

3. Лихтциндер Б. Я., Кузякин М. А., Росляков А. В., Фомичев С. М. Интеллектуальные сети связи. – М.: Эко-Тренз, 2002. – 297 с. 4. Гольдштейн Б. С., Ехриель И. М., Рерле Р. Д. Интеллектуальные сети // Радио и связь. – 2000. – №17. – С. 24 – 27. 5. Гольдштейн Б. С. Системы коммутации. – СПб.: БХВ, 2003. – 382 с. 6. Щербина Л. П. Системы распределения информации. – Л.: ВАС, 1987. – 321 с. 7. Брус О. В., Могилевич Д. И. Морфологічний аналіз інтелектуальної мережі військового зв'язку // ВІСНІК НТУУ „КПІ”. – Київ., 2005р. - №6. – С. 35 – 39. 8. Брус А. В., Могилевич Д. И., Щербина Л. П. Принципы организационно-технического построения интеллектуальных сетей военной связи // Инновационная деятельность в вооруженных силах Российской Федерации. – Санкт-Петербург.: 2003 г. – №5. – С. 44 – 50.

УДК 638.235.231

ЗНАЧУЩІСТЬ РІВНЯ ПОТУЖНОСТІ ЗОНДУЮЧОГО СИГНАЛУ В НЕЛІНІЙНІЙ РАДІОЛОКАЦІЇ

Максим Зінченко, Юрій Зінковський, Михайло Прокоф'єв

НДЦ «ТЕЗІС» НТУУ «КПІ»

Анотація: Експериментально встановлена значущість факторів, що безпосередньо впливають на ефективність використання засобів нелінійної радіолокації. Представлено гіпотезу щодо фізики процесів у напівпровідникових структурах при дії відносно потужного НВЧ випромінювання нелінійного радіолокатора.

Summary: Weightiness of factors is experimentally found that directly influence efficiency of use of means of a nonlinear radar-location. It is presented a hypothesis concerning physics of processes in semi-conductor structures at influence concerning the powerful microwave oven of radiation from a nonlinear radar.

Ключові слова: Захист інформації, нелінійна радіолокація, закладний пристрій, негативний диференціальний опір.

І Вступ

Пошук закладних пристроїв (ЗП), що не використовують радіоканал для передачі інформації, а також радіозакладок, що перебувають у пасивному (не випромінюючому) стані, традиційними засобами виявлення, такими як панорамні радіоприймачі, аналізатори спектра або детектори поля, не є ефективним [1].

Робота нелінійного радіолокатора (НР) заснована на здатності досліджуваного об'єкта змінювати спектральний склад зондуемого сигналу, тобто випромінювати додаткові кратні чи комбінаційні гармоніки. Ці явища можливі за наявності в складі об'єкта елементів з нелінійними вольт-амперними характеристиками (ВАХ), наприклад, напівпровідників. Об'єкти з нелінійними ВАХ, що мають у своєму складі напівпровідникові елементи, називатимемо електронними, а всі інші – задовими.

Вольт-амперну характеристику напівпровідникового елемента можна розгорнути в степеневий ряд $i = i_0 + a_1 \cdot U + a_2 \cdot U^2 + a_3 \cdot U^3 + \dots$, де i_0 — струм спокою в робочій точці, a_1 — крутизна ВАХ в робочій точці, a_2 — перша похідна крутизни, a_3 — друга похідна крутизни й т. д. При впливі на напівпровідниковий елемент гармонічного сигналу $U = U_0 \cos(\omega t)$, де U_0 — амплітуда сигналу, $\omega = 2\pi f$ — кругова частота сигналу, відгук нелінійного елемента можна описати рівнянням:

$$i_{\text{відг}} = \left(i_0 + \frac{1}{2} a_2 U_0^2 + \dots \right) + \left(a_1 U_0 + \frac{3}{4} a_3 U_0^3 + \dots \right) \cos(\omega t) + \frac{1}{2} a_2 U_0^2 \cos(2\omega t) + \frac{1}{4} a_3 U_0^3 \cos(3\omega t) + \dots$$

