

Технічні науки

УДК 657

Григор'єва Ольга Володимирівна

старший викладач

Харківський національний університет радіоелектроніки

Hryhorieva Olha

Senior Lecturer

Kharkiv National University of Radio Electronics

Меняйло Олександр Дмитрович

кандидат технічних наук, доцент

Харківський національний університет радіоелектроніки

Meniailo Oleksandr

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Kharkiv National University of Radio Electronics

Нестеров Дмитро Олександрович

здобувач вищої освіти ступеня магістр

Харківського національного університету радіоелектроніки

Nesterov Dmytro

Master's degree Student of higher education of the

Kharkiv National University of Radio Electronics

ДИСКРИМИНАТОР ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ШУМОВИХ

ПАРАМЕТРІВ ГЕНЕРАТОРІВ НВЧ

DISCRIMINATOR FOR STUDYING THE NOISE PARAMETERS OF

MICROWAVE GENERATORS

Анотація. Вступ. Досить часто для побудови дискримінаторів використовується модель на розстроєних контурах. Враховуючи

застосування дискримінатора на надвисоких частотах для його побудови доцільно, застосувати об’ємні резонатори спеціальної конструкції.

Існує велика кількість конструкцій об’ємних резонаторів різноманітного призначення, зокрема для використання в генераторах, підсилювачах, фільтрах, для вимірювання параметрів матеріалів, для технологічних установок НВЧ енергетики та таке інше. Геометричну форму резонатора і тип коливань обирають виходячи з технологічності виготовлення резонатора, можливості настройки, отримання максимальної добротності і бажаної конфігурації поля. В нашому випадку, для технічної реалізації був вибраний циліндричний резонатор, що працює на подвійному типу коливань TE_{111} .

Мета. Метою дослідження є розробка дискримінатора на базі циліндричного резонатора, що працює на подвійному типі хвилі TE , а також дослідження можливостей його застосування при вивченні шумових властивостей діодних генераторів НВЧ.

Матеріали і методи. Матеріалами дослідження є: 1) конструкторсько-технологічна документація на виготовлення дослідного зразку дискримінатора, вимірювальні прилади та методика по їх використанню. 2) праці вітчизняних та зарубіжних авторів, що провадять свої науково-практичні дослідження по особливостях застосуванню дискримінаторів при дослідженнях сигналів взагалі і шумових сигналів генераторів НВЧ зокрема.

В процесі здійснення дослідження було використано наступні наукові методи: теоретичного узагальнення та групування (для визначення параметрів складових частин дискримінатора та прогнозування його характеристик, підбору комплексу контрольних-вимірювальних пристроїв); формалізації, аналізу та синтезу (для побудови схеми електричних з’єднань та розробки конструкторсько-технологічної документації) ; логічного узагальнення результатів (формулювання висновків).

Результати. У науковій статті наведені результати теоретичного аналізу можливостей застосування частотного та амплітудного дискримінаторів при дослідженнях шумових властивостей генераторів НВЧ. Запропоновано конструктивне рішення дискримінатора, що базується на застосуванні циліндричного резонатора, що працює на подвійному типу хвилі TE_{111} , показана можливість його застосування для дослідження шумових характеристик генераторів НВЧ.

Перспективи. В подальших наукових дослідженнях пропонується зосередити увагу на більш детальне вивчення характеристик дискримінатора, спрощенню процесу його налаштування та підвищення чутливості. Це дасть змогу розширити коло його застосування, покращити оперативність та зручність використання.

Ключові слова: дискримінатор, шум, амплітудна модуляція, частотна модуляція, спектр сигналів, циліндричний резонатор.

Summary. *Introduction.* Quite often, a model on detuned circuits is used to construct discriminators. Taking into account the use of a discriminator at ultrahigh frequencies, it is advisable to use volume resonators of a special design for its construction.

There is a large number of designs of bulk resonators for various purposes, in particular for use in generators, amplifiers, filters, for measuring the parameters of materials, for technological installations of microwave energy, etc. The geometric shape of the resonator and the type of oscillation are chosen based on the manufacturability of the resonator, the possibility of tuning, obtaining the maximum quality factor and the desired field configuration. In our case, a cylindrical resonator operating on the TE_{111} double oscillation type was chosen for technical implementation.

Objective. The aim of the study is to develop a discriminator based on a cylindrical resonator operating on a dual TE wave type, as well as to investigate

the possibilities of its application in the study of the noise properties of microwave diode generators.

Materials and methods. The materials of the study are: 1) design and technological documentation for the manufacture of a prototype discriminator, measuring instruments and methods for their use. 2) works of domestic and foreign authors conducting their scientific and practical research on the peculiarities of using discriminators in the study of signals in general and noise signals of microwave generators in particular.

In the course of the study, the following scientific methods were used: theoretical generalisation and grouping (to determine the parameters of the discriminator components and predict its characteristics, select a set of control and measuring devices); formalisation, analysis and synthesis (to build a circuit of electrical connections and develop design and technological documentation); logical generalisation of results (formulation of conclusions).

Results. The paper presents the results of a theoretical analysis of the possibilities of using frequency and amplitude discriminators in the study of the noise properties of microwave generators. A constructive solution of the discriminator based on the use of a cylindrical resonator operating on the TE_{111} double wave type is proposed, and the possibility of its application to study the noise characteristics of microwave generators is shown.

Prospects. In future research, it is proposed to focus on a more detailed study of the characteristics of the discriminator, simplifying the process of its adjustment and increasing its sensitivity. This will make it possible to expand the range of its application, improve efficiency and ease of use.

Key words: *discriminator, noise, amplitude modulation, frequency modulation, signal spectrum, cylindrical resonator.*

Постановка проблеми. В сучасних радіотехнічних пристроях досить часто використовуються різноманітні дискримінатори. Найчастіше для

побудови дискримінаторів використовується модель на розстроєних контурах, але на надвисоких частотах для його побудови доцільно застосувати об'ємні резонатори спеціальної конструкції.

Геометричну форму резонатора і тип коливань обирають виходячи з технологічності виготовлення резонатора, можливості настройки, отримання максимальної добротності і бажаної конфігурації поля. В даній роботі вирішувалась проблема застосування циліндричного резонатора, що працює на подвійному типу хвилі TE_{111} для створення частотного та амплітудного дискримінатора для дослідження шумових властивостей генераторів НВЧ Х-діапазону.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основний фундамент досліджень шумових властивостей генераторів НВЧ був закладений вченими М.Е. Hinse [1] та J.J. Goedbloed [2], які показали природу виникнення та особливостей аналізу шумових компонент генераторів НВЧ. Т. Misawa [3] започаткував аналіз шумових властивостей напівпровідникових генераторів на діодах, що мають характеристику з негативним опором. Сучасні дослідження параметрів та стабільності генераторів з резонатором прохідного типу були проведені Сили І.І. Черенков А.Д. [4]. Параметри и стабільність частоти діодного генератора с резонатором прохідного типу, а також математичне моделювання генератора НВЧ на основі транзисторної структури з від'ємним опором провів Осадчук О. В. [5] Теоретичні дослідження, присвячені питанням апроксимації двохелектродної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором розглянуті в роботі Семенова А. О. [8] Певні загальні питання аналізу діодних генераторів НВЧ, їх шумових властивостей та пристроїв для відповідних досліджень розглядаються навіть в учбових виданнях [6; 7]. Особливостям побудови частотних дискримінаторів присвячені роботи [9; 10; 11]. В цих роботах основна увага приділена схемо технічним рішенням дискримінаторів. В наукових роботах

[12; 13; 14] розглядаються питання застосування дискримінаторів в різноманітних радіотехнічних пристроях та шляхи вирішення проблем, що виникають при цьому. В роботі Кудінова Є.В [15] розглянуті перспективні питання побудови плівкових дискових резонаторів., Разом з тим залишаються не вирішеними питання конкретної побудови дискримінатора з можливістю використання його для досліджень шумових властивостей генераторів НВЧ.

Метою статті є представлення результатів розробки дискримінатора та можливостей його використання для дослідження шумових властивостей генераторів НВЧ.

Виклад основного матеріалу. Для практичного вимірювання ступеню шумової амплітудної модуляції, сигнал повинен бути поданий на відповідний демодулятор, та підсилений до необхідного рівня. Якщо нахил характеристики демодулятора навколо робочої точки визначити як :

$$k_{AD} = \frac{dU_{вих}}{dA_{вх}}, \quad (1)$$

Тоді сигнал на виході демодулятора може бути представлений у наступному вигляді

$$a(t) = k_{AD} A_0 \lambda_1 z_1(t), \quad (2)$$

а відповідна йому потужність:

$$P_{AM} = \frac{A_0^2}{r} \lambda_1^2 k_{AD}^2 R_A(\tau), \quad (3)$$

де $R_A(\tau)$ автокореляційна функція шумового процесу ,

r – опір навантаження демодулятора.

Таким чином, P_{AM} – представляє собою потужність на виході демодулятора, що спричиняється відповідними АМ шумовими компонентами, відносне значення якої може бути представлене у вигляді (4).

$$\frac{P_{AM}}{P_0} = 2 \lambda_1^2 k_{AD}^2 R_A(\tau), \quad (4)$$

Якщо тепер сигнал, що описується формулою (1) подати в частотний демодулятор, нахил якого є характеристикою з робочою точкою:

$$k_{FD} = \frac{dA_{\text{вих}}(f)}{df}, \quad (5)$$

де $A_{\text{вих}}(f)$ – сигнал на виході частотного дискримінатора відносно рівня несучої модульованого сигналу.

Тоді сигнал з'являється на виході демодулятора можна визначити як:

$$b(t) = k_{FD} \lambda_2 \frac{dz_2(t)}{dt}, \quad (6)$$

Величина $b(t)$ в цьому виразі є стохастична функція, якій відповідає відповідна потужність:

$$P_{FM} = \frac{\lambda_2^2}{r} k_{FD}^2 \left[\frac{d^2}{d\tau^2} R_\omega(\tau) \right], \quad (7)$$

де r – опір навантаження демодулятора,

$R_\omega(\tau)$ – автокореляційна функція частото модульованого шумового процесу.

Ефективне коливання частоти, що з'являється на виході демодулятора, можна визначити з рівняння (8).

$$\delta f_{\text{eff}} = \lambda_2 \sqrt{\frac{d^2}{d\tau} R_\omega(\omega)}, \quad (8)$$

Для подальших теоретичних розрахунків шумову потужність в певній ширині смуги можна замінити синусоїдальною напругою U_m , яка характеризується тією ж потужністю.

У цьому випадку відношення АМ-шум/несуча можна визначити безпосередньо як (9):

$$\frac{P_{AM}}{P_0} = k_{AD}^2 \left(\frac{U_m}{U_0} \right)^2, \quad (9)$$

А ефективне відхилення частоти, обумовлене шумом можна визначити співвідношенням (10):

$$\Delta f_{\text{eff}} = \frac{u_m f_m}{u_0 \sqrt{2}}, \quad (10)$$

Це справедливо за умови, що модуляційна шумова амплітуда значно менша за амплітуду на несучій частоті.

Вирази (9) і (10) описують вихідні сигнали дискримінатора та дають можливість реалізувати систему роздільного вимірювання складових шуму.

Використання циліндричного резонатора для побудови дискримінатора. Розглянемо особливості використання циліндричного, об'ємного резонатора для побудови дискримінатора.

Ескіз такого резонатора з епюрами силових ліній, зображено на рис. 1.

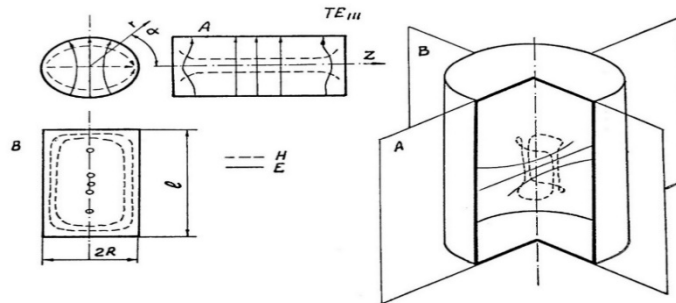


Рис. 1. Ескіз резонатора, що працює на типі хвилі H_{111}

Джерело: розроблено авторами

Як видно з цього рисунку, при вибраній поляризації щільність електричних силових ліній у площині А буде найбільшою. А це в свою чергу означає, що якщо в цій площині розмістити елемент налаштування (наприклад регулюючий гвинт), то він буде певним чином впливати на резонансну частоту саме цього коливання. В той же час його вплив на частоту коливання в площині В буде мінімальним.

Таким чином застосовуючи два взаємо перпендикулярні елементи налаштування, можна досягти існування в такому резонаторі подвійної типу хвилі TE_{111} и мати можливість окремо впливати на ці коливання в певних межах.

На рис. 2 наведено спрощене зображення такого резонатора та його еквівалентну схему

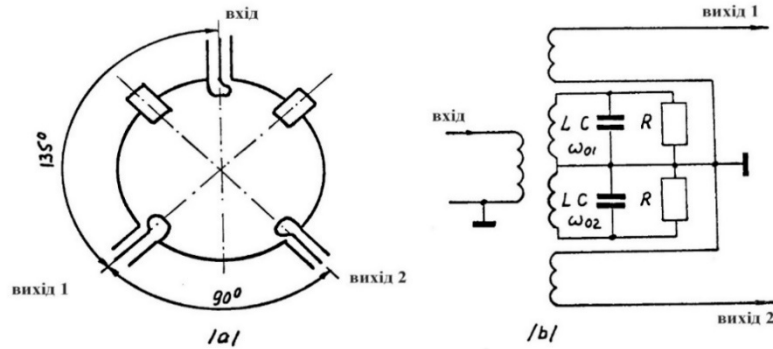


Рис. 2. Еквівалентна схема резонатора

Джерело: розроблено авторами

Якщо сигнал, що досліджується поступає на вхід такого резонатора, наприклад через петлю зв'язку, то з двох взаємно перпендикулярних виходів ми можемо зняти сигнал, розкладений на дві складові відповідно до еквівалентної схеми (рис. 2b). Якщо два виходи такого резонатора з'єднати через мікрохвильові діоди до диференціального підсилювача, то аналізуючи вихідний сигнал такого підсилювача за допомогою низькочастотного аналізатора спектру, можна отримати певні характеристики НВЧ коливання, генератора, що аналізується.

Якщо сигнали, що надходять від діодів, скласти (або використати сигнал, що надходить від одного діода), то система буде працювати як АМ демодулятор.

Результати експериментальних досліджень. Для експериментальних досліджень була спроектована та розроблена система вимірювання, спрощена схема якої показана на рис. 3. Досліджування проводились в Х-діапазоні НВЧ.

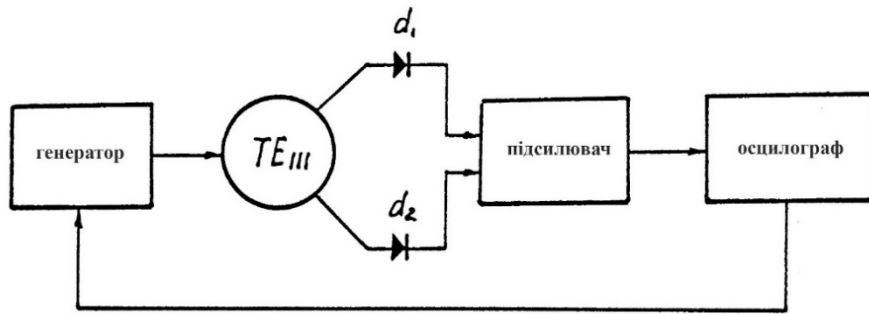


Рис. 3. Спрощена схема системи для дослідження характеристик дискримінатора

Джерело: розроблено авторами

На цій схемі НВЧ-генератор представляє собою пристрій з можливістю лінійної модуляції пілкоподібним сигналом, що надходить з осцилографу по зворотному зв'язку, модульований на тій же частоті що і пілкоподібний сигнал.

У цьому випадку зображення на екрані осцилографу буде відображати характеристику частотного дискримінатора, що досліджується. За допомогою елементів налаштування резонатора можна досягти бажаних характеристик дискримінатора.

Так наприклад, при певному налаштуванні частотного дискримінатора за допомогою підстрочних гвинтів та плунжера можна практично одержати бажану характеристику. Приклад такої характеристики наведено на рис. 4.

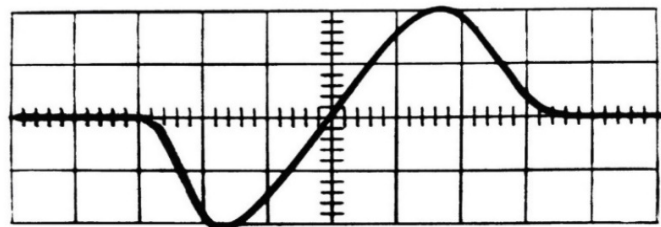


Рис. 4. Характеристика частотного дискримінатора

Джерело: розроблено авторами

Чутливість системи залежить від нахилу ділянки, між двома піками цієї характеристики і її можна збільшити, приближуючи відповідні піки дискримінатора, але це супроводжується тим недоліком, що частотний діапазон, який може обробити система, зменшується.

Для калібровій вимірювальної системи використовувався генератор низької частоти для створення відповідного відомого частотно-модульованого сигналу який в подальшому аналізується аналізатором спектру.

Зовнішній вигляд дискримінатора для вимірювального пристрою для аналізу шумових властивостей генераторів НВЧ представлено на рис. 5.

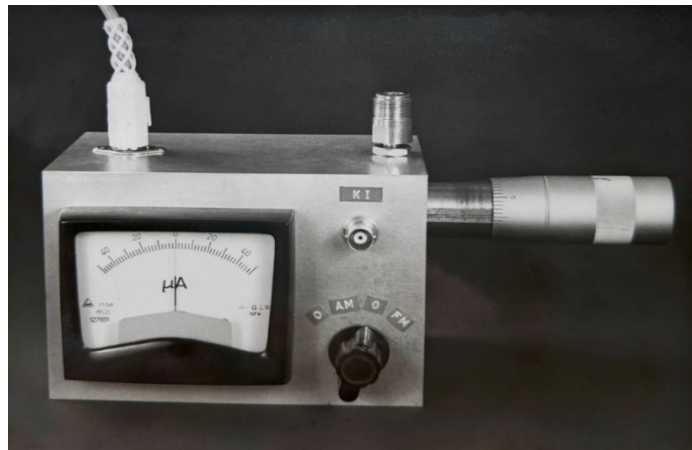


Рис. 5. Зовнішній вигляд розробленого дискримінатора

Джерело: розроблено авторами

Цей пристрій був спроектований та виготовлено його експериментальний лабораторний зразок. На передній панелі пристрою розміщено індикатор налаштування на необхідну частоту вхідного сигналу за допомогою плунжера короткого замикання циліндричного резонатора, вихідний роз'єм та перемикач комутації вихідних діодів для вимірювання АМ або FM компонентів. На вхідний роз'єм цього пристрою подавався сигнал НВЧ, що аналізується а до вихідного роз'єму підключався низькочастотний аналізатор спектру.

За допомогою цього пристрою проводились дослідження шумових властивостей ГЛПД. Приклад FM шумового спектру, отриманого таким чином наведено на рис. 6.

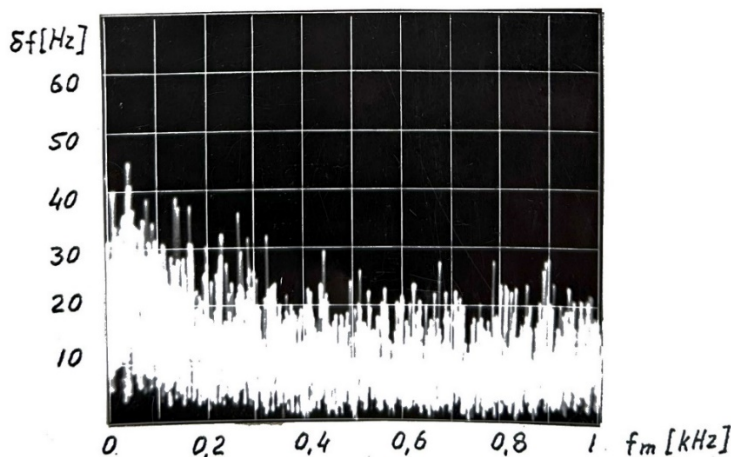


Рис. 6. FM компоненти шуму ГЛПД при ширині полоси пропускання НЧ аналізатора спектру 90 Гц

Джерело: розроблено авторами

Аналізуючи такі спектри, можна зробити ряд висновків по зменшенню рівня шуму, або в певних випадках (наприклад при розробці шумових генераторів) його підвищенню.

Порівняння теоретичних та практичних результатів, отриманих в роботі, дає можливість говорити про їх задовільну кореляцію.

