

ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРА НВЧ З РЕЗОНАТОРОМ ТА ЛІНІЄЮ ЗАТРИМКИ НА МАГНІТОСТАТИЧНИХ ХВИЛЯХ

*Кудінов Є.В., к.т.н., ст. наук. співробітник
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна*

Генератори НВЧ з електричним перестроюванням частоти, що використовують частотозадаючі елементи (ЧЗЕ) на основі магнітостатичних хвиль (МСХ) в епітаксіальних феритових плівках, такі як резонатори та лінії затримки, відрізняються поєднанням низького рівня фазових шумів із значним діапазоном електричного перестроювання частоти, високою технологічністю виготовлення, малим розсіюванням потужності в керуючих колах. Це дозволяє їм успішно конкурувати з найближчими аналогами, як то генераторами на сферах з залізо-ітрієвого фериту-гранату.

Постановка задачі

Розробка пристроїв на основі МСХ в епітаксіальних плівках, а також оптимізація їх електричних характеристик створює потребу в дослідженні як окремих елементів пристроїв так і пристроїв в цілому. Результати теоретичного та експериментального дослідження резонаторів та ліній затримки на основі МСХ представлені, зокрема, в роботах [1-3]. При виконанні цієї роботи ставилась задача розробки методики теоретичного дослідження МСХ генератора з перестроюванням по частоті, побудованого за кільцевою схемою, у стаціонарному режимі.

Модель генератора

Генератори на МСХ належать до автогенераторів із зворотнім зв'язком що запізнюється. Процеси у таких системах описуються нелінійними диференціальними рівняннями з аргументом із затримкою [4]. В загальному випадку такі рівняння аналітично не вирішуються. В МСХ генераторах, як в генераторах із зворотнім зв'язком що запізнюється, за деяких умов можливий режим багаточастотної генерації [5]. Для знаходження спектра сталого полігармонічного коливання МСХ генератора з перестроюванням, при моделюванні процесу генерації був використаний метод гармонічного балансу [6].

У колі зворотного зв'язку генератора можуть бути як елементи з характеристиками мінімально-фазового кола (резонатори, вузькосмугові перетворювачі), так і елементи, що мають значний час затримки. Тому в узагальнену модель МСХ генератора увійшли елементи обох зазначених типів, рис. 1.

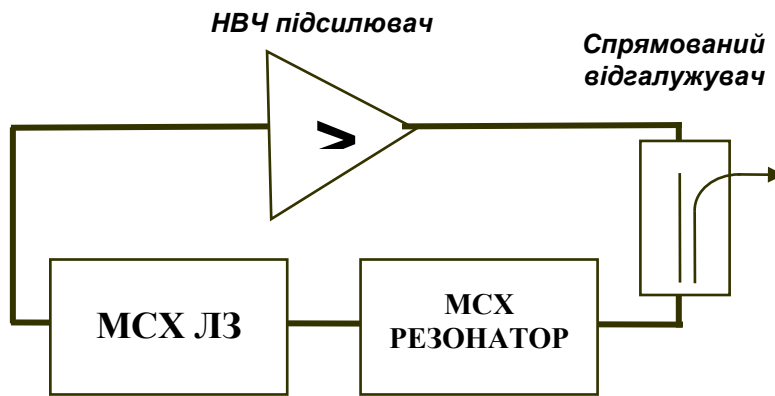


Рис. 1 Модель МСХ генератора за кільцевою схемою

Тобто модель генератора включає у себе: безінерційний підсилювач з нелінійною функцією передачі, що у розрахунках апроксимується поліномом п'ятого порядку, вузькосмуговий МСХ фільтр або резонатор із заданою комплексною функцією

передачі. До контуру генератора включено також широкосмугову ЛЗ на МСХ з відповідним комплексним коефіцієнтом передачі. Таким чином було враховано усі основні характеристики МСХ генератора: нелінійність (підсилювач), дисперсія (ЛЗ та резонатор), та затримка у підсилювачі, у з'єднувальних лініях і спрямованому відгалужувачі. Елементи кола генератора вважались узгодженими, тому замість хвильової моделі генератора було використано модель на зосереджених елементах і рішення для стаціонарного режиму було знайдено з використанням рівнянь балансу амплітуд та фаз. Вони відповідно мали вигляд:

$$R(\omega) * I(\omega) * G(\omega) \geq 1 \quad (1)$$

$$\omega_n t_i + L * k_n(\omega_n, H_e) + [\omega_n - \omega_0(H_e)] * T = 2\pi m \quad (2)$$

де: $R(\omega)$, $I(\omega)$, $G(\omega)$ – функції передачі МСХ резонатора, лінії затримки та підсилювача відповідно; ω_n – власні частоти системи; t_n – час затримки у підсилювачі та з'єднувальних лініях; $k_n(\omega_n, H_e)$ – хвильове число МСХ, що розповсюджується у ЛЗ на власній частоті; $\omega_0(H_e)$ – центральна частота резонатора на МСХ у полі підмагнічування; m – ціле число; $T = \partial\varphi / \partial\omega$ – крутизна ФЧХ резонатора.