Чим вище номер прийнятої гармоніки n , тим менше, як правило, її амплітуда. В сучасних локаторах аналізуються тільки друга і третя гармоніки зондуемого сигналу (ЗС). Для напівпровідникових елементів характерний більш високий рівень випромінюваного сигналу на 2-й гармоніці порівняно з 3-ю (приблизно на 10-40 дБ). Задовими об'єктами можуть бути металеві контакти, що представляють квазінелінійні елементи з нестійким $p-n$ -переходом, викликаним наявністю окислів на поверхні металів. У фізиці напівпровідників подібні структури відомі як «метал - окисел - метал» (МОМ-структури). ВАХ МОМ-структури, на відміну від характеристики $p-n$ -переходу, є симетричною, а тому для МОМ-структур характерний більш високий рівень випромінюваної 3-ї гармоніки порівняно з 2-ю [2].

Отже, розрізнення об'єктів двох класів — електронних і задових — пов'язане з парністю і непарністю ВАХ наявних нелінійних елементів. У реальній пошуковій ситуації на кінцевий результат також впливають радіотехнічні властивості досліджуваних і задових об'єктів на частотах сигналу зондування і його гармонічних складових. Рішення задачі розрізнення (ідентифікації) об'єктів пошуку апаратурою нелінійної радіолокації може бути сформульоване тільки в статистичному сенсі [3].

Алгоритм ідентифікації за співвідношенням рівнів другої і третьої гармонік характерний для більшості сучасних НР, які мають два канали прийому. Слід зазначити, що такий алгоритм пошуку ефективний тільки в разі ідентичності і калібрування обох каналів прийому за коефіцієнтом передачі сигналу.

II Постановка задачі

Незважаючи на бурхливий розвиток засобів нелінійної радіолокації залишаються недостатньо вивченими фізичні процеси у відповідних типових об'єктах дослідження, залежність їх інтенсивності від параметрів зонduючого сигналу НР, виду напівпровідникового матеріалу тощо. Це унеможливує створення єдиної методики оцінки ефективності використання засобів нелінійної радіолокації в галузі технічного захисту інформації. Тому метою даної роботи є натурне дослідження можливих факторів, які, згідно з евристичними міркуваннями, впливають на спроможність виявлення НР закладних пристроїв, розробка на основі експериментальних даних гіпотези щодо фізики процесів у напівпровідникових елементах при дії на них ЗС НР.

III Основна частина

Факторний експеримент пов'язаний з варіюванням впливів одночасно всіх факторів і перевіркою вірогідності результатів математико-статистичними методами. Фактори в експерименті можна варіювати на нескінченній множині рівнів. При плануванні експерименту, щоб одержати результати дослідження в вигляді зручних для аналізу поліномів, досить змінювати фактори на двох рівнях, оскільки експерименти з багаторівневими факторами досить важкі в проведенні.

Розглянемо експериментальне дослідження ефективності засобів нелінійної радіолокації щодо виявлення ЗП в активованому стані.

Для створення матриці планування трьохфакторного експерименту використали наступні кодовані рівні факторів:

x_0 – умови проведення експерименту (для всіх експериментів однакові);

x_1 – вид досліджуваного пристрою («-1» – радіомікрофон, «1» – радіостетоскоп);

x_2 – матеріал корпусу досліджуваного пристрою («-1» – метал, «1» – пластмаса);

x_3 – робоча частота досліджуваного ЗП («-1» – більше 300 МГц, «1» – менше 300 МГц).

Як параметр дослідження розглядали максимальну відстань виявлення п'ятьма різними нелінійними радіолокаторами восьми ЗП (табл. 1), причому y_i значення параметра відповідають наступним НР:

y_1 – «ОНЕГА 3»;

y_2 – «NR 900μ»;

y_3 – «NR 900E»;

y_4 – «РОДНИК 23»;

y_5 – «ЦИКЛОН М1А».

