

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА РАДІОЕЛЕКТРОННЕ АПАРАТОБУДУВАННЯ

УДК 615.471:616

С. М. Перегудов, к. т. н.;

О. П. Яненко, д. т. н., проф.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КВАЗІГАРМОНІЧНОГО ГЕНЕРАТОРА ММ-ДІАПАЗОНУ ДЛЯ БІОМЕДИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

Застосовуючи біомедичну генерувальну апаратуру мм-діапазону, спостерігається стійка тенденція до зниження її вихідної потужності. Розроблені пристрої суттєво доповнюють генератор квазігармонічних сигналів, який містить генератор шуму на лавинно-пролітному діоді та вузькосмуговий фільтр, що перестроюється. Вихідна потужність такого генератора визначається з урахуванням впливу зовнішнього навантаження. У статті цю задачу розв'язано за допомогою числових методів. Із застосуванням математичної моделі розроблено вузькосмуговий генератор низькоінтенсивного шуму мм-діапазону для біомедичного застосування. Наведено результати досліджень.

Вступ

Випромінювання мм-діапазону з інтенсивністю $10^{-12} \dots 10^{-9}$ Вт/см² знаходить широке застосування в лікувальних методиках квантової медицини [1] та дослідженні впливу електромагнітних полів на біоб'єкти [2]. При цьому використовуються генератори як шумових, так і гармонічних сигналів. Достатньо повний огляд їх зроблено авторами робіт [2, 3], причому більшість первинних джерел випромінювання характеризуються значною вихідною потужністю [3]. Зниження її (як правило, на 50...60 дБ) у відомих приладах досягається за допомогою атенуаторів. Однак, це не завжди бажано, оскільки виникає неконтрольоване поширення сигналів зовні передавального тракту через збільшення кількості фланцевих з'єднань, що знижує точність формування сигналів, ускладнюється біомедична апаратура та збільшується її вартість.

У той же час, експериментальні дослідження підтверджують резонансний характер реакції біологічних об'єктів на випромінювання мм-діапазону [1, 2]. Генератори гармонічних сигналів забезпечують можливість вибору резонансної частоти, що є їх перевагою. Однак, складність налаштування на резонанс у їх використанні збільшує час процедури лікування, а також біомедичних досліджень. Проте генератори шумових сигналів (ГШ), відмінною рисою яких є широкосмуговий спектр випромінювання, дозволяють спростити ці процеси, але відсутність можливості вибору резонансної частоти знижує ефективність їх застосування, зокрема, у лікувальному процесі. Таким чином, актуальною стає задача розроблення методу та засобу генерації електромагнітного шуму мм-діапазону в вузькій смузі частот, що перестроюється. Це можна реалізувати за допомогою ГШ, з'єднуючи його вихід зі входом фільтру, смуга робочих частот якого регулюється механічно. У мм-діапазоні довжин хвиль такий фільтр можна реалізувати на базі прохідного циліндричного резонатора з рухомою основою. Однак, слід зазначити, що застосування відомих аналітичних методів розрахунку як ГШ [3], так і фільтра [4] є дуже наближеним, що ускладнює розробку біомедичних приладів на їх основі.

Виходячи з цього, у роботі вирішується завдання розроблення математичної моделі та створення на її основі генератора вузькосмугового низькоінтенсивного шуму мм-діапазону (квазігармонічного генератора), в якому забезпечується перестроювання частоти вихідного сигналу.

Розроблення математичної моделі генератора

Генератор квазігармонічних сигналів (рис. 1) складається з генератора низькоінтенсивних шумових сигналів 1 на лавинно-пролітному діоді (ЛПД) та вузькосмугового фільтра — прохідного резонатора 2, що перестроюється [4].