Вирішуючи трансцендентне рівняння (2) отримуємо сукупність власних частот системи ω_n . Далі зі всієї множини цих частот збудження коливань можливо, але не обов'язкове збудження тільки на тих з них, які попадають у смугу збудження. Смуга збудження ω_z визначається відповідно до умови балансу амплітуд (1) записаного у дещо зміненому вигляді:

$$R\left(\omega_0 \pm \frac{1}{2} \omega_s\right) * I(\omega_0) * G(\omega_0) = 1 \quad (3)$$

Для визначення спектрального складу коливання, що генерується, вва-

жаємо, що у початковий момент часу на вході кола генератора присутні коливання на власних частотах системи, наприклад обумовлені тепловим шумом. Завдяки проходженню через коло генератора ці коливання набувають деякого приросту (або зменшення) і знову попадають у ту саму точку. І цей процес циклічного обходу кола генератора продовжується до встановлення стаціонарних коливань.

Відповідно з цим, програма аналізу моделі генератора зводилась до послідовності таких дій.

1. Обираємо початкові умови, до яких належать деякі характеристики ЧЗЕ (ЛЗ та резонатор) на основі МСХ та НВЧ підсилювача.

2. Обираємо конкретне значення поля підмагнічування H_e .

3. Визначаємо центральну частоту резонатора $\omega_0(H_e)$.

4. Використовуючи відомі значення втрат у резонаторі і ЛЗ та смуги пропускання резонатора $\Delta\omega$ розраховуємо смугу збудження системи Ω_3 :

$$\omega_\zeta = \Delta\omega \sqrt{\frac{1}{0.346} \ln \left[(I(\omega_0)R(\omega_0)G(\omega_0))^{-1} \right]} \quad (4).$$

5. Розв'язуючи трансцендентне рівняння балансу фаз (2) із врахуванням дисперсії МСХ знаходимо власні частоти системи - ω_n . Трансцендентне рівняння приймає вигляд:

$$\omega_n t_y + \frac{L}{cd} \operatorname{arctg} \left(\frac{2c}{c^2 - 1} \right) + \left[\omega_n - \gamma \sqrt{H(H + 4\pi M) - \frac{H4\pi M}{k_0 d_0} (1 - e^{k_0 d_0})} \right] \frac{2}{\Delta\omega} = 2\pi m \quad (5)$$
$$c^2 = - \left(\frac{\gamma^2 H * 4\pi M}{\gamma^2 H^2 - \omega_n^2} + 1 \right)$$

де L – геометрична довжина ЛЗ; d – товщина феритової плівки ЛЗ; $H=(H_e-4\pi M)$ – внутрішнє поле у фериті; $4\pi M$ – намагніченість насичення фериту; d_0 – товщина феритової плівки резонатора; k_0 – хвильове число, що відповідає основному резонансу у резонаторі і для розмірного резонатора довжиною L_0 : $k_0 = \pi / L_0$; γ - гіромагнітне співвідношення.

Початковим наближенням для ω_n приймаємо значення центральної частоти резонатора ω_0 і на цьому етапі рішення визначаємо невідоме число m , округляючи ліву частину виразу (5) до найближчого цілого числа 2π . Зі всього набору власних частот системи розраховуємо ті з них, які розташовуються у смузі збудження - $\omega_{1,2,3}$. Можливим є випадок, коли у смузі збудження не потрапляє жодної власної частоти, тоді очевидно генерація відсутня.

6. Знаходимо контурні коефіцієнти підсилення, тобто коефіцієнти передачі розімкненого кола генератора на власних частотах $\omega_{1 \div 3}$:

$$K(\omega_n) = G(\omega_n)R(\omega_n)I(\omega_n) \quad (7)$$

7. Приймаємо довільні, але малі (на рівні теплового шуму підсилювача) початкові амплітуди коливань на власних частотах $\omega_{1,2,3}$.

8. Розраховуємо амплітуди та фази складових складного коливання після одноразового проходження початкового збудження по контуру генератора і визначаємо ці значення як початкове збудження.

9. Повторюємо пункт 8 до тих пір, доки відносні зміни амплітуд та фаз складових коливання не стануть незначними (менш ніж визначене мале число ε).

10. Обираємо нове значення поля підмагнічування H_e та повторюємо розрахунок спектру сталого коливання МСХ генератора (пункти 3 – 9).

За допомогою дрібних додатків поля H_e можливо достатньо докладно дослідити зміни спектру коливань, що генеруються, у діапазоні частот, що представляє інтерес.

Необхідно зазначити, що при розрахунках закладено обмеження на кількість власних частот, що потрапляють у смугу збудження – не більше трьох. Це пов'язано з тим, що на теперішній час рівняння балансу аналітично вирішені лише для трьох власних частот. Також для вирішення проблеми конкурування власних мод у колі МСХ генератора з урахуванням попереднього стану пристрою, який необхідно приймати до уваги під час розрахунків залежності частоти коливань, що генеруються, від поля підмагнічування, програма розрахунків визначає початкові амплітуди сигналів на власних частотах у кожному новому циклі розрахунків.

Результати аналізу

Числові обчислення зазначеним способом дозволили виявити ряд з характерних особливостей процесу перестроювання МСХ генератора вздовж частоти.

По-перше, під час перестроювання в широкому діапазоні можливі періодичні зриви генерації. Їх наявність та полоса частот, де відсутня генерація, залежать від співвідношення фазових зсувів обумовлених з одного боку затримкою сигналу у підсилювачі та лініях, що зв'язують елементи генератора, та крутизною фази у ЧЗЕ з іншого. Чим більше перепад фази у смузі пропускання ЧЗЕ, та чим менш час затримки сигналу у підсилювачі, тим менш зони відсутності генерації. За певного співвідношення цих параметрів коливання генеруються безперервно, але при цьому з'являються "стрибки" частоти коливань, значення яких знову ж таки має зворотну пропорційність до раніше згадуваного співвідношення. Описану особливість ілюструє рис. 2 на якому зображені характеристики перестроювання МСХ генератора вздовж частоти при різних значеннях крутизни ЧЗЕ, що регулюється довжиною ЛЗ, яка входить до складу ЧЗЕ.

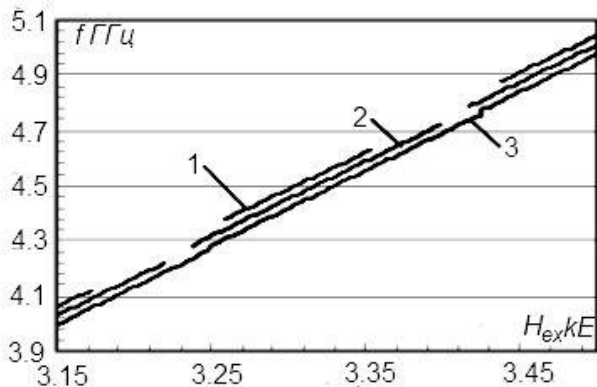


Рис.2 Залежність частоти генерації від напруженості зовнішнього магнітного поля

найбільша нерівномірність (навіть часткова відсутність) потужності вихідних коливань (крива 1). У той же час найменші відхилення амплітуди присутні за умови найбільшого значення крутизни (крива 3).

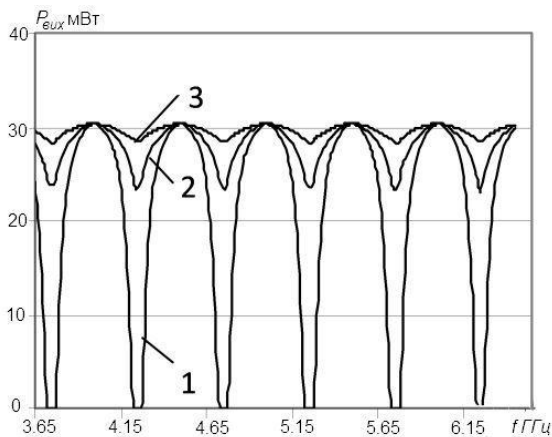


Рис. 3 Залежність потужності генератора від частоти

перш за все від смуги збудження. Також він залежить від коефіцієнтів підсилення у колі генератора на власних частотах і зростає відповідно до зростання останніх.

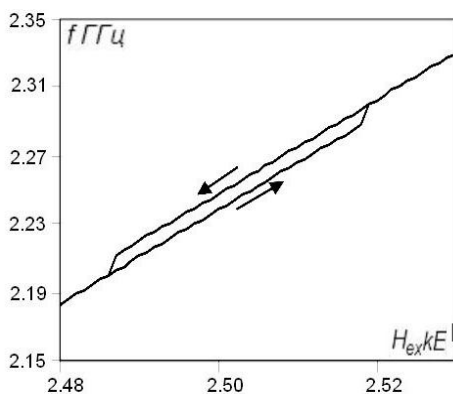


Рис. 4. Явище гістерезису при перестроюванні частоти

Довжина ЛЗ і відповідна крутизна ЧЗЕ зростають послідовно від характеристики 1 до характеристики 3, зображення яких для прозорості було зміщено одна відносно іншої вправо.

По-друге, у відповідній залежності змінюється і нерівномірність потужності коливань на виході генератора (рис. 3).

Можна побачити, що найменшій крутизні ЧЗЕ відповідає найбільша нерівномірність (навіть часткова відсутність) потужності вихідних коливань (крива 1). У той же час найменші відхилення амплітуди присутні за умови найбільшого значення крутизни (крива 3).

По-третє, у зоні, де наявні "стрибки" частоти на характеристиці перестроювання генератора, було відмічено наявність гістерезису. Сутність цього явища в тому, що перескок частоти відбувається при різних значеннях поля підмагнічування залежно від напрямку перестроювання МСХ генератора (рис. 4). Розрахунки показують, що інтервал частот, який займає гістерезис залежить

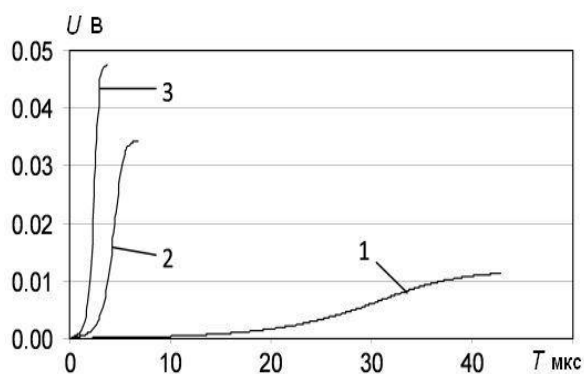


Рис. 5. Швидкість зростання амплітуди вихідного сигналу для різних значень підсилення в колі генератора

Крім того, було проаналізовано швидкість зростання амплітуди вихідного сигналу генератора у залежності від значення коефіцієнта підсилення у колі генератора (рис. 5). Розмір цього коефіцієнту змінювався за допомогою вибору різного коефіцієнту підсилення активного приладу. Так кривим 1,2,3 відповідають коефіцієнти підсилення підсилювача $G=28, 29$ та 30 , що створювало коефіцієнти підсилення у колі генератора $1\text{дБ}, 2\text{дБ}$ та 3дБ відповідно.

Результати розрахунків було перевірено експериментально з використанням макету МСХ генератора. Цей макет мав ЧЗЕ на основі зв'язаних розмірних МСХ резонаторів. Смуга пропускання такого ЧЗЕ складає $\Delta F=4.5$ МГц за рівнем -3 дБ, а приріст фази в смузі збудження досягає значення $\Delta\phi=340^\circ$. Спостерігалось добре співпадіння експериментальних даних та результатів розрахунків.

Висновки

Запропонована модель та розроблена методика дослідження МСХ генератора відзначається тим, що чисельний аналіз моделі генератора відбиває реальні процеси встановлення коливань в МСХ генераторі. Це дає можливість дослідження як стаціонарних режимів так і режимів встановлення коливань.

Література

1. Кудінов Є.В. Математична модель лінії затримки на основі магнітостатичних хвиль// Вісник НТУУ "КПІ". Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування – 2010, №43
2. Кудінов Є.В. Плівкові дискові резонатори на основі магнітостатичних коливань для генераторів НВЧ// Вісник НТУУ "КПІ". Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування – 2011, №44
3. Балінський М.Г., Кудінов Є.В. Прямокутні плівкові резонатори на основі магнітостатичних хвиль для генераторів НВЧ// Вісник НТУУ "КПІ". Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування – 2011, №46
4. Горелик Г.С. К теории запаздывающей обратной связи. ЖТФ. – 1939. - №5, с. 853-856.
5. Панкратов В.С. Стационарные режимы автогенератора с запаздывающей обратной связью. Известия ВУЗов МВ и ССО СССР, сер. Радиотехника. – 1958. - №6, с.705-713.
6. Дихтяр В.Б. Анализ влияния формы частотной характеристики и усиления на тип колебаний, формируемых автогенераторами с запаздывающей обратной связью. Радиотехника и электроника. – 1977. - №5, с. 969-977.

Кудінов Є.В. Дослідження генератора НВЧ з резонатором та лінією затримки на магнітостатичних хвилях. Досліджено модель побудованого по кільцевій схемі МСХ генератора з використанням в якості частото задаючих елементів резонатора та лінії затримки на основі магнітостатичних хвиль в епітаксильній феритовій плівці. Визначені особливості характеристик такого генератора обумовлені тим, що він є автогенератором із зворотнім зв'язком, що запізнюється. Застосована методика дослідження МСХ генератора відзначається тим, що чисельний аналіз моделі генератора відбиває реальні процеси встановлення коливань в МСХ генераторі. Це дає можливість дослідження як стаціонарних режимів так і режимів встановлення коливань.

Ключові слова: генератори НВЧ, магнітостатичні хвилі, резонатори, лінії затримки, зворотній зв'язок, що запізнюється

Кудинов Е.В. Исследование генератора СВЧ с резонатором и линией задержки на магнитостатических волнах. Исследована модель построенного по кольцевой схеме МСВ генератора с использованием в качестве частото задающих элементов резонатора и линии задержки на основе магнитостатических волн в эпитаксиальной ферритовой пленке. Определены особенности характеристик такого генератора обусловленные тем, что это автогенератор с запаздывающей обратной связью. Примененная методика исследования МСВ генератора отличается тем, что численный анализ модели генератора отражает реальные процессы установления колебаний в МСВ генераторе. Это дает возможность исследования, как стационарных режимов, так и режимов установления колебаний.

Ключевые слова: генераторы СВЧ, магнитостатические волны, резонаторы, линии задержки, запаздывающая обратная связь.

E. Kudinov. Investigation of the microwave generator with a resonator and delay line based on magnetostatic waves. A model was built as a ring MSW generator using as elements defining the frequency the resonator and delay line based on magnetostatic waves in epitaxial ferrite film. The features of the characteristics of the generator is due to the fact that this oscillator with delayed feedback. The applied method of investigation MSW generator is characterized in that the numerical analysis model of the process reflects the real oscillations in the MSW generator. This makes it possible to study both stationary regimes and setting modes of oscillations.

Keywords: microwave generators, magnetostatic waves, resonators, delay lines, delayed feedback

ВПЛИВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧАСТОТНО-ВИБІРКОВИХ МІКРОХВИЛЬОВИХ ПРИСТРОЇВ ПАРАМЕТРІВ ВКЛЮЧЕННЯ

*Кузьменко О.М. аспірантка; Мірських Г.О., к.т.н. доцент;
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна*

Відомо, що характеристики мікрохвильових пристроїв (МП) залежать від параметрів тракту, в якому ці пристрої використовуються [1]. Проте, як правило, проектування, тестування та налагодження МП ґрунтуються на умові їх ідеального узгодження, тобто не передбачають можливі спотворення характеристик пристрою у складі реального тракту з неідеалізованими параметрами. При цьому задовільне та прогнозоване функціонування МП вимагає врахування цих параметрів, особливо, при існуючій на сьогодні тенденції проектування та експлуатації МП у різних (по відношенню до тракту) умовах.

Матричні методи аналізу [2] дають змогу отримати спотворені характеристики, але лише за умови точно визначених та фіксованих значень параметрів включення (параметрів тракту, перерахованих до опорних (референсних) площин, відносно яких визначаються характеристики МП). Але, оскільки інформація про параметри включення на етапі проектування є недостовірною, неповною (або відсутньою взагалі), принциповим є отримання характеристик, котрі носять узагальнюючий характер - не потребують точного визначення значень цих параметрів. Для досягнення цієї мети раціонально застосувати імітаційне моделювання МП, котре передбачає імітацію ввімкнення пристрою до тракту із довільними параметрами включення. Для побудови відповідної імітаційної моделі нами пропонується рандомізація параметрів включення - подання їх значень у вигляді множин, що містять розподілені за обґрунтовано обраним законом (рівномірним, нормальним тощо) значення. Сукупність згенерованих відповідно до такого принципу значень у роботі [3] названо узагальнюючими множинами.

Вибір закону розподілення, залежить від особливостей тракту, способу ввімкнення МП в тракт (безпосередньо чи з допомогою додаткових відрізків ліній передач), первісної інформації стосовно можливих варіантів застосування пристрою тощо.

Реалізація імітаційного моделювання передбачає отримання розрахункової моделі (РМ) пристрою, що дозволяє підключити до входів/виходів МП довільні навантаження. При цьому, РМ не повинна вимагати значних розрахункових потужностей, що у випадку багатоітераційності процесу моделювання є принциповим.