Коефіцієнти рівняння регресії за методом найменших квадратів визначали в наступний спосіб:

$$B = (X \cdot X^T)^{-1} \cdot X^T \cdot Y \quad (1)$$

$$B = (1.357 \quad -0.142 \quad 0.317 \quad -0.193 \quad 0.147 \quad 0.208 \quad 0.027 \quad 0.058)^T$$

За допомогою експериментальних досліджень було встановлено та перевірено наступне рівняння регресії (перевірка значимості коефіцієнтів лінійної регресії була виконана за допомогою критерія Стьюдента) [4, 5]:

$$\hat{y}_u = b_0 x_{0u} + b_1 x_{1u} + b_2 x_{2u} + b_3 x_{3u} + b_4 x_{1u} x_{2u} + b_5 x_{1u} x_{3u},$$

де $\hat{y}_u$ – значення функції відгуку, розраховане за допомогою рівняння регресії в u -му досліді.

З рівняння регресії слідує, що на вихідний параметр, а саме максимальну відстань виявлення ЗП, суттєво впливають всі зазначені фактори, що діють не тільки окремо один від одного, а й разом.

Таблиця 1

Номер експерименту	Досліджуваний пристрій	Фактори				Добуток факторів				Максимальна відстань виявлення ЗП, м					Середнє значення, м
		x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	
1	Р/мкф., f=418 МГц, мет.	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1,6	1,9	1,8	1,2	2	1,7
2	Р/стет., f=410 МГц, мет.	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	0,7	0,8	0,7	0,8	1,1	0,82
3	Р/мкф., f=418 МГц, пластм.	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	2	2,2	2,2	1,8	2,3	2,1
4	Р/стет., f=410 МГц, пластм.	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1,5	1,7	1,6	1,3	1,8	1,58
5	Р/мкф., f=179 МГц, мет.	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0,8	1	1	0,8	1,2	0,96
6	Р/стет., f=108 МГц, мет.	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	0,6	0,7	0,7	0,5	0,9	0,68
7	Р/мкф., f=105 МГц, пластм.	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1,1	1,3	1,3	1	1,5	1,24
8	Р/стет., f=108 МГц, пластм.	1	1	1	1	1	1	1	1	1,6	2	1,9	1,4	2	1,78

Значущість всіх факторів (у відсотках) розраховували за формулою [2]:

$$W_i = \frac{|b_i|}{\hat{y}_{\max}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

де W_i – значущість впливу i -го фактора на значення вихідного параметра; b_i – коефіцієнт рівняння регресії, що відповідає i -му фактору; $\hat{y}_{\max}$ – максимальне значення функції відгуку, розраховане за допомогою рівняння регресії.

Значущість суттєвих взаємодій факторів (у відсотках) визначали за формулою:

$$W_{iu} = \frac{|b_{iu}|}{\hat{y}_{\max}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

де W_{ju} – значущість впливу взаємодії j -го та u -го факторів на значення вихідного параметра; b_{iu} – коефіцієнт рівняння регресії, що відповідає взаємодії j -го та u -го факторів; $\hat{y}_{\max}$ – максимальне значення функції відгуку, розраховане за допомогою рівняння регресії.

У даному випадку значимими факторами є:

- вид досліджуваного пристрою (7%);
- матеріал корпусу досліджуваного пристрою (15%);
- робоча частота досліджуваного пристрою (9%);
- взаємодія виду досліджуваного пристрою з матеріалом його корпусу (7%);
- взаємодія виду досліджуваного пристрою з його робочою частотою (10%).

Далі логічним є експериментальне дослідження ефективності засобів нелінійної радіолокації щодо виявлення пасивних імітаторів ЗП.

Для створення матриці планування трьохфакторного експерименту використали наступні кодовані рівні факторів:

x_0 – умови проведення експерименту (для всіх експериментів однакові);

x_1 – досліджуваний пристрій («-1» – кремнієвий НВЧ діод КД522А, навантажений на прямокутну мікросмушкову антену, «1» – діод КД522А, навантажений на симетричний вібратор);

x_2 – рівень потужності зонduючого сигналу («-1» – рівень потужності зонduючого сигналу НР послаблений, «1» – рівень потужності зонduючого сигналу НР максимальний);

x_3 – резонансна частота антенної структури досліджуваного ЗП («-1» – резонансна частота дорівнює 1600 МГц, «1» – резонансна частота дорівнює 1000 МГц).

Як параметр дослідження розглядали максимальну відстань виявлення п'ятьма різними нелінійними радіолокаторами восьми імітаторів ЗП (табл. 2), причому y_i значення параметра відповідають вище представленим НР.

Коефіцієнти рівняння регресії визначали за формулою (1):

$$B = (0.411 \quad -1.25 \times 10^{-3} \quad 0.124 \quad 3.75 \times 10^{-3} \quad 0.011 \quad 0.031 \quad 0.046 \quad 3.75 \times 10^{-3})^T$$

За допомогою експериментальних досліджень було встановлено та перевірено наступне рівняння регресії (перевірка значимості коефіцієнтів лінійної регресії була виконана за допомогою критерія Стьюдента):

$$\hat{y}_i = b_0 x_{0i} + b_1 x_{1i} + b_2 x_{2i} + b_3 x_{3i} + b_4 x_{4i} + b_5 x_{5i} + b_6 x_{6i} + b_7 x_{7i} + b_8 x_{8i} + b_9 x_{9i} + b_{10} x_{10i} + b_{11} x_{11i} + b_{12} x_{12i} + b_{13} x_{13i} + b_{14} x_{14i} + b_{15} x_{15i} + b_{16} x_{16i} + b_{17} x_{17i} + b_{18} x_{18i} + b_{19} x_{19i} + b_{20} x_{20i} + b_{21} x_{21i} + b_{22} x_{22i} + b_{23} x_{23i} + b_{24} x_{24i} + b_{25} x_{25i} + b_{26} x_{26i} + b_{27} x_{27i} + b_{28} x_{28i} + b_{29} x_{29i} + b_{30} x_{30i} + b_{31} x_{31i} + b_{32} x_{32i} + b_{33} x_{33i} + b_{34} x_{34i} + b_{35} x_{35i} + b_{36} x_{36i} + b_{37} x_{37i} + b_{38} x_{38i} + b_{39} x_{39i} + b_{40} x_{40i} + b_{41} x_{41i} + b_{42} x_{42i} + b_{43} x_{43i} + b_{44} x_{44i} + b_{45} x_{45i} + b_{46} x_{46i} + b_{47} x_{47i} + b_{48} x_{48i} + b_{49} x_{49i} + b_{50} x_{50i} + b_{51} x_{51i} + b_{52} x_{52i} + b_{53} x_{53i} + b_{54} x_{54i} + b_{55} x_{55i} + b_{56} x_{56i} + b_{57} x_{57i} + b_{58} x_{58i} + b_{59} x_{59i} + b_{60} x_{60i} + b_{61} x_{61i} + b_{62} x_{62i} + b_{63} x_{63i} + b_{64} x_{64i} + b_{65} x_{65i} + b_{66} x_{66i} + b_{67} x_{67i} + b_{68} x_{68i} + b_{69} x_{69i} + b_{70} x_{70i} + b_{71} x_{71i} + b_{72} x_{72i} + b_{73} x_{73i} + b_{74} x_{74i} + b_{75} x_{75i} + b_{76} x_{76i} + b_{77} x_{77i} + b_{78} x_{78i} + b_{79} x_{79i} + b_{80} x_{80i} + b_{81} x_{81i} + b_{82} x_{82i} + b_{83} x_{83i} + b_{84} x_{84i} + b_{85} x_{85i} + b_{86} x_{86i} + b_{87} x_{87i} + b_{88} x_{88i} + b_{89} x_{89i} + b_{90} x_{90i} + b_{91} x_{91i} + b_{92} x_{92i} + b_{93} x_{93i} + b_{94} x_{94i} + b_{95} x_{95i} + b_{96} x_{96i} + b_{97} x_{97i} + b_{98} x_{98i} + b_{99} x_{99i} + b_{100} x_{100i} + b_{101} x_{101i} + b_{102} x_{102i} + b_{103} x_{103i} + b_{104} x_{104i} + b_{105} x_{105i} + b_{106} x_{106i} + b_{107} x_{107i} + b_{108} x_{108i} + b_{109} x_{109i} + b_{110} x_{110i} + b_{111} x_{111i} + b_{112} x_{112i} + b_{113} x_{113i} + b_{114} x_{114i} + b_{115} x_{115i} + b_{116} x_{116i} + b_{117} x_{117i} + b_{118} x_{118i} + b_{119} x_{119i} + b_{120} x_{120i} + b_{121} x_{121i} + b_{122} x_{122i} + b_{123} x_{123i} + b_{124} x_{124i} + b_{125} x_{125i} + b_{126} x_{126i} + b_{127} x_{127i} + b_{128} x_{128i} + b_{129} x_{129i} + b_{130} x_{130i} + b_{131} x_{131i} + b_{132} x_{132i} + b_{133} x_{133i} + b_{134} x_{134i} + b_{135} x_{135i} + b_{136} x_{136i} + b_{137} x_{137i} + b_{138} x_{138i} + b_{139} x_{139i} + b_{140} x_{140i} + b_{141} x_{141i} + b_{142} x_{142i} + b_{143} x_{143i} + b_{144} x_{144i} + b_{145} x_{145i} + b_{146} x_{146i} + b_{147} x_{147i} + b_{148} x_{148i} + b_{149} x_{149i} + b_{150} x_{150i} + b_{151} x_{151i} + b_{152} x_{152i} + b_{153} x_{153i} + b_{154} x_{154i} + b_{155} x_{155i} + b_{156} x_{156i} + b_{157} x_{157i} + b_{158} x_{158i} + b_{159} x_{159i} + b_{160} x_{160i} + b_{161} x_{161i} + b_{162} x_{162i} + b_{163} x_{163i} + b_{164} x_{164i} + b_{165} x_{165i} + b_{166} x_{166i} + b_{167} x_{167i} + b_{168} x_{168i} + b_{169} x_{169i} + b_{170} x_{170i} + b_{171} x_{171i} + b_{172} x_{172i} + b_{173} x_{173i} + b_{174} x_{174i} + b_{175} x_{175i} + b_{176} x_{176i} + b_{177} x_{177i} + b_{178} x_{178i} + b_{179} x_{179i} + b_{180} x_{180i} + b_{181} x_{181i} + b_{182} x_{182i} + b_{183} x_{183i} + b_{184} x_{184i} + b_{185} x_{185i} + b_{186} x_{186i} + b_{187} x_{187i} + b_{188} x_{188i} + b_{189} x_{189i} + b_{190} x_{190i} + b_{191} x_{191i} + b_{192} x_{192i} + b_{193} x_{193i} + b_{194} x_{194i} + b_{195} x_{195i} + b_{196} x_{196i} + b_{197} x_{197i} + b_{198} x_{198i} + b_{199} x_{199i} + b_{200} x_{200i} + b_{201} x_{201i} + b_{202} x_{202i} + b_{203} x_{203i} + b_{204} x_{204i} + b_{205} x_{205i} + b_{206} x_{206i} + b_{207} x_{207i} + b_{208} x_{208i} + b_{209} x_{209i} + b_{210} x_{210i} + b_{211} x_{211i} + b_{212} x_{212i} + b_{213} x_{213i} + b_{214} x_{214i} + b_{215} x_{215i} + b_{216} x_{216i} + b_{217} x_{217i} + b_{218} x_{218i} + b_{219} x_{219i} + b_{220} x_{220i} + b_{221} x_{221i} + b_{222} x_{222i} + b_{223} x_{223i} + b_{224} x_{224i} + b_{225} x_{225i} + b_{226} x_{226i} + b_{227} x_{227i} + b_{228} x_{228i} + b_{229} x_{229i} + b_{230} x_{230i} + b_{231} x_{231i} + b_{232} x_{232i} + b_{233} x_{233i} + b_{234} x_{234i} + b_{235} x_{235i} + b_{236} x_{236i} + b_{237} x_{237i} + b_{238} x_{238i} + b_{239} x_{239i} + b_{240} x_{240i} + b_{241} x_{241i} + b_{242} x_{242i} + b_{243} x_{243i} + b_{244} x_{244i} + b_{245} x_{245i} + b_{246} x_{246i} + b_{247} x_{247i} + b_{248} x_{248i} + b_{249} x_{249i} + b_{250} x_{250i} + b_{251} x_{251i} + b_{252} x_{252i} + b_{253} x_{253i} + b_{254} x_{254i} + b_{255} x_{255i} + b_{256} x_{256i} + b_{257} x_{257i} + b_{258} x_{258i} + b_{259} x_{259i} + b_{260} x_{260i} + b_{261} x_{261i} + b_{262} x_{262i} + b_{263} x_{263i} + b_{264} x_{264i} + b_{265} x_{265i} + b_{266} x_{266i} + b_{267} x_{267i} + b_{268} x_{268i} + b_{269} x_{269i} + b_{270} x_{270i} + b_{271} x_{271i} + b_{272} x_{272i} + b_{273} x_{273i} + b_{274} x_{274i} + b_{275} x_{275i} + b_{276} x_{276i} + b_{277} x_{277i} + b_{278} x_{278i} + b_{279} x_{279i} + b_{280} x_{280i} + b_{281} x_{281i} + b_{282} x_{282i} + b_{283} x_{283i} + b_{284} x_{284i} + b_{285} x_{285i} + b_{286} x_{286i} + b_{287} x_{287i} + b_{288} x_{288i} + b_{289} x_{289i} + b_{290} x_{290i} + b_{291} x_{291i} + b_{292} x_{292i} + b_{293} x_{293i} + b_{294} x_{294i} + b_{295} x_{295i} + b_{296} x_{296i} + b_{297} x_{297i} + b_{298} x_{298i} + b_{299} x_{299i} + b_{300} x_{300i} + b_{301} x_{301i} + b_{302} x_{302i} + b_{303} x_{303i} + b_{304} x_{304i} + b_{305} x_{305i} + b_{306} x_{306i} + b_{307} x_{307i} + b_{308} x_{308i} + b_{309} x_{309i} + b_{310} x_{310i} + b_{311} x_{311i} + b_{312} x_{312i} + b_{313} x_{313i} + b_{314} x_{314i} + b_{315} x_{315i} + b_{316} x_{316i} + b_{317} x_{317i} + b_{318} x_{318i} + b_{319} x_{319i} + b_{320} x_{320i} + b_{321} x_{321i} + b_{322} x_{322i} + b_{323} x_{323i} + b_{324} x_{324i} + b_{325} x_{325i} + b_{326} x_{326i} + b_{327} x_{327i} + b_{328} x_{328i} + b_{329} x_{329i} + b_{330} x_{330i} + b_{331} x_{331i} + b_{332} x_{332i} + b_{333} x_{333i} + b_{334} x_{334i} + b_{335} x_{335i} + b_{336} x_{336i} + b_{337} x_{337i} + b_{338} x_{338i} + b_{339} x_{339i} + b_{340} x_{340i} + b_{341} x_{341i} + b_{342} x_{342i} + b_{343} x_{343i} + b_{344} x_{344i} + b_{345} x_{345i} + b_{346} x_{346i} + b_{347} x_{347i} + b_{348} x_{348i} + b_{349} x_{349i} + b_{350} x_{350i} + b_{351} x_{351i} + b_{352} x_{352i} + b_{353} x_{353i} + b_{354} x_{354i} + b_{355} x_{355i} + b_{356} x_{356i} + b_{357} x_{357i} + b_{358} x_{358i} + b_{359} x_{359i} + b_{360} x_{360i} + b_{361} x_{361i} + b_{362} x_{362i} + b_{363} x_{363i} + b_{364} x_{364i} + b_{365} x_{365i} + b_{366} x_{366i} + b_{367} x_{367i} + b_{368} x_{368i} + b_{369} x_{369i} + b_{370} x_{370i} + b_{371} x_{371i} + b_{372} x_{372i} + b_{373} x_{373i} + b_{374} x_{374i} + b_{375} x_{375i} + b_{376} x_{376i} + b_{377} x_{377i} + b_{378} x_{378i} + b_{379} x_{379i} + b_{380} x_{380i} + b_{381} x_{381i} + b_{382} x_{382i} + b_{383} x_{383i} + b_{384} x_{384i} + b_{385} x_{385i} + b_{386} x_{386i} + b_{387} x_{387i} + b_{388} x_{388i} + b_{389} x_{389i} + b_{390} x_{390i} + b_{391} x_{391i} + b_{392} x_{392i} + b_{393} x_{393i} + b_{394} x_{394i} + b_{395} x_{395i} + b_{396} x_{396i} + b_{397} x_{397i} + b_{398} x_{398i} + b_{399} x_{399i} + b_{400} x_{400i} + b_{401} x_{401i} + b_{402} x_{402i} + b_{403} x_{403i} + b_{404} x_{404i} + b_{405} x_{405i} + b_{406} x_{406i} + b_{407} x_{407i} + b_{408} x_{408i} + b_{409} x_{409i} + b_{410} x_{410i} + b_{411} x_{411i} + b_{412} x_{412i} + b_{413} x_{413i} + b_{414} x_{414i} + b_{415} x_{415i} + b_{416} x_{416i} + b_{417} x_{417i} + b_{418} x_{418i} + b_{419} x_{419i} + b_{420} x_{420i} + b_{421} x_{421i} + b_{422} x_{422i} + b_{423} x_{423i} + b_{424} x_{424i} + b_{425} x_{425i} + b_{426} x_{426i} + b_{427} x_{427i} + b_{428} x_{428i} + b_{429} x_{429i} + b_{430} x_{430i} + b_{431} x_{431i} + b_{432} x_{432i} + b_{433} x_{433i} + b_{434} x_{434i} + b_{435} x_{435i} + b_{436} x_{436i} + b_{437} x_{437i} + b_{438} x_{438i} + b_{439} x_{439i} + b_{440} x_{440i} + b_{441} x_{441i} + b_{442} x_{442i} + b_{443} x_{443i} + b_{444} x_{444i} + b_{445} x_{445i} + b_{446} x_{446i} + b_{447} x_{447i} + b_{448} x_{448i} + b_{449} x_{449i} + b_{450} x_{450i} + b_{451} x_{451i} + b_{452} x_{452i} + b_{453} x_{453i} + b_{454} x_{454i} + b_{455} x_{455i} + b_{456} x_{456i} + b_{457} x_{457i} + b_{458} x_{458i} + b_{459} x_{459i} + b_{460} x_{460i} + b_{461} x_{461i} + b_{462} x_{462i} + b_{463} x_{463i} + b_{464} x_{464i} + b_{465} x_{465i} + b_{466} x_{466i} + b_{467} x_{467i} + b_{468} x_{468i} + b_{469} x_{469i} + b_{470} x_{470i} + b_{471} x_{471i} + b_{472} x_{472i} + b_{473} x_{473i} + b_{474} x_{474i} + b_{475} x_{475i} + b_{476} x_{476i} + b_{477} x_{477i} + b_{478} x_{478i} + b_{479} x_{479i} + b_{480} x_{480i} + b_{481} x_{481i} + b_{482} x_{482i} + b_{483} x_{483i} + b_{484} x_{484i} + b_{485} x_{485i} + b_{486} x_{486i} + b_{487} x_{487i} + b_{488} x_{488i} + b_{489} x_{489i} + b_{490} x_{490i} + b_{491} x_{491i} + b_{492} x_{492i} + b_{493} x_{493i} + b_{494} x_{494i} + b_{495} x_{495i} + b_{496} x_{496i} + b_{497} x_{497i} + b_{498} x_{498i} + b_{499} x_{499i} + b_{500} x_{500i} + b_{501} x_{501i} + b_{502} x_{502i} + b_{503} x_{503i} + b_{504} x_{504i} + b_{505} x_{505i} + b_{506} x_{506i} + b_{507} x_{507i} + b_{508} x_{508i} + b_{509} x_{509i} + b_{510} x_{510i} + b_{511} x_{511i} + b_{512} x_{512i} + b_{513} x_{513i} + b_{514} x_{514i} + b_{515} x_{515i} + b_{516} x_{516i} + b_{517} x_{517i} + b_{518} x_{518i} + b_{519} x_{519i} + b_{520} x_{520i} + b_{521} x_{521i} + b_{522} x_{522i} + b_{523} x_{523i} + b_{524} x_{524i} + b_{525} x_{525i} + b_{526} x_{526i} + b_{527} x_{527i} + b_{528} x_{528i} + b_{529} x_{529i} + b_{530} x_{530i} + b_{531} x_{531i} + b_{532} x_{532i} + b_{533} x_{533i} + b_{534} x_{534i} + b_{535} x_{535i} + b_{536} x_{536i} + b_{537} x_{