

УДК 638.235.231

ІДЕНТИФІКАЦІЯ НЕЛІНІЙНИХ РОЗСІЮВАЧІВ ЗА РІВНЕМ ОДНІЄЇ  
ГАРМОНІКИ

Максим Зінченко, Юрій Зінковський, Михайло Прокоф'єв

НДЦ «ТЕЗІС» НТУУ «КПІ»

*Анотація:* Обґрунтовано доцільність покращення ефективності використання нелінійних радіолокаторів у сфері технічного захисту інформації. Показано, що напівпровідникові нелінійні розсіювачі (НРс) здатні генерувати некротні гармоніки. Встановлено появу області петлеутворення на функціональній залежності рівня (амплітуди) другої гармоніки в розсіяному сигналі відгуку при варіюванні рівня потужності зонduючого сигналу (ЗС) нелінійного радіолокатора (НР), як наслідок впливу на генерування некротних гармонік процесів інерційності у напівпровідникових структурах НРс. Запропоновано спосіб селекції нелінійних розсіювачів за рівнем однієї гармоніки, що включає випромінювання зонduючого сигналу в напрямку на НРс, приймання та ресстрацію кратної гармоніки як сигналу відгуку, який відрізняється тим, що при модуляції амплітуди ЗС за пилкоподібним законом для селекції НРс використовується ефект петлевої функціональної залежності рівня (амплітуди) другої гармоніки розсіяного сигналу від рівня потужності ЗС НР.

*Summary:* The expediency of efficiency improvement of the nonlinear radio-locators usage in the feald of technical guarding is proved. It is shown that semiconductor nonlinear scatterers (NS) are able to generate aliquant harmonics. The appearance of looping area on functional dependence of level (amplitude) of the second harmonic in the scattered response signal at the varying of power-level of sounding signal (SS) of nonlinear radio-locator (NR) as a result of influence on generuting of aliquant harmonics of time lag processes in the semiconductor structures of NS is found. It is offered the method of selection of nonlinear scatterers after the level of one harmonic which includes the radiation of sounding signal in direction on NS, acceptance and registration of multiple harmonic as a response signal, which differs in that, at the modulation of amplitude of SS under the saw-tooth law for the selection of NS the effect of loopback functional dependence of level (amplitude) of the second harmonic of the response signal from the power-level of SS of NS is used.

*Ключові слова:* Засоби захисту інформації, нелінійна радіолокація, нелінійні продукти, сигнал відгуку, некротні гармоніки.

## І Вступ

Основне призначення нелінійного радіолокатора (НР) в сфері технічного захисту інформації – пошук, ідентифікація та локалізація потай встановлених радіоелектронних складних пристроїв – напівпровідникових нелінійних розсіювачів (НРс), які в більшості випадків є сукупністю напівпровідників, кожен з яких навантажений на статистично невизначений набір (ансамбль) елементарних вібраторів, що мають будь-які значення довжин та розташовані у просторі довільним чином [1].

Нелінійні розсіювачі здатні доповнити перевипромений сигнал відгуку (СВ) додатковими спектральними складовими, відсутніми в опромінюючому зонduючому сигналі. Кількість спектральних складових, значення їх частот та енергетика безпосередньо пов'язані з природою НРс. Тому треба розуміти під демаскуючими ознаками НРс у нелінійній радіолокації всі можливі спостережувані за допомогою відповідної апаратури явища та процеси в досліджуваному середовищі, які породжуються або зазнають певних змін при наявності НРс.

Первинні демаскуючі ознаки НРс – всі можливі спостережувані за допомогою відповідної апаратури явища та процеси в досліджуваному середовищі, які породжуються або зазнають певних змін за рахунок наявних нелінійностей характеристик напівпровідникових структур НРс чи зміни (спотворення) нелінійних областей статичних характеристик напівпровідникових структур НРс у процесі зондування через вплив рівня потужності зонduючого сигналу (ЗС) нелінійних радіолокаторів (НР).

Первинні демаскуючі ознаки першого типу – всі можливі спостережувані за допомогою відповідної апаратури явища та процеси в досліджуваному середовищі, які породжуються або зазнають певних змін за рахунок наявних нелінійностей характеристик напівпровідникових структур НРс у процесі зондування апаратурою нелінійної радіолокації. До першого типу слід віднести кратні гармоніки частоти моногармонічного зонduючого сигналу нелінійного радіолокатора і комбінаційні частоти у випадку бігармонічного зонduючого сигналу НР.

Первинні демаскуючі ознаки другого типу – всі можливі спостережувані за допомогою відповідної апаратури явища та процеси в досліджуваному середовищі, які породжуються або зазнають певних змін за рахунок зміни (спотворення) нелінійних областей статичних характеристик напівпровідникових структур

НРс у процесі зондування внаслідок впливу рівня потужності ЗС НР тощо. До другого типу слід віднести перевипромінювані нелінійними розсіювачами некратні гармоніки частоти моногармонічного ЗС НР і хаотичний сигнал.