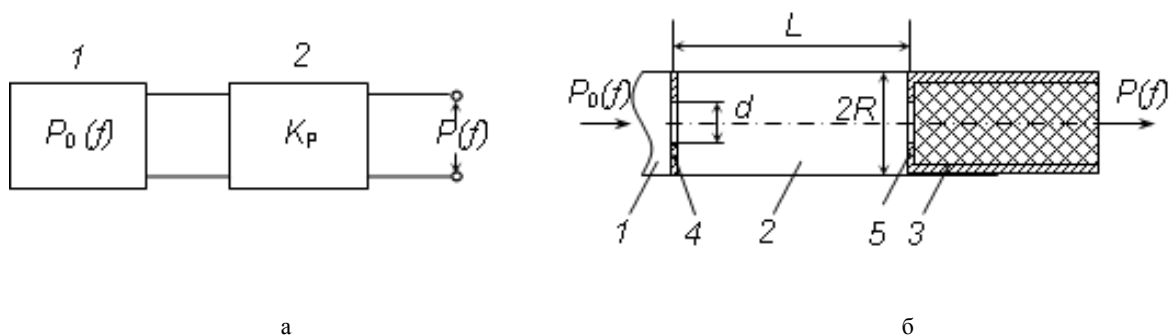


Рис. 1. Блок-схема квазігармонічного генератора (а) та його фільтра (б)

Сигнал потужності $P_0(f)$ з виходу ГШ 1 через діафрагму зв'язку 4 надходить в резонатор радіуса R , утворений циліндрами 2 і 3, які являють собою відрізки круглого хвильоводу. Циліндр 3 заповнено радіопрозорим матеріалом, що забезпечує герметичність. За допомогою зовнішнього мікрометричного гвинта циліндр 3 переміщується усередині циліндра 2, регулюючи довжину L резонатора. Діафрагма 5 зв'язує резонатор з виходом генератора.

Потужність вихідного сигналу такого генератора може бути оцінена розрахунком втрат резонатора за формулою [4]

$$A = 20 \lg \left(\left(\frac{8\pi d^3}{9\lambda_0 R \sqrt{ab}} \right)^2 \sqrt{1 - (\lambda_0/3,41R)^2} \sqrt{1 - (\lambda_0/2a)^2} \right) \text{ (дБ)},$$

де a і b — розміри перетину прямокутного хвильоводу генератора; d — діаметр отворів діафрагм 4 і 5; R — радіус резонатора 2 (рис. 1а); λ_0 — довжина хвилі у вільному просторі, що відповідає центральній частоті f_0 .

Проте така оцінка є дуже наближеною, оскільки не враховує ані впливу резонатора на характеристики ГШ, ані впливу зовнішнього навантаження (антени) на параметри самого резонатора. Тому точніший розрахунок характеристик квазігармонічного генератора потребує подальшого уточнення його математичної моделі та проведення чисельних досліджень з використанням відповідного програмного забезпечення. З погляду моделювання ГШ найприйнятнішим на сьогодні є пакет програм Ansoft HFSS v. 9-11, який дозволяє обчислити S -параметри для тривимірної структури довільної форми.

Моделюючи, ГШ подається у вигляді шестиполусного з'єднання M прямокутного хвильоводу довжиною $l_1 + l_2$ та радіальної лінії з лавинно-пролітним діодом Z_D (рис. 2а). До плечей 1–1 і 2–2 хвильоводу приєднані двополусник настроювання Z_A та зовнішнє навантаження Z_H .

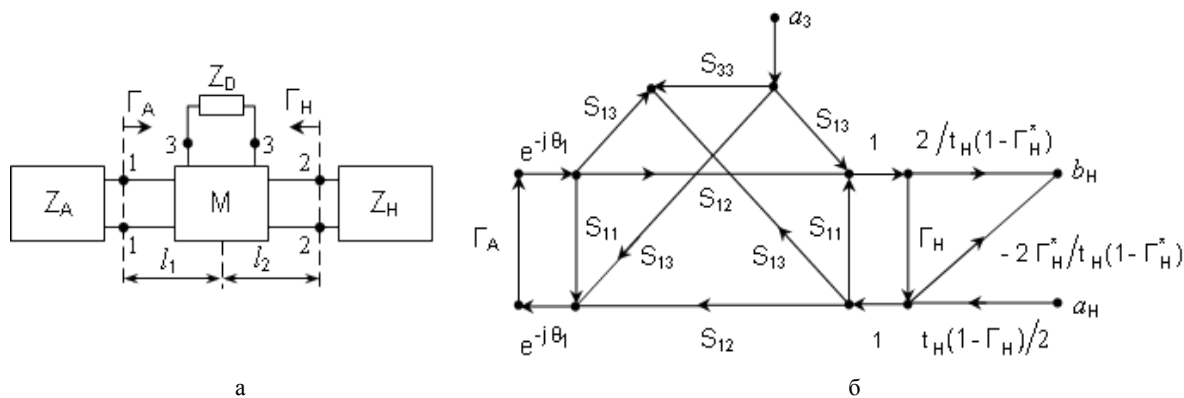


Рис. 2. Структурна схема (а) та сигнальний граф ГШ (б)

Потужність генератора визначається за формулою

$$P(f) = k T_0 N K_p \Delta f, \quad (1)$$

де k — стала Больцмана; $T_0 = 300 \text{ K}$; N — коефіцієнт шуму ЛПД у смузі робочих частот генератора Δf ; K_p — коефіцієнт передачі за потужністю від ЛПД до навантаження. Він залежить від елементів S -матриці шестиполіусника, що обчислюється за допомогою пакета Ansoft HFSS; коефіцієнта передачі відрізка хвилеводу $e^{-j\theta_1}$ (де $\theta_1 = 2\pi l_1/\lambda$, λ — довжина хвилі в хвилеводі), коефіцієнтів відбиття двополіусника настроювання Γ_A і навантаження Γ_H (з урахуванням $e^{-j\theta_2}$, де $\theta_2 = 2\pi l_2/\lambda$) та параметра $t_H = 2\sqrt{1 - |\Gamma_H|^2} / |1 - \Gamma_H|$.

Величина K_p за правилом Мезона для графа (рис. 2б) дорівнює [6]

$$K_p = \left| \frac{(1 - S_{11}\Gamma_A e^{-j2\theta_1}) (1 - |\Gamma_H|^2) + S_{12}\Gamma_A e^{-j2\theta_1}}{(1 - S_{11}\Gamma_A e^{-j2\theta_1}) (1 - S_{11}\Gamma_H) - S_{12}^2\Gamma_A\Gamma_H e^{-j2\theta_1}} \right|^2 \frac{|S_{13}|^2}{1 - |\Gamma_H|^2}. \quad (2)$$

Подальший аналіз проводиться за допомогою математичного пакета MATLAB v.6—7, формат даних якого підтримується з боку Ansoft HFSS v.9—11.

Модель дозволяє точніше розрахувати конструкцію і характеристики ГШ, ніж відомі методи, що важливо під час розробки біомедичної апаратури.

Проведені чисельні дослідження показали, що зовнішнє навантаження суттєво впливає на похибку неузгодження, тобто похибку визначення вихідної потужності, що обумовлена невизначеністю фази коефіцієнта відбиття навантаження. Як показали дослідження, похибка неузгодження зростає зі збільшенням Γ_H . Так за $|\Gamma_H| \approx 0,07$ вона складає приблизно 0,6 дБ, а для $|\Gamma_H| \approx 0,13$ — 1,1 дБ. Тому у разі підключення ГШ до хвилеводних вузлів з $|\Gamma_H| \geq 0,13$ необхідно забезпечувати електромагнітну розв'язку.

У квазігармонічному генераторі це реалізується за допомогою постійного атенюатора, величина ослаблення A якого визначається за формулою

$$A = 10 \lg \sqrt{|\Gamma_F| / |\Gamma_0|} = 5 \lg |\Gamma_F/\Gamma_0| \text{ (дБ)},$$

де Γ_F — коефіцієнт відбиття вузькосмугового фільтра ($|\Gamma_F| \approx 0,9$); Γ_0 — сумарний коефіцієнт відбиття атенюатора та фільтра ($|\Gamma_0| \approx 0,13$).

Враховуючи вищесказане, було розроблено модель вузькосмугового фільтра у вигляді круглого резонатора (рис. 3) і проведено її електродинамічне моделювання у середовищі пакета Ansoft HFSS.

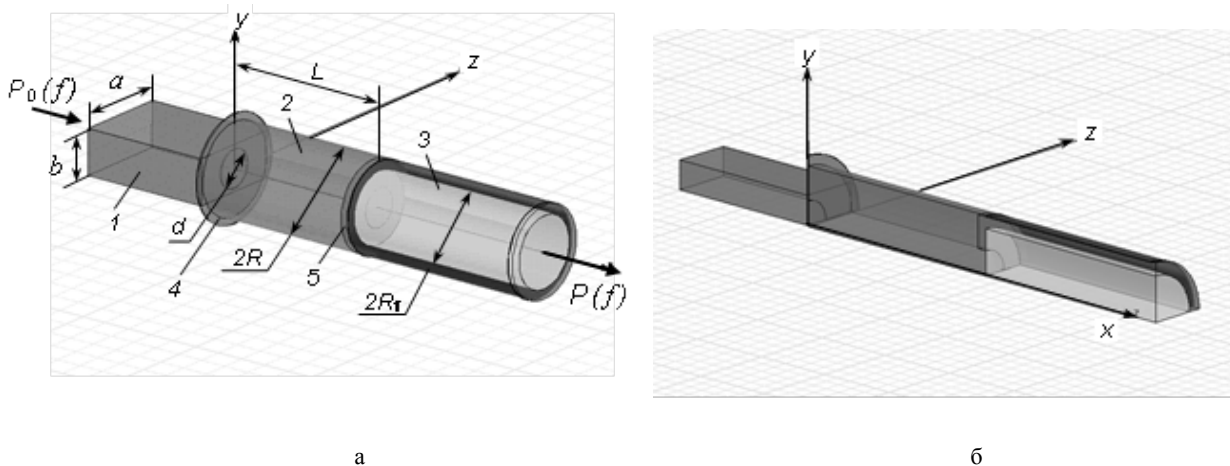


Рис. 3. Геометрична (а) та електродинамічна (б) моделі резонатора

Слід зазначити, що внаслідок аксіальної симетрії пристрою електродинамічне моделювання достатньо проводити лише для чверті геометричної моделі. Це значно (приблизно у 2 рази) зменшує час розрахунків. Згаданий програмний пакет дозволяє розрахувати всі основні параметри квазігармонічного генератора, починаючи з ГШ і закінчуючи випромінювальною антеною.

Результати досліджень та їх обговорення

У процесі моделювання отримано АЧХ квазігармонічного генератора для різних довжин L резонатора, що перестроюється. Змінюючи L від 6 до 3,2 мм, центральна частота вихідного шумового сигналу f_0 відповідно зростала від 54 до 65 ГГц. При цьому ширина смуги частот Δf не перевищувала 2,2 %, а зміна потужності вихідного сигналу — 2 дБ.

На рис. 4а, б показано результати числових (суцільні криві) та експериментальних (точки) досліджень АЧХ квазігармонічного генератора діапазону 50...70 ГГц для двох значень довжини резонатора L . Вимірювання потужності генератора проводилось за допомогою високочутливої радіометричної системи мм-діапазону. Розбіжність між експериментальними та розрахунковими за даними частотою f_0 не перевищує 1,3 %.