Висновки і перспективи подальших досліджень. В роботі була показана доцільність застосування дискримінаторів НВЧ, що працює на типі колювання TE_{111} для роздільного аналізу АМ та FM шумових компонентів генераторів електромагнітних колювань.

Основою для запропонованого для реалізації дискримінатора було вибрано циліндричний резонатор, в якому збуджуються подвійний TE_{111} тип колювання. При певних умовах такий резонатор буде еквівалентним двом резонансним контурам, що мають певну розстройку і може бути використаний для побудови частотного дискримінатора.

Результати експериментальних досліджень характеристик розробленого дискримінатора свідчать про його працездатність та задовільні, для виконання поставленої, задачі характеристики.

Література

1. Hinse M.E. Noise Theory for the Read Type Avalanche Diode. *IEEE Trans. Electron Device*. 1966. Vol. ED-13. P. 158-163.
2. Goedbloed J.J. On the Up-converted Noise of an IMPATT-diode Oscillator. *8th Int. Conf. Microwave and Optical Generation and Amplification. Amsterdam*. 1970.
3. Misawa T. Multiple uniform lagger approximation in analysis of negativ resistance in p-n junction in breakdown. *IEEE Tran. Electron Devices*. 1967. Vol. ED-14. P. 795-808.
4. Сили И.И., Черенков А.Д. Параметры и стабильности частоты диодного генератора с резонатором проходного типа. *Энергобережения. Энергетика. Энергоаудит*. 2015. № 9. С. 53-59.
5. Бондаренко І.М. Мікроелектроніка НВЧ. Ч.2. Напівпровідникові елементи та пристрої НВЧ: навч. посібник для студентів ЗВО. Харків: ХНУРЕ, 2019. 172 с.
6. Бондаренко І. М. Мікроелектроніка НВЧ: навч. посіб. для студентів спец. 153 "Мікро- та наносистемна техніка", 171 "Електроніка". Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. Харків: ХНУРЕ, 2019.
7. Осадчук О. В. Математичне моделювання генератора НВЧ на основі транзисторної структури з від'ємним опором. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2005. № 4, Ч.1, Т. 2. С. 256–259.
8. Семенов А. О. Апроксимація ВАХ двоелектродної транзисторної структури з від'ємним диференційним опором. *Приборостроение 2004: Сборник трудов МНТК*. Винница-Ялта, 15-18 сентября 2004 г. Винница, 2004. С. 49-53.

9. Микитин І.П., Стадник Б.І., Дорожовець М.М. Математична модель шумового термометра на основі кореляційного підсилювача. *Вимірювальна техніка та метрологія*. 2000. № 57. С. 63–66
10. Ушенко Ю.О., Дрожак В.В., Гавриляк М.С., Талах М.В. Основи та методи цифрової обробки сигналів: від теорії до практики: навчальний посібник. Чернівці: Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, 2021. 307 с.
11. Байда В. В., Бражний В. В., Куцак В. В. Дослідження апаратних та програмних методів вимірювання акустичних шумів та звукових характеристик приміщень. Вінниця: ВНТУ, 2014 р.
12. Кудінов Є.В. Математична модель лінії затримки на основі магнітостатичних хвиль. *Вісник НТУУ «КПІ». Радіотехніка, радіоапаратобудування : збірник наукових праць*. 2010. № 43. С. 14–23.
13. Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О. Генератори електричних коливань на основі транзисторних структур з від'ємним опором: Монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. 182 с.
14. Терих В.В., Грамарчук Ю.О., Кобак М.М. НВЧ-синтезатор частоти з опорним генератором на об'ємно-акустичних хвилях. *Перспективні напрямки сучасної електроніки: матеріали XI-ї науково-практичної конференції*. КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФЕЛ, 6-7 квітня 2017 р. (електронне видання). С. 247-251. URL: <https://ed.kpi.ua/wp-content/uploads/conferences/2017/2017-247-251.pdf> (дата звернення: 15.02.2024).
15. Кудінов Є.В. Плівкові дискові резонатори на основі магнітостатичних коливань для генераторів НВЧ. *Вісник Національного технічного університету України "КПІ". Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. 2011. № 44. С. 89-95. URL: <https://core.ac.uk/download/295721303.pdf> (дата звернення: 15.02.2024).

References

1. Hinse M.E. Noise Theory for the Read Type Avalanche Diode. *IEEE Trans. Electron Device*. 1966. Vol. ED-13. P. 158-163.
2. Goedbloed J.J. On the Up-converted Noise of an IMPATT-diode Oscillator. *8th Int. Conf. Microwave and Optical Generation and Amplification. Amsterdam*. 1970.
3. Misawa T. Multiple uniform laguer approximation in analysis of negative resistance in p-n junction in breakdown. *IEEE Tran. Electron Devices*. 1967. Vol. ED-14. P. 795-808.
4. Syly Y.Y., Cherenkov A.D. Parametry y stabilnosti chastoty diodnoho heneratora s rezonatorom prokhidnoho typu. *Enerhozberezhennia. Enerhetyka. Enerhoaudyt*. 2015 № 9. S. 53-59.
5. Bondarenko I.M. Mikroelektronika NVCh. Ch.2. Napivprovodnykovi elementy ta prystroi NVCh: navch. posibnyk dlia studentiv ZVO. Kharkiv: KhNURE, 2019. 172 s.
6. Bondarenko I. M. Mikroelektronika NVCh: navch. posib. dlia studentiv spets. 153 "Mikro- ta nanosystemna tekhnika", 171 "Elektronika". Kharkiv. nats. un-t radioelektroniky. Kharkiv: KhNURE, 2019.
7. Osadchuk O. V. Matematychni modeliuvannia heneratora NVCh na osnovi tranzystornoj struktury z vid'iemnym oporom. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*. 2005. № 4, Ch.1, T. 2. S. 256–259.
8. Semenov A. O. Aproksymatsiia VAKh dvoelektrodnoi tranzystornoj struktury z vid'iemnym dyferentsiinym oporom. *Pryborostroenye 2004: Sbornyk trudov MNTK. Vynnytsa-Yalta, 15-18 sentiabria 2004 h. Vynnytsa, 2004. S. 49-53.*
9. Mykytyn I.P., Stadnyk B.I., Dorozhovets M.M. Matematychna model shumovoho termometra na osnovi koreliatsiinoho pidsyliuvacha. *Vymiriuvalna tekhnika ta metrolohiia*. 2000. № 57. S. 63–66

10. Ushenko Yu.O., Drozhak V.V., Havryliak M.S., Talakh M.V. *Osnovy ta metody tsyfrovoy obrobky syhnaliv: vid teorii do praktyky: navchalnyi posibnyk*. Chernivtsi: Chernivetskyi natsionalnyi universytet imeni Yuriiia Fedkovycha, 2021. 307 s.
11. Baida V. V., Brazhnyi V. V., Kutsak V. V. *Doslidzhennia aparatnykh ta prohramnykh metodiv vymiriuvannia akustychnykh shumiv ta zvukovykh kharakterystyk prymishchen*. Vinnytsia: VNTU, 2014 r.
12. Kudinov Ye.V. *Matematychna model linii zatrymky na osnovi mahnitostatychnykh khvyl*. *Visnyk NTUU «KPI». Radiotekhnika, radioaparotobuduvannia : zbirnyk naukovykh prats*. 2010. № 43. S. 14–23.
13. Osadchuk V. S., Osadchuk O. V., Semenov A. O. *Heneratory elektrychnykh kolyvan na osnovi tranzystornykh struktur z vid'iemnym oporom: Monohrafiia*. Vinnytsia: UNIVERSUM-Vinnytsia, 2009. 182 s.
14. Terykh V.V., Hramarchuk Yu.O., Kobak M.M. *NVCh-syntezyator chastoty z opornym heneratorom na ob'iemno-akustychnykh khvyliakh*. *Perspektyvni napriamky suchasnoi elektroniky: materialy XI-yi naukovo-praktychnoi konferentsii. KPI im. Ihoria Sikorskoho, FEL, 6-7 kvitnia 2017 r. (elektronne vydannia)*. S. 247-251. URL: <https://ed.kpi.ua/wp-content/uploads/conferences/2017/2017-247-251.pdf>.
15. Kudinov Ye.V. *Plivkovi dyskovi rezonatory na osnovi mahnitostatychnykh kolyvan dlia heneratoriv NVCh*. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy "KPI". Serii Radiotekhnika. Radioaparotobuduvannia*. 2011. № 44. S. 89-95. URL: <https://core.ac.uk/download/295721303.pdf>.