Вторинні демаскуючі ознаки НРс – всі можливі спостережувані за допомогою відповідної апаратури закономірності перебігу явищ та процесів в досліджуваному середовищі, які є наслідком сукупної (взаємної) дії наявних нелінійностей характеристик напівпровідникових структур НРс та зміни (спотворення) нелінійних областей статичних характеристик напівпровідникових структур НРс у процесі зондування внаслідок впливу рівня потужності ЗС НР тощо.

До вторинних демаскуючих ознак НРс у нелінійній радіолокації можна віднести наступні ефекти та явища:

- ефект появи області петлеутворення на функціональній залежності рівня кратної гармоніки сигналу відгуку при зміні рівня потужності зондуючого сигналу [2];
- ефект інерційності процесів спотворення ВАХ напівпровідникових структур [3];
- явище кореляційної залежності ступеня хаотичності сигналу відгуку від рівня потужності зондуючого сигналу [4].

Підвищення ефективності використання НР, що використовують вторинні демаскуючі ознаки, досягається за рахунок зведення до мінімуму значущостей впливу таких факторів як: присутність у досліджуваному середовищі заводових МОМ-структур; суб'єктивність оператора; присутність паразитних пелюсток діаграми направленості випромінюючої антени (за рахунок обмеження рівня потужності ЗС НР).

## II Постановка задачі

На перших етапах нелінійні радіолокатори розроблялися приблизно так само як звичайні лінійні радіолокатори та відрізнялися тільки тим, що приймання здійснювалося на частоті одного з НП зондуючого сигналу (як правило, на третій, а пізніше на другій гармоніці). Інакше кажучи, враховувалося тільки те, що НРс перевипромінюють сигнали на частотах гармонік ЗС НР. Підвищення дальності дії та ефективності роботи НР пов'язувалося, в основному, зі збільшенням потужності зондуючого сигналу чи чутливості приймачів. Такий підхід досить швидко вичерпав себе. Таким чином, виникла актуальна проблема пошуку нових можливостей збільшення ефективності використання НР. Її розв'язок пов'язаний з урахуванням особливостей нелінійного розсіювання і насамперед властивостей конкретних НРс.

Більшість представлених на ринку НР за показниками ефективності використання (дальності дії, роздільної здатності, вибіркової тощо) не відповідають вимогам сьогодення.

Це пов'язано з тим, що погано досліджена фізика процесів формування демаскуючого СВ при опроміненні засобами нелінійної радіолокації досліджуваного нелінійного об'єкта. Тобто не використовується інформація щодо додаткових (вторинних) демаскуючих ознак напівпровідникових НРс (НРс, що мають у своєму складі радіоелектронні напівпровідникові елементи), які б впливали на ефективність знаходження, ідентифікації та локалізації нелінійних об'єктів.

В останні десять років окремим аспектам даної тематики присвячено значну кількість публікацій. Більшість опублікованого матеріалу присвячена опису технічних рішень чи оригінальних алгоритмів обробки досліджуваних СВ від НРс, котрі певним чином здатні поліпшити ефективність використання нелінійних радіолокаторів, що використовують первинні демаскуючі ознаки нелінійних розсіювачів – кратні гармоніки та комбінаційні частоти [5, 6].

Для підвищення ефективності використання НР також проводять дослідження поляризаційних характеристик НРс, та їх залежностей від параметрів ЗС НР. Згідно з [7, 8] в цьому напрямку досягнуто чималих успіхів. Але слід зазначити, що виявлення, ідентифікація та локалізація НРс за поляризаційними характеристиками притаманна для відомих «статичних» НРс, тобто тих, характеристики яких не змінюються під час зондування [9]. Оскільки «статичними» НРс, як правило, є масивні конструкції, транспортні засоби, РЛС тощо, а для сфери технічного захисту інформації притаманні відносно «дрібні» динамічні НРс, характеристики яких змінюються під час зондування, то виявлення, ідентифікація та локалізація НРс за поляризаційними характеристиками в даному випадку не є ефективною.

Зазначимо, що для сигналу відгуку на частоті другої гармоніки зникає чи стає складнішим зв'язок поляризації ЗС НР та поляризації розсіяного СВ навіть для відомої моделі НРс [8]. Таким чином, на частотах парних гармонік спостерігається обмеження на існування деяких видів поляризації розсіяного СВ. При цьому проявляються наступні особливості, пов'язані з нелінійним характером розсіювання. По-перше, при зміні поляризації ЗС НР в загальному випадку не зберігається величина інтенсивності розсіяного сигналу. По-друге, істотний вплив на поляризацію розсіяного СВ виявляє вид амплітудних (вольт-амперних) характеристик нелінійних елементів НРс. По-третє, фаза розсіяного СВ для парних гармонік залежить від орієнтації НРс в просторі.

Традиційний аналіз можливостей використання відомих підходів до завдань обробки СВ під час пошуку НРС показує, що при виборі зондуючого сигналу важливу роль починають відігравати два зв'язані між собою аспекти. По-перше, забезпечення незалежності структури прийнятих сигналів від властивостей нелінійного розсіювача. По-друге, узгодження енергетичних властивостей ЗС з амплітудними характеристиками НРС. Отже, отримали фізичне протиріччя, що потребує компромісного рішення, тобто в будь-якому випадку матимемо численні обмеження, а значить і незначний виграв в підвищенні ефективності використання засобів нелінійної радіолокації щодо виявлення, ідентифікації та локалізації напівпровідникових НРС на фоні завадових МОМ-структур.