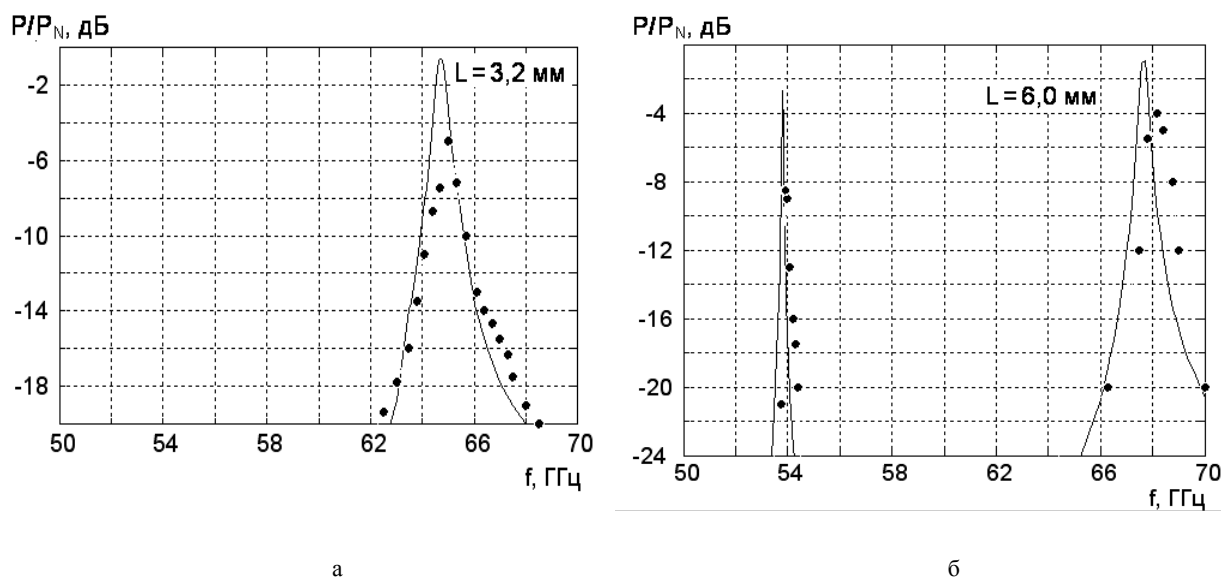


Рис. 4. Амплітудно-частотна характеристика квазігармонічного генератора для довжини резонатора 3,2 мм (а) та 6,0 мм (б); $P_N = 10^{-10}$ Вт

За потужністю результати експерименту та розрахунку також досить добре збігаються, але відрізняються на 8...10 дБ від розрахунків за формулами (1) і (2), що ще раз підкреслює доцільність використання розглянутої моделі. З урахуванням розрахованих втрат використання ГШ на ЛПД дозволяє отримати вихідну потужність не менше, ніж 10^{-11} Вт, що задовольняє вимогам до апаратури цього класу. Такі рівні потужності виключають вплив випромінювання, яке може поширюватися поза хвилеводним трактом приладу, оскільки втрати на випромінювання через стик фланців хвилеводних елементів не перевищує мінус 30 дБ від потужності ГШ.

Модель також дозволяє визначити додаткові робочі смуги хвилеводних фільтрів, які виникають завдяки збудженню вищих мод коливань (див. рис. 4б). Це слід враховувати під час розробки біомедичних генерувальних пристроїв, робочий діапазон яких визначається частотами коливань, що впливають на біологічні об'єкти. Як правило, це діапазон від 50 до 65 ГГц.

Висновки

1. Застосування розробленої моделі та використання пакету Ansoft HFSS дозволяє оптимізувати конструкцію квазігармонічного генератора і точніше розрахувати його вихідну потужність та смугу робочих частот.
2. Експериментальна перевірка отриманої моделі показала достатньо точний збіг розрахункових та вимірних параметрів генератора.
3. Проведені дослідження забезпечують можливість створення генератора для біомедичного за-

стосування, який поєднує в собі переваги генераторів як шумових, так і гармонічних сигналів, що спрощує біомедичні дослідження та підвищує ефективність лікування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ситько С. П. Введение в квантовую медицину / С. П. Ситько, Л. Н. Мкртчян. — К. : Паттерн, 1994. — 148 с.
2. Бецкий О. В. Миллиметровые волны и живые системы / О. В. Бецкий, В. В. Кислов, Н. Н. Лебедева. — М. : Сайенс-Пресс, 2004. — 272 с.
3. Ситько С. П. Аппаратурное обеспечение современных технологий квантовой медицины / С. П. Ситько, Ю. А. Скрипник, А. Ф. Яненко ; под общ. ред. С. П. Ситько. — К. : ФАДА, ЛТД, 1999. — 199 с.
4. Яненко О. П. Генератор низькоінтенсивних квазігармонічних сигналів міліметрового діапазону / О. П. Яненко, С. М. Перегудов // Вісник КНУТД. — 2008. — № 5 (43). — С. 103—107.
5. Яненко О. Моделювання генератора шуму мм-діапазону на лавинно-пролітних діодах / О. Яненко, С. Перегудов // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2007) : III міжнар. наук.-техн. конф., 31 трав.—2 черв. 2007 р. : матеріали конф. — Вінниця, 2007. — С. 138—139.

Рекомендована кафедрою телекомунікаційних систем та телебачення

Надійшла до редакції 12.01.10
Рекомендована до друку 2.02.10

Перегудов Сергій Миколайович — асистент, **Яненко Олексій Пилипович** — професор.
Кафедра радіоконструювання та виробництва радіоапаратури НТУУ «Київський політехнічний інститут»