

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ФІТЦХЬЮ-НАГУМО МІКРОХВИЛЬОВОГО ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВІ ТУНЕЛЬНОГО ДІОДУ

<sup>1</sup> Вінницький національний технічний університет

### Анотація

Розглянуто класичну математичну модель ФітцХью-Нагумо мікрохвильового генератора на основі тунельного діоду. Показано можливість аналізу нелінійних і хаотичних процесів у мікрохвильовому генераторі на основі тунельного діоду в сантиметровому діапазоні частот.

**Ключові слова:** мікрохвильовий генератор, математична модель, ФітцХью-Нагумо, динамічний хаос, від'ємний опір.

### Abstract

The classical mathematical model of FitzHugh-Nagumo microwave generator based on tunnel diode is considered. The possibility of analysis of nonlinear and chaotic processes in a microwave generator based on a tunnel diode in the centimeter frequency range is shown.

**Keywords:** microwave oscillator, mathematical model, FitzHugh-Nagumo, dynamic chaos, negative resistance.

### Вступ

Перенасичення частотних діапазонів інформаційними каналами вимагає освоєння більш високочастотних діапазонів. З підвищенням частоти вище 70 ГГц продуктивність НЕМТ істотно зменшується. На частотах вище 200 ГГц застосовувати НЕМТ не доцільно. На таких високих частотах для розробки мобільних пристроїв і засобів телекомунікацій застосовують квантові напівпровідникові елементи. Найбільшу популярність отримали резонансно-тунельні діоди. Однак резонансно-тунельні діоди мають фіксовану статичну ВАХ з дуже малим по напрузі діапазоном падаючого ділянки ВАХ. Тому немає ніякої можливості управляти параметрами пристроїв за допомогою напруги. Є обмежена можливість управляти параметрами пристроїв за допомогою зміни струму. Для управління напругою RTD використовують схеми з включенням НЕМТ. Для дослідження динаміки електричних коливань в мікрохвильових пристроях на основі РТД застосовують різні математичні моделі [1, 2].

Метою роботи є огляд та дослідження математичних моделей мікрохвильових неавтономних і автономних радіотехнічних пристроїв на основі тунельних діодів для їх практичного застосування в радіотехнічних пристроях.

### Результати дослідження

У теорії нелінійних мобільних пристроїв на основі приладів з ВАХ N-типу застосовують три відомі математичні моделі – автоколивальні системи Ван-дер-Поля, Ліенарда і ФітцХью-Нагумо (ФітцХью-Рінцеля).

Відповідно до законів Кірхгофа для прийнятих на схемі рис. 1 позначень система рівнянь рівноваги динаміки електричних коливання має вигляд [3]

$$\begin{cases} j = C \frac{dv}{d\tau} - i - f(e), \\ L \frac{di}{d\tau} + Ri = -v = e - E_0, \end{cases} \quad (1)$$

де  $f(e)$  - це функція апроксимації ВАХ тунельного діода (рис. 2,а), яка має вигляд [3]

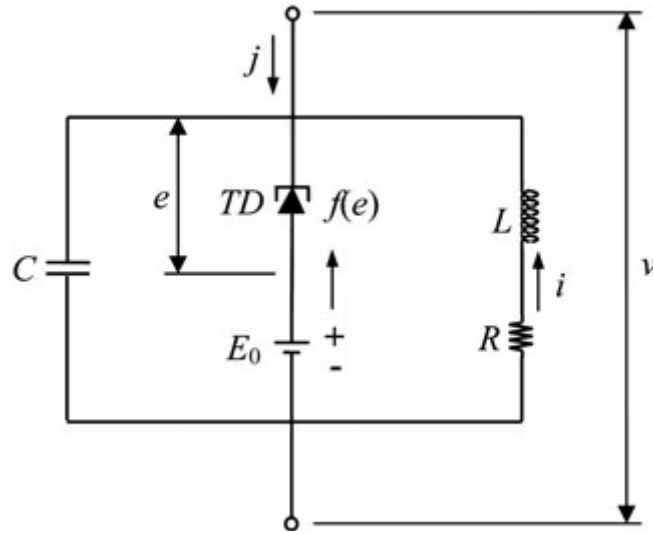


Рис. 1. Електрична схема осцилятора ФітцХью-Нагумо [3]

$$f(e) = i_0 - \frac{1}{\rho} \left[ (e - e_0) - \frac{(e - e_0)^3}{3K^2} \right], \quad (\rho > 0, K > 0), \quad (2)$$

де  $i_0 = f(e_0)$ .

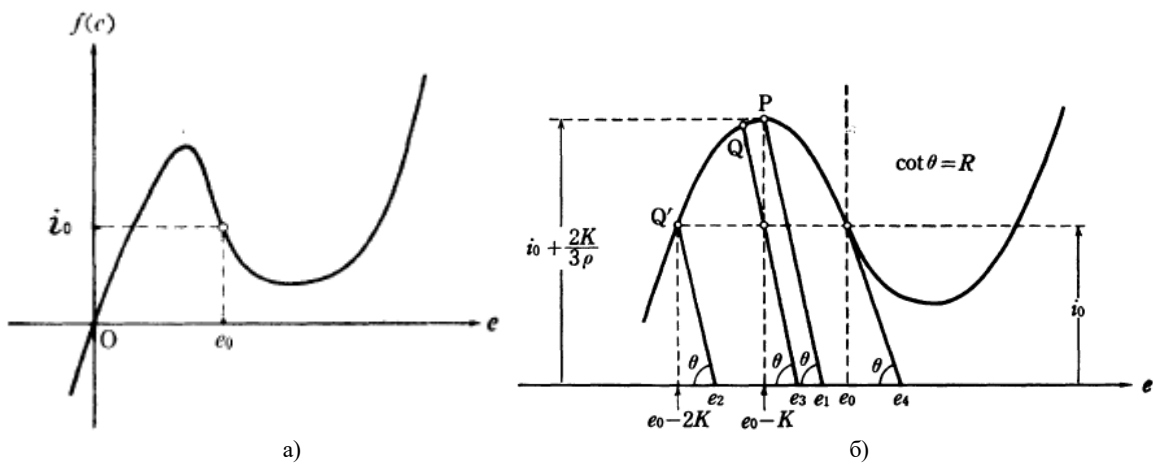


Рис. 2. Вольт-амперна характеристика тунельного діода (а) та її апроксимація степеневою функцією (б)

У нормованих змінних [3]

$$t = \frac{\tau}{\sqrt{LC}}, \quad u = \frac{v + (e_0 - E_0)}{K}, \quad w = \frac{\rho}{K}(i + i_0), \quad J = \frac{\rho}{K}j, \quad a = \frac{Ri_0 + (e_0 - E_0)}{K}, \quad b = \frac{R}{\rho}, \quad c = \frac{1}{\rho} \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (3)$$

при підстановці в систему (1) буде мати вигляд [3]

$$\begin{cases} J = \frac{1}{c} \frac{du}{dt} - w - \left( u - \frac{u^3}{3} \right), \\ c \frac{dw}{dt} + bw = a - u, \end{cases} \quad (4)$$

де коефіцієнти  $a$ ,  $b$  і  $c$  повинні виконувати співвідношення [3]

$$1 > b > 0, c^2 > b, 1 > a > 1 - \frac{2}{3}b. \quad (5)$$

Класична математична модель ФітцХью-Нагумо має вигляд [3]

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = c \left( y - x - \frac{x^3}{3} + z \right), \\ \frac{dy}{dt} = -\frac{(x - a - by)}{c}, \end{cases} \quad (6)$$

де  $a$ ,  $b$  і  $c$  - це константи, що задовольняють умовам (5),  $z$  - це інтенсивність зовнішньої дії, в першому наближенні константа, що також може мати вигляд прямокутного імпульсу або дельта-функції,  $t \in [0, T]$  - це час динамічного процесу,  $T > 0$  - це час моделювання.

### Висновки

У роботі здійснено аналіз та обґрунтування класичної математичної моделі ФітцХью-Нагумо мікрохвильового генератору на основі тунельного діоду. Отримано результати математичного моделювання. Досягнуто мету роботи – здійснено огляд та дослідження математичних моделей мікрохвильових неавтономних і автономних радіотехнічних пристроїв на основі тунельних діодів для їх практичного застосування в радіотехнічних пристроях. Розглянуто можливість дослідження нелінійних і хаотичних процесів у мікрохвильовому генераторі на основі тунельного діоду в сантиметровому діапазоні частот.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Липко О. Д. Исследование хаотических и регулярных режимов фрактального осциллятора ФитцХью-Нагумо. Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2018. № 3(23). С. 116-123. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-23-3-116-123
2. Липко О. Д. Исследование устойчивости точек покоя дробного осциллятора ФитцХью-Нагумо. Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2019. Т. 26. № 1. С. 63-70. DOI: 10.26117/2079-6641-2019-26-1-63-70
3. J. Nagumo, D. Arimoto, S. Yoshizava. An Active Transmission Line Simulating Nerve Axon. Proceedings of the IRE. Pct. 1962. pp. 2061-2070.

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

**Куляс Роман Олексійович** — аспірант кафедри радіотехніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: romakulyas94@gmail.com

**Пінаєв Богдан Олегович** — аспірант кафедри радіотехніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: pinaev.bogdam@gmail.com

**Козін Дмитро Олегович** — аспірант кафедри радіотехніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: pinaev.bogdam@gmail.com

**Semenov Andriy Oleksandrovych** — 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

**Kulyas Roman Oleksiiovych** — postgraduate student of Departments of Radio-Frequency Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: romakulyas94@gmail.com

**Pinaev Bogdan Olegovich** — postgraduate student of Departments of Radio-Frequency Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: pinaev.bogdam@gmail.com

**Kozin Dmytro Olegovich** — postgraduate student of Departments of Radio-Frequency Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: dimakoua@gmail.com