Перспективним для підвищення ефективності використання НР у сфері технічного захисту інформації є дослідження вторинних демаскуючих ознак НРС. Розглянемо можливість та доцільність практичного використання ефекту появи області петлеутворення на функціональній залежності рівня кратної гармоніки сигналу відгуку від рівня потужності зондуючого сигналу у нелінійній радіолокації.

### III Основна частина

Внутрішні ефекти у напівпровідникових НРС при дії відносно потужного ЗС НР спричиняють спотворення ВАХ кремнієвих напівпровідникових структур [10]. Дані спотворення мають схожість зі спотвореннями ВАХ діодів Ганна, що перебувають в подібному за рівнем потужності НВЧ полі [11, 12]. Принциповою відмінністю між розглянутими спотвореннями ВАХ нелінійних елементів є те, що при збільшенні рівня потужності НВЧ випромінювання ширина області з негативним диференціальним опором на ВАХ діода Ганна зменшується, а на ВАХ кремнієвих напівпровідникових структур навпаки збільшується. Тому виникає питання щодо можливості в досліджуваному об'єкті нелінійної радіолокації реєструвати власні коливання випадкового генератора – некротні гармоніки частоти ЗС НР.

Статистична невизначеність антенної структури передбачає існування декількох моделей напівпровідникового НРС як випадкового генератора на кремнієвому діоді при дії ЗС НР.

Нехай кремнієвий діод підключений до джерела постійної напруги  $E$  через послідовно з'єднані резистор  $R$  та індуктивність  $L$ . Крім того  $R$  та  $E$  обрані так, що робоча точка перебуває на падаючій ділянці  $N$ -подібної ВАХ кремнієвого діода при дії відносно потужного ЗС НР. Ця обставина принципово важлива, оскільки диференціальна провідність діода в цьому випадку є негативною. Фізично це означає, що кремнієвий діод віддає накопичену енергію ЗС НР у зовнішнє коло.

Якщо врахувати еквівалентну ємність  $C$  розглянутого діода (разом з ємністю монтажу та навантажувальною ємністю), то така схема буде описуватися наступною системою нелінійних диференціальних рівнянь

$$\frac{di}{dt} = \frac{E - iR - u}{L}, \quad \frac{du}{dt} = \frac{i - I(u)}{C},$$

де  $i$  – струм через діод;  $u$  – напруга на діоді.

Нелінійність цієї системи спричинена тим, що в другому рівнянні струм діода при дії відносно потужного ЗС НР нелінійно залежить від напруги  $u$ .

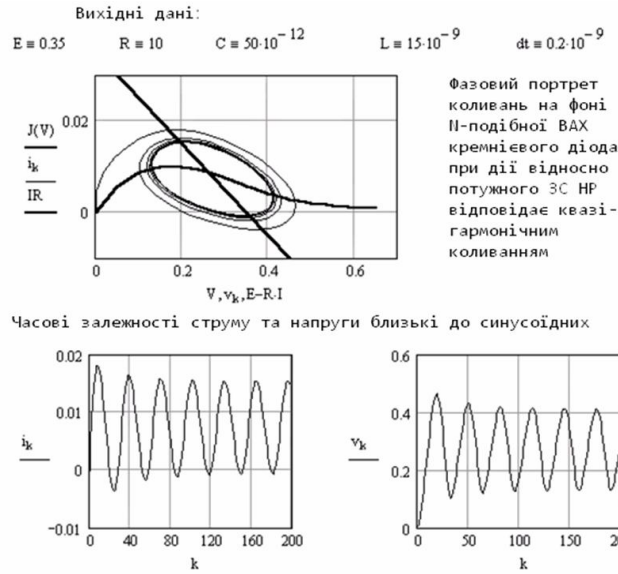
Для подальшого аналізу запропонованої системи скористаємося теорією фазової площини.

На фазовій площині представлена лінія навантаження, що описується рівнянням  $U(I) = E - IR$ . ВАХ і лінія навантаження на рис. 1 побудовані жирними лініями, а фазовий портрет – тонкою лінією. Відмінність від еліпса фазового портрета незначна, що, з одного боку, свідчить про помітний вплив нелінійності, а з іншого – про майже гармонічний характер коливань.

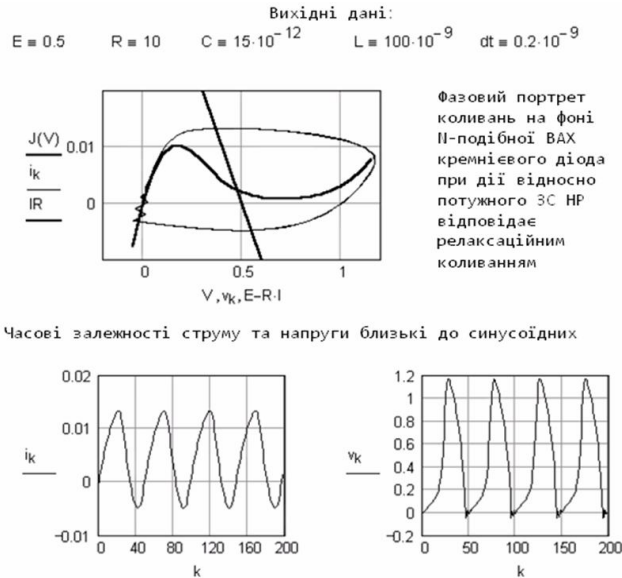
Розглянемо часові залежності напруги на діоді та струму в колі резистора  $R$ . Ці залежності близькі до гармонічних ( $C = 50$  пФ,  $L = 10$  нГ) наприкінці помітної стадії встановлення коливань, що мають характер загасаючих коливань (фазовий портрет при цьому має вигляд спіралі, що закручується).

Зазначимо, що якщо зменшити ємність  $C$  у два-три рази, а індуктивність збільшити, то будемо мати режим генерації релаксаційних коливань. Цей випадок показано на рис. 2 ( $C = 15$  пФ,  $L = 100$  нГ).

Колівання тепер виникають більш різко, фазовий портрет починається відразу з граничного циклу, форма якого помітно відрізняється від еліптичної. Відповідно, сильно відрізняються від гармонічної й форма напруги на кремнієвому діоді при дії НР та форма струму, що тече через резистор  $R$ . Колівання при цьому відносяться до типу релаксаційних [13] і виникають без будь-якого зовнішнього впливу. Практично після першого циклу коливань встановлюється їхній стаціонарний режим.

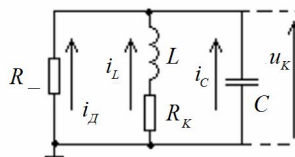


**Рисунок 1 – Моделювання процесу генерації кремнієвим діодом власних квазігармонічних коливань при впливі відносно потужного ЗС НР**



**Рисунок 2 – Приклад генерації релаксаційних коливань**

На рис. 3 зображена наступна можлива еквівалентна схема випадкового генератора на діоді з N-подібними ВАХ [14]. Як ємність контуру в генераторі використовується власна ємність діода  $C_0$ ;  $R_K$  – опір втрат у кристалі та в елементах контуру. Коливальний контур у схемі шунтований негативним опором  $R_-$ . Напругу  $u_K$ , що діє у коливальному контурі, розглядали як ЕРС, а струм через діод визначили як  $i_D = u_K / R_-$ .



**Рисунок 3 – Варіант еквівалентної схеми випадкового генератора на діоді з N-подібною ВАХ**

Коливальна напруга в контурі  $u_K$  та струми  $i_L, i_C, i_D$  пов'язані між собою співвідношеннями

$$i_D = i_L + i_C, \quad i_C = C \frac{du_K}{dt}, \quad u_K = R_K i_L + L \frac{di_L}{dt}.$$

Шуканою функцією є струм  $i_L$  в індуктивній гілці контуру. Тоді

$$i_D = i_L + R_K C \frac{di_L}{dt} + LC \frac{d^2 i_L}{dt^2}.$$

Однак

$$i_D = -\frac{1}{R_-} \left( R_K i_L + L \frac{di_L}{dt} \right).$$

Прирівнявши праві частини приведених виразів, після групування доданків, одержимо наступне диференціальне рівняння

$$\frac{d^2 i_L}{dt^2} + \left( \frac{R_K}{L} + \frac{1}{CR_-} \right) \frac{di_L}{dt} + \frac{1 + R_K R_-}{L} i_L = 0.$$

Для того, щоб амплітуда коливань зростала, коефіцієнт при першій похідній має бути негативним. Звідси випливає умова виникнення коливань

$$\frac{R_K}{L} - \frac{1}{C} \left| \frac{1}{R_-} \right| < 0 \quad \text{або} \quad |R_-| < \frac{L}{R_K C} = Z_{екв} = \rho Q = \frac{Q}{\omega_p C},$$

де  $|R_-|$  – абсолютна величина негативного опору;  $Z_{екв}$  – еквівалентний резонансний опір контуру;  $Q$  – добротність;  $\rho = \sqrt{L/C}$  – характеристичний опір контуру.

Коли опір  $|R_-|$ , що залежить від амплітуди коливання (при переході на нелінійну частину характеристики), збільшиться до  $|R_-(u_K)| = Z_{екв}$ , то в автогенераторі встановиться стаціонарний режим генерації коливань.

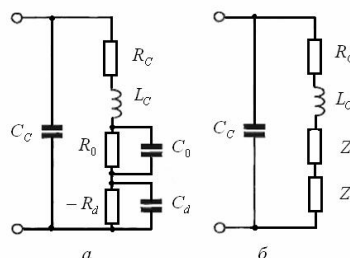
Розглянемо еквівалентну схему, представлену на рис. 4, а, що враховує не тільки параметри активної області діода, але і "паразитні" елементи його конструкції [15, 16].

Напівпровідникова структура знаходиться в керамічному корпусі. Незважаючи на те, що в кремнієвому діоді при дії відносно потужного ЗС НР відбуваються досить складні фізичні процеси, його математична модель з достатнім ступенем точності може бути представлена у вигляді еквівалентної схеми з зосередженими елементами.

Активна область представлена послідовним з'єднанням двох паралельних RC кіл, одне з яких  $R_0, C_0$  відповідає частині активної області, що перебуває у внутрішньому відносно слабкому полі  $E_1 < E_t$ , а інша  $(R_d, C_d)$  – домену у відносно сильному полі  $E_2 > E_t$  (теорія домена застосовна для кремнієвого діода у випадку дії відносно потужного ЗС НР), де  $E_t$  – напруженість електричного поля, яка відповідає максимальній дрейфовій швидкості електронів. Очевидно, що

$$E_t (d - d_d) + \int_0^{d_d} (E_2 - E_1) dx = U,$$

де  $d_d$  – довжина домена сильного поля,  $d$  – довжина зразка,  $U$  – напруга на діоді.



**Рисунок 4 – Еквівалентна схема випадкового генератора на кремнієвому діоді при дії відносно потужного ЗС НР з врахуванням можливих «паразитних» елементів його конструкції: а) повна, б) спрощена**

Активний опір і ємність області слабого поля визначили за формулами

$$R_0 = \frac{d-d_d}{en_0\mu_0S}; \quad C_0 = \frac{\varepsilon_0\varepsilon S}{d-d_d},$$

де  $e$  – заряд електрона,  $\mu_0$  – рухливість електронів у слабкому полі,  $S$  – площа поперечного перерізу активної області,  $\varepsilon_0$  – діелектрична постійна,  $\varepsilon$  – відносна діелектрична проникність напівпровідника.

Динамічний активний опір домена негативний та визначається відношенням приросту напруги на домені  $\Delta U_d$  до приросту струму через діод  $\Delta I$ . Зміну струму можна знайти за зміною поля в області, де домен відсутній

$$\Delta I = en_0\mu_0S\Delta U_d / (d-d_d).$$

При цьому, за постійної напруги на діоді  $\Delta U_d = -\Delta U_2$ , де  $\Delta U_2$  – спад напруги в області внутрішнього слабого поля. Таким чином,

$$R_d = \frac{\Delta U_2}{\Delta I} = -\frac{d-d_d}{en_0\mu_0S}.$$

Щоб скористатися цією формулою, потрібно знати залежність довжини домена від напруги на ньому. Однак для кремнієвих діодів при дії відносно потужного ЗС НР довжиною домена в отриманій формулі можна знехтувати.

Ємність домена в першому наближенні визначається як ємність плоского конденсатора

$$C_d = \varepsilon_0\varepsilon \frac{S}{d_d},$$

оскільки ємність домена нелінійна.

В еквівалентну схему кремнієвого діода при впливі відносно потужного ЗС НР входять також паразитні параметри: ємність  $C_c$  та індуктивність  $L_c$  корпуса, а також опір  $R_c$  контактних площадок і корпуса діода.

Еквівалентна схема на рис. 4, а може бути спрощена і представлена у вигляді, зображеному на рис. 4, б. У цій схемі

$$Z_1 = R_1 + iX_1 = \frac{R_0}{1+\omega^2C_0^2R_0^2} - i\omega \frac{C_0R_0^2}{1+\omega^2C_0^2R_0^2} \quad (1)$$

– повний опір частини діода, що перебуває в слабкому полі,

$$Z_2 = R_2 + iX_2 = \frac{R_d}{1+\omega^2C_d^2R_d^2} + i\omega \frac{C_dR_d^2}{1+\omega^2C_d^2R_d^2} \quad (2)$$

– повний опір домена сильного поля.

Незважаючи на простоту еквівалентної схеми, аналіз умов самозбудження та розрахунок резонансної частоти кремнієвого діода при впливі відносно потужного ЗС НР досить складні та, зазвичай, визначаються наближеними методами. В даному випадку для визначення резонансної частоти необхідно знати граничне значення негативного опору домена і провести аналіз його залежності від інших параметрів схеми, використовуючи самоузгоджене рішення рівнянь, що визначають амплітудні та фазові умови самозбудження.

Повну провідність діода відповідно до еквівалентної схеми на рис. 4, б визначимо за наступним виразом

$$Y_D = G_D + iB_D = i\omega C_c + \frac{1}{R_c + i\omega L_c + Z_1 + Z_2}. \quad (3)$$

З цієї формули слідує, що на певній частоті реактивна складова повної провідності діода дорівнює нулю. Очевидно, ця частота відповідає резонансній частоті діода  $f_p$ .

Для визначення резонансної частоти кремнієвого діода при дії відносно потужного ЗС НР скористаємося формулою (3), для чого підставимо в неї вирази (1) і (2):

$$Y_D = i\omega C_c + \frac{1}{\left( R_c + \frac{R_0}{1+\omega^2C_0^2R_0^2} + \frac{R_d}{1+\omega^2C_d^2R_d^2} \right) + i\omega \left( L_c - \frac{C_0R_0^2}{1+\omega^2C_0^2R_0^2} - \frac{C_dR_d^2}{1+\omega^2C_d^2R_d^2} \right)}.$$

Відокремивши в отриманій формулі дійсну та уявну частини, знайдемо

$$G_D = \frac{R_c + \frac{R_0}{1 + \omega^2 C_0^2 R_0^2} + \frac{R_d}{1 + \omega^2 C_d^2 R_d^2}}{\left( R_c + \frac{R_0}{1 + \omega^2 C_0^2 R_0^2} + \frac{R_d}{1 + \omega^2 C_d^2 R_d^2} \right)^2 + \omega^2 \left( L_c - \frac{C_0 R_0^2}{1 + \omega^2 C_0^2 R_0^2} - \frac{C_d R_d^2}{1 + \omega^2 C_d^2 R_d^2} \right)^2}; \quad (4)$$

$$B_D = \omega \left[ C_c - \frac{L_c - \frac{C_0 R_0^2}{1 + \omega^2 C_0^2 R_0^2} - \frac{C_d R_d^2}{1 + \omega^2 C_d^2 R_d^2}}{\left( R_c + \frac{R_0}{1 + \omega^2 C_0^2 R_0^2} + \frac{R_d}{1 + \omega^2 C_d^2 R_d^2} \right)^2 + \omega^2 \left( L_c - \frac{C_0 R_0^2}{1 + \omega^2 C_0^2 R_0^2} - \frac{C_d R_d^2}{1 + \omega^2 C_d^2 R_d^2} \right)^2} \right]. \quad (5)$$

Амплітудною умовою самозбудження діода є рівність активної складової провідності нулю  $G_D = 0$ . (6)

Для генерації автоколивань значення негативного опору домена має бути менше граничного значення  $R_d$ , знайденого з рівняння (4).

Резонансну частоту діода визначимо, прирівнявши реактивну складову його провідності до нуля  $B_D = 0$ . (7)

Система рівнянь (6), (7) не може бути вирішена аналітично. Для її рішення використаємо відповідні наближені програмні алгоритми, які реалізовані в середовищі MatLab 8.0. Програма була орієнтована на рішення системи рівнянь (6), (7) відносно резонансної частоти  $f_p = \omega_p / (2\pi)$  та опору домена  $R_d$ , необхідного для самозбудження коливань на даній частоті. При цьому інші параметри кремнієвого діода при дії відносно потужного ЗС НР прийняті відомими.

Також зазначимо, що розглянута система рівнянь має безліч коренів, однак практичний інтерес представляє тільки той корінь, що відповідає мінімальному негативному значенню опору домена, оскільки самозбудження виникає при переході  $-R_d$  через це значення. При цьому негативний опір домена, необхідний для самозбудження кремнієвого діода при дії відносно потужного ЗС НР, зменшується з ростом частоти ЗС НР, оскільки паразитні активні опори схеми зменшуються.

Отже, складний напівпровідниковий НРс під час зондування відносно потужним ЗС НР здатен перевипромінювати у навколишнє середовище крім кратних гармонік частоти ЗС (у випадку моногармонічного ЗС або комбінаційних частот у випадку бігармонічного ЗС) власні коливання, що в більшості випадків є некрatними гармоніками частоти ЗС НР. Це пов'язано з тим, що під час зондування відносно потужним ЗС НР на ВАХ нелінійних структур напівпровідникових НРс з'являються ділянки з негативним диференціальним опором, які в поєднанні з присутніми зворотними зв'язками призводять до самозбудження системи. Зазначимо, що частота будь-якої некрatної гармоніки є випадковою величиною, яка достатньо швидко змінюється в часі, оскільки величини параметрів більшості елементів еквівалентної коливальної системи постійно флюктують при дії відносно потужного НВЧ поля.

Ефект появи області петлеутворення на функціональній залежності рівня кратної гармоніки сигналу відгуку НРс від рівня потужності зонduючого сигналу НР фізично пояснюється наступним [2]. Збудження квазігармонічних коливань відбувається при певних значеннях потужності зонduючого сигналу, наприклад, на рис. 5 – це значення  $P_{3C}^{(3B1)}$  та  $P_{3C}^{(3B2)}$  (відрізняються за величиною для різних напівпровідникових НРс).

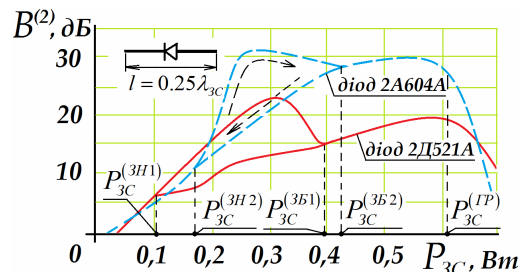


Рисунок 5 – Експериментально встановлена функціональна залежність рівня другої гармоніки розсіяного НРс сигналу відгуку від рівня потужності ЗС НР

Після збудження, як правило, спостерігається падіння амплітуд перевипромінюваних кратних гармонік

частоти ЗС, що пов'язано з перерозподілом поглиненої НРС енергії ЗС НР. Наприклад, до збудження, поглинена НРС енергія ЗС НР йшла на його нагрівання (дисипативні втрати) та перевипромінювання основної складової з кратними їй гармоніками.

Поглинена НРС енергія ЗС НР йде на його нагрівання (дисипативні втрати), перевипромінювання основної складової з кратними їй гармоніками та генерацію з подальшим випромінюванням в навколишнє середовище квазігармонічного сигналу (його частота не є кратною частоті зондуючого сигналу). Зі збільшенням потужності ЗС НР маємо одночасне зростання енергій перевипромінювання основної та кратних їй гармонік і випромінювання квазігармонічного сигналу, та зростання дисипативних втрат. Після деякого граничного значення рівня потужності ЗС  $P_{ЗС}^{(ГР)}$  (див. рис. 5) виникають незворотні перетворення в напівпровідниковій структурі НРС, що може призвести до втрати його напівпровідникових властивостей. У разі зменшення потужності зондуючого сигналу після збудження квазігармонічних коливань слідує одночасне пониження енергій перевипромінювання основної складової з кратними гармоніками і випромінювання квазігармонічного сигналу та падіння дисипативних втрат. При цьому значення потужності ЗС НР, при якому зникає генерування квазігармонічних коливань для одного й того ж НРС, не дорівнює відповідному значенню збудження (наприклад, на рис. 5  $P_{ЗС}^{(ЗБ1)}$  не дорівнює  $P_{ЗС}^{(ЗН1)}$  та  $P_{ЗС}^{(ЗБ2)}$  не дорівнює  $P_{ЗС}^{(ЗН2)}$ ). Таким чином, маємо утворення петлі в функціональній залежності рівня (амплітуди) другої гармоніки в розсіяному НРС сигналі відгуку від рівня потужності ЗС НР.

Отже, перерозподіл поглиненої енергії відносно потужного ЗС НР на генерування напівпровідниковим нелінійним розсіювачем некротних гармонік тісно пов'язаний з інерційністю процесів спотворення ВАХ нелінійної структури під час зниження рівня потужності ЗС НР. Тобто НРС здатен генерувати некротні гармоніки деякий час після припинення дії ЗС НР. Оскільки всі перерозподіли поглиненої напівпровідниковим НРС енергії ЗС НР пов'язані між собою, то наслідком інерційності процесу генерування некротних гармонік є поява області петлеутворення на функціональній залежності рівня (амплітуди) другої гармоніки в розсіяному НРС сигналі відгуку від рівня потужності ЗС НР. Розглянута властивість характерна лише для напівпровідникових НРС, а тому її можна використовувати для виявлення, ідентифікації та локалізації НРС у нелінійній радіолокації. Запропоновано спосіб селекції нелінійних розсіювачів за рівнем однієї гармоніки, що включає випромінювання зондуючого сигналу в напрямку на НРС, приймання та реєстрацію кратної гармоніки як сигналу відгуку, який відрізняється тим, що, при модуляції амплітуди ЗС за пилкоподібним законом для селекції НРС використовується ефект петлевої функціональної залежності рівня (амплітуди) другої гармоніки розсіяного сигналу від рівня потужності ЗС НР. Підвищення ефективності використання НР досягається за рахунок зведення до мінімуму значущостей впливу таких факторів як: присутність у досліджуваному середовищі заводових МОМ-структур; суб'єктивність оператора; присутність паразитних петлюток діаграми направленості випромінюючої антени (за рахунок обмеження рівня потужності ЗС НР).

#### IV Висновки

Перспективним напрямком вдосконалення нелінійних радіолокаторів (НР) є дослідження вторинних демаскуючих ознак напівпровідникових нелінійних розсіювачів (НРС), що безпосередньо покращать ефективність використання засобів нелінійної радіолокації в процесі пошуку закладних пристроїв. Дослідження вторинних демаскуючих ознак стає можливим завдяки аналізу внутрішніх ефектів у напівпровідникових структурах НРС під час дії відносно потужного зондуючого сигналу (ЗС) нелінійного радіолокатора.

Складний напівпровідниковий НРС під час зондування відносно потужним ЗС НР здатен перевипромінювати у навколишнє середовище крім кратних гармонік частоти ЗС (у випадку моногармонічного ЗС або комбінаційних частот у випадку бігармонічного ЗС) власні коливання, що в більшості випадків є некротними гармоніками частоти ЗС НР. Це пов'язано з тим, що під час зондування відносно потужним ЗС НР на ВАХ нелінійних структур напівпровідникових НРС з'являються ділянки з негативним диференціальним опором, які в поєднанні з присутніми зворотними зв'язками призводять до самозбудження системи. Частота будь-якої некротної гармоніки є випадковою величиною, яка достатньо швидко змінюється в часі, оскільки величини параметрів більшості елементів еквівалентної коливальної системи постійно флюктують при дії відносно потужного НВЧ поля.

Наслідком інерційності процесу генерування некротних гармонік є поява області петлеутворення на функціональній залежності рівня (амплітуди) другої гармоніки в розсіяному НРС сигналі відгуку від рівня потужності ЗС НР. Розглянута властивість характерна лише для напівпровідникових НРС, а тому її можна



використовувати для виявлення, ідентифікації та локалізації НРС у нелінійній радіолокації. Підвищення ефективності використання НР досягається за рахунок зведення до мінімуму значущостей впливу таких факторів як: присутність у досліджуваному середовищі заводових МОМ-структур; суб'єктивність оператора; присутність паразитних пелюсток діаграми направленості випромінюючої антени (за рахунок обмеження рівня потужності ЗС НР).

*Література:* 1. Хорошко В. А. Методы и средства защиты информации / В. А. Хорошко, А. А. Чекатков – К. : «Юниор», 2003. – 504 с. 2. Патент України на корисну модель UA 71286 U, G01S 13/00, G01S 13/75, G01S 7/292, G08B 13/24. Спосіб селекції нелінійних розсіювачів за рівнем однієї гармоніки / М. В. Зінченко, Ю. Ф. Зінковський, М. І. Прокоф'єв. – № u201115179; Заявл. 21.12.2011; Опубл. 10.07.2012. – Бюл. № 13/2012. 3. Патент України на корисну модель UA 71287 U, G01S 13/00, G01S 13/75, G01S 7/292, G08B 13/24. Спосіб селекції нелінійних розсіювачів за інертністю процесів спотворення вольт-амперних характеристик напівпровідників / М. В. Зінченко, Ю. Ф. Зінковський, М. І. Прокоф'єв. – № u201115182; Заявл. 21.12.2011; Опубл. 10.07.2012. – Бюл. № 13/2012. 4. Патент України на корисну модель UA 71285 U, G01S 13/00, G01S 13/75, G01S 7/292, G08B 13/24. Спосіб виявлення та розпізнавання нелінійних розсіювачів як випадкових генераторів хаотичних коливань / М. В. Зінченко, Ю. Ф. Зінковський, М. І. Прокоф'єв. – № u201115177; Заявл. 21.12.2011; Опубл. 10.07.2012. – Бюл. № 13/2012. 5. Пат. Российской Федерации RU 2291462 C2, МПК G 01 S 13/04. Система обнаружения и распознавания объектов, включающих элементы с нелинейными вольт-амперными характеристиками / В. Н. Ткач, Д. В. Ткачев, С. Ю. Акимкин. – № 2004134546/09; Заявл. 26.11.2004; Опубл. 12.05.2009. 6. Пат. Российской Федерации RU 2382380 C1, МПК G 01 S 13/00. Способ нелинейной радиолокации / В. П. Лихачев, Н. А. Усов. – № 2008131114/09; Заявл. 28.07.2008; Опубл. 20.02.2010. 7. Кувьлин А. И. Нелинейные рассеиватели и описание их поляризационных характеристик / А. И. Кувьлин, М. Г. Визер // Теория и практика применения и совершенствования радиоэлектронных систем ГА : сборник научных трудов. – М. : МИИГА, 1985. – С. 102. 8. Ларцов С. В. Методы экспериментального исследования поляризационных свойств нелинейных рассеивателей / С. В. Ларцов // Вестник Верхне-волжского отделения академии технологических наук Р.Ф., серия «Высокие технологии в военном деле», часть 1. – Н. Новгород. : НВЗРКУ, 1998. – С. 68-71. 9. Васенков А. А. Дистанционное нелинейное зондирование объектов электромагнитными волнами при наличии границ раздела сред [Текст] : дис. ... к.т.н. : 05.12.04 / Васенков Алексей Андреевич. – Н. Новгород, 2003. – 131 с. 10. Зінченко М. В. Значущість рівня потужності зондуємого сигналу в нелінійній радіолокації / М. В. Зінченко, Ю. Ф. Зінковський, М. І. Прокоф'єв // Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні. Наково-технічний збірник. НТУУ «КПІ» – 2010. – Вип. 1 (20). – С. 102-113. 11. Влияние саморазогрева на динамику колебательных процессов в диодах Ганна / А. В. Бабаян, Д. А. Усанов, А. В. Скрипаль // V Международная школа «Хаотические автоколебания и образование структур ХАОС-98»: 6-10 октября 1998 г.: тез. докл. – Саратов: Изд. ГосУНЦ «Колледж», 1998. – С. 107-108. 12. Установ Д. А. Влияние саморазогрева диодов Ганна на спектр выходного сигнала генераторов на их основе / Д. А. Усанов, А. В. Скрипаль, А. В. Бабаян // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 1998. – Т. 6, №6. – С. 20-28. 13. Ridley B. K. The possibility of negative resistance in semiconductors / B. K. Ridley, T. B. Watkins // Proc. Phys. Soc. London. – 1961. – V. 78. – P. 293-304. 14. Hilsum C. Transferred electron amplifiers and oscillators. / C. Hilsum // Proc IRE. – 1962. – V. 50. – P. 185-189. 15. Deau M. Transferred-electron oscillators / M. Deau, M. Howes, J. Daud // IEEE Trans. Microwave Theory Techn. – 1973. – V. 21. – № 3. – P. 124. 16. Jettava C. P. An analytical equivalent circuit representation for waveguide-mounted Gunn oscillators / C. P. Jettava, L. Robert, L. Yunshor // IEEE Trans. Microwave Theory Techn. – 1972. – V. 20. – № 9. – P. 73.

УДК 623.486

## ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ СИСТЕМ НЕПРЕРЫВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ С ВРЕМЕННЫМ РЕЗЕРВОМ ПРИ ИЗВЕСТНЫХ НАЧАЛЬНЫХ МОМЕНТАХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАРАБОТКИ ДО ОТКАЗА

*Дмитрий Могилевич, Борис Креденцер, \*Виктор Вишневский*  
ВИТИ НТУУ „КПІ”, ВИКНУ

Анотація: Об'єктом дослідження є системи безперервного використання з тимчасовим резервом в