульсів  $f_0 = 6,67$  кГц та трьох величин шпаруватості  $q_1 = 5$ ;  $q_2 = 2$ ;  $q_3 = 1,45$ .

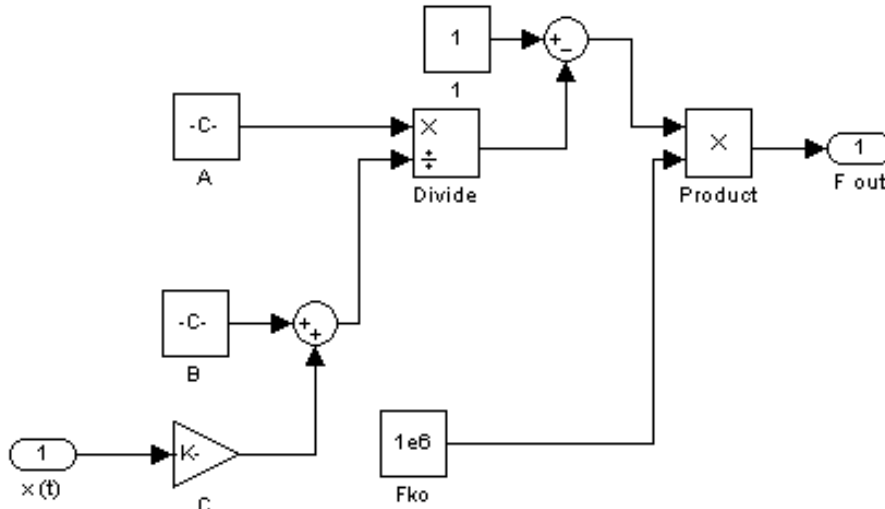


Рис. 7. Модуль розрахунку вихідної частоти генератору  $f(t)$

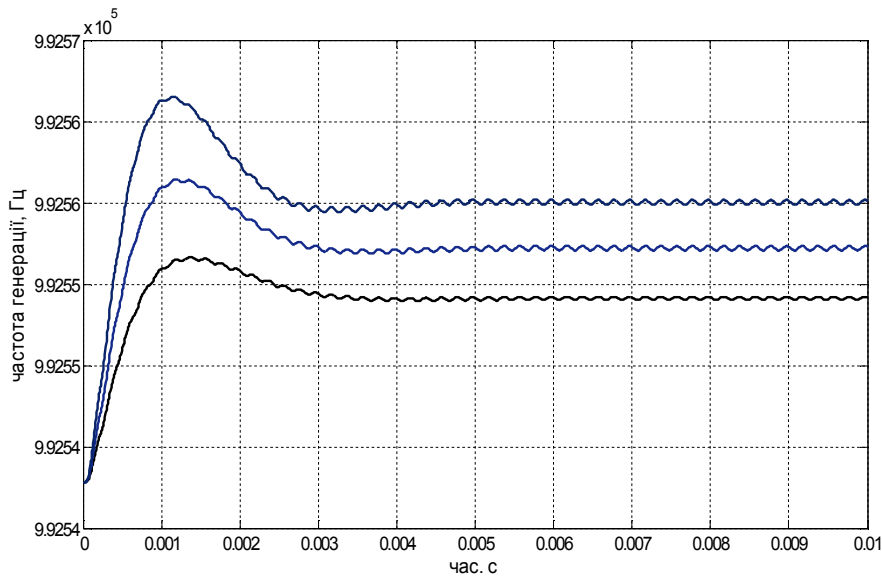


Рис. 8. Часова характеристика встановлення частоти КГ для різних значень шпаруватості імпульсів збудження ЛДП

При моделюванні змінювалася шпаруватість імпульсів збудження індуктора при сталій амплітуді та частоті. Підвищення коефіцієнту заповнення імпульсів призводить до значного підвищення перерегулювання частоти, що є вкрай небажаним для радіотехнічної системи. Тобто, потрібен спеціальний алгоритм управління впливу як на шпаруватість, так і на частоту імпульсів збудження. Крім того заслуговує уваги оптимізація параметрів обмоток індуктора та якорю в

частині отримання мінімальної електромагнітної сталої часу встановлення частоти КГ при збереженні енергетичних характеристик, що дозволить підвищити швидкість встановлення частоти генератору.

### Висновки

Розроблена комп'ютерна модель КГ з безпосереднім управлінням частотою модуляцією міжелектродного зазору лінійним індукційно-динамічним

модулятором дозволяє враховувати особливості нелінійної системи та досліджувати динамічні властивості пристрою при різноманітних типах керуючого впливу та наявності завод. Це важливо при оптимізації системи управління і отримання високої якості регулювання частоти та отримання заданої швидкості встановлення частоти.

### Список літератури

1. Акулиничев А.А. Кварцевый частотный модулятор с подвижным микроэлектродом управляемой геометрии. [Текст] / А.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 [Текст] / С.В. Хуторненко, Д.А. Семенець // Наукові праці ДонНТУ – серія гірничо-електромеханічна. – 2011. – № 21(189). – С. 159-167.
3. Хуторненко С.В. Толицинно - сдвиговые колебания пьезорезонансных элементов датчиков технологических параметров [Текст] / С.В. Хуторненко // Технология приборостроения – 1996. – № 1. – С. 24-27.
4. Альтиуллер Г.Б. Управление частотой кварцевых генераторов [Текст] / Г.Б. Альтиуллер. – М.: Связь, 1975. – 304 с.
5. Пьезорезонансные механотроны в измерениях параметров сердечно-сосудистой системы человека. [Текст] / Ф.Ф. Колпаков, С.К. Пидченко, А.А. Таранчук, А.Е. Опольская // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2009. – № 2(36). – С. 87-95.
6. Болюх В.Ф. Лінійні електромеханічні перетворювачі імпульсної дії. - Монографія. [Текст] / В.Ф. Болюх, В.Г. Данько. – Х.: НТУ «ХПИ», 2006. – 260 с.

Надійшла до редколегії 12.10.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.М. Фоменко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

### МОДЕЛЮВАННЯ П'ЄЗОРЕЗОНАНСНОГО ПРИСТРОЮ З УПРАВЛІННЯМ ЧАСТОТИ ЛІНІЙНИМ ІНДУКЦІЙНО-ДИНАМІЧНИМ МОДУЛЯТОРОМ

С.В. Хуторненко, Д.А. Семенець

Предложена компьютерная модель пьезорезонансного устройства с непосредственным управлением частотой модуляцией межэлектродного зазора линейным индукционно динамическим преобразователем.

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

### WILL BUILD ON THE DESIGN OF П'ЄЗОРЕЗОНАНСНОГО WITH THE MANAGEMENT OF FREQUENCY LINEAR INDUCTION DYNAMIC MODULYATOROM

S.V. Khutornenko, D.A. Semenech

The computer model of piezoresonators device is offered with a direct management frequency by modulation of workpiece-to-electrode a linear induction dynamic transformer.

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