

УЗАГАЛЬНЕНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МІКРОХВИЛЬОВОГО ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВІ РЕЗОНАНСНО ТУНЕЛЬНОГО ДІОДУ

¹ Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розглянуто узагальнену математичну модель осцилятора Лієнара мікрохвильового генератора на основі резонансно тунельного діоду. Показано можливість аналізу динамічних процесів у мікрохвильовому генераторі на основі резонансно тунельного діоду в сантиметровому діапазоні частот.

Ключові слова: мікрохвильовий генератор, математична модель, осцилятор Лієнара, від'ємний опір.

Abstract

The mathematical model of the Lienar generator of a microwave generator based on a resonant tunneling diode is considered. The possibility of analyzing dynamic processes in a microwave generator based on a resonant tunneling diode in the centimeter frequency range is shown.

Keywords: microwave oscillator, mathematical model, Lienar oscillator, negative resistance.

Вступ

Елементи з від'ємним диференціальним опором є важливими компонентами у схемах стійких генераторів мікрохвильового діапазону і утворюють фундаментальну основу для створення різних інших нелінійних НВЧ електричних кіл. Одним з найбільш перспективних приладів для надвисокочастотних застосувань є резонансно тунельний діод, завдяки застосування квантових ефектів [1].

Елемент схеми з властивістю зменшення струму при збільшенні напруги називається елементом з від'ємним диференціальним опором. Такі елементи є важливими компонентами електричних кіл стійких мікрохвильових генераторів і були предметом багатьох досліджень [1].

Елементом з від'ємним опором N-типу з найдовшою історією є тунельний діод [1]. Після його відкриття Лео Єсакі тунельний діод був центром активних досліджень в кінці 1950-х і в 1960-х роках. Однак інтерес дослідників був відвернений від тунельних діодів помітними поліпшеннями продуктивності НВЧ транзисторів, тому його роль до тепер була обмежена окремими випадками.

Нова глава в історії тунельних діодів була розпочата пропозицією Лео Єсакі про створення напівпровідникової надрешітки в 1969 році [1, 2]. До 1972 року від'ємний диференціальний опір був виявлений в надрешітках GaAs / AlAs [1, 2], а в 1974 році від'ємний диференціальний опір спостерігалось в двобар'єрних структурах [1, 2]. Ці факти свідчать про потенційні корисні явища резонансного тунелювання в якості основи для виготовлення надвисокочастотних електронних елементів. У 1991 році ця корисність була підтверджена експериментальним спостереженням стійких коливань в RTD надвисокої частоти 712 ГГц [1]. На цих високих частотах РТД реалізує свій потенціал. На сьогодні РТД застосовують для створення квантових радіотехнічних пристроїв на частотах до 10 ТГц.

Метою роботи є аналіз і обґрунтування узагальненої математичної моделі генератора Лієнара мікрохвильового генератора на основі резонансно тунельного діоду.

Результати дослідження

Еквівалентна електрична схема мікрохвильового генератора на основі резонансно тунельного діоду (РТД) подана на рис. 1. Еквівалентна схема РТД представлена ємністю, що паралельна джерелу струму, величина якого залежить від напруги $F(V)$. Резистор R і котушка індуктивності L враховують відповідно послідовний опір пристрою та індуктивність з'єднань.

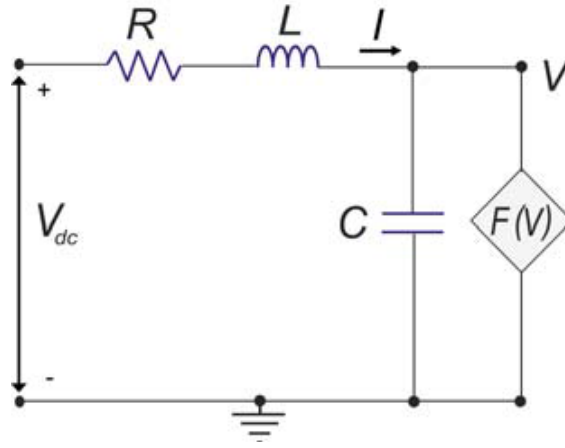


Рис. 1. Еквівалентна схема генератора Ліснара мікрохвильового діапазону на основі резонансно-тунельного діоду [2]

Загальний аналіз схеми на рис. 1, що містить РТД, враховує схему еквівалентного джерела слабкого сигналу представлена залежним від напруги джерелом $F(V)$ струму, паралельно з внутрішньою ємністю РТД C . Застосовуючи закони Кірхгофа (використовуючи закон Фарадея) до схеми на рис. 1, напруга V на ємності C і струм I через індуктивність L матимемо систему з двох диференціальних рівнянь першого порядку [2]

$$\dot{V} = \frac{1}{C} [I - F(V)], \quad (1)$$

$$\dot{I} = \frac{1}{L} (V_{dc} - RI - V), \quad (2)$$

де $F(V)$ – рівняння апроксимації нелінійної вольт-амперної характеристики РТД вигляду [2]

$$I(V) = I_{RT}(V) + I_{NR}(V) = M [J_{RT}(V) + J_{NR}(V)], \quad (3)$$

де множник M використовується для масштабування рівняння (3); $J_{NR}(V)$ - нерезонансна складова струму РТД (3), що визначається з рівняння [2]

$$I(V) = I_{RT}(V) + I_{NR}(V) = M [J_{RT}(V) + J_{NR}(V)], \quad (4)$$

а $J_{RT}(V)$ – нерезонансна складова струму РТД (3), що визначається з рівняння [2]

$$J_{RT} = \frac{qm^* k_B T \cdot \Delta E_r}{4\pi^2 \hbar^3} \ln \left[\frac{1 + e^{(E_r - E_r + qV/2)/k_B T}}{1 + e^{(E_r - E_r - qV/2)/k_B T}} \right] \cdot \left[\frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \left(\frac{E_r - qV/2}{\Delta E_r / 2} \right) \right], \quad (5)$$

де $E = E_r - qV/2$ - енергія, виміряна вгору від краю зони провідності емітера, E_r - енергія резонансного рівня відносно дна ями в її центрі, а ΔE_r - ширина резонансу [2]. Параметри q і k_B є одиничним електричним зарядом і константа Больцмана відповідно [2].

Після математичних спрощень, система диференціальних рівнянь (1)-(2) подана у вигляді [2]

$$\ddot{V} + \left[\frac{R}{L} + \frac{1}{C} \frac{dF(V)}{dV} \right] \dot{V} + \frac{1}{LC} [V - V_{dc} + RF(V)] = 0, \quad (6)$$

або

$$\ddot{V} + H(V)\dot{V} + G(V) = 0, \quad (7)$$

де

$$H(V) = \frac{R}{L} + \frac{1}{C} \frac{dF(V)}{dV}, \quad (8)$$

$$G(V) = V - V_{dc} + RF(V), \quad (9)$$

де $G(V)$ - нелінійна сила, а $H(V)\dot{V}$ - коефіцієнт демпфування.

Рівняння (7)-(9) з урахуванням рівнянь (3)-(5) є узагальненою математичною моделлю генератора Лієнара мікрохвильового генератору на основі РТД. У роботі було здійснено математичне моделювання та отримано результати. На рис. 2 наведений фазовий портрет такого генератора в площині нормованих динамічних змінних відносно струму індуктивності та напруги на ємності.

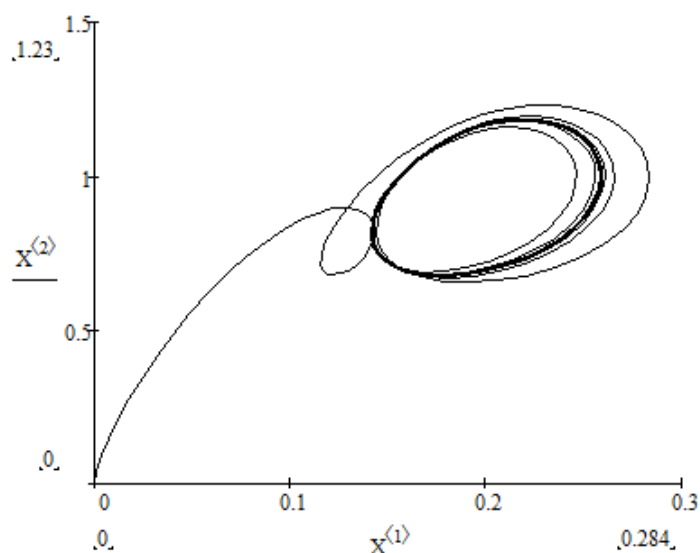


Рис. 1. Фазовий портрет осцилятора Лієнара мікрохвильового генератора діапазону на основі резонансно-тунельного діоду

Висновки

У роботі здійснено аналіз та обґрунтування узагальненої математичної моделі генератора Лієнара мікрохвильового генератору на основі резонансно тунельного діоду. Отримано результати математичного моделювання. Наведено фазовий портрет осцилятора Лієнара мікрохвильового генератора діапазону на основі резонансно-тунельного діоду.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. José Figueiredo, Bruno Romeira, Thomas Slight, Charles Ironside. Resonant Tunnelling Optoelectronic Circuits. In: Advances in Optical and Photonic Devices, ed. Ki Young Kim. 2010. pp. 171-206.
2. Koichi Maezawa. A New Generation of Negative-Resistance Devices – New Developments in Ultra-high-Frequency Applications Based on Resonant Tunneling Elements. Electronics and Communications in Japan, Part 2, Vol. 89, No. 4, 2006. pp. 29-38.

Семенов Андрій Олександрович — д-р техн. наук, доцент, професор кафедри радіотехніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: semenov.a.o@vntu.edu.ua

Квітчук Ярослав Вікторович — студент групи РТ-18м з/в, кафедра радіотехніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Савчук Павло Петрович — студент групи РТ-18м з/в, кафедра радіотехніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Semenov Andriy Oleksandrovyich — Dr. Sc. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Chair of Radio-Frequency Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: semenov.a.o@vntu.edu.ua

Kvitchuk Yaroslav Viktorovych — student of group PT-18m z/f, Departments of Radio-Frequency Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

Savchuk Pavlo Petrovych — student of group PT-18m z/f, Departments of Radio-Frequency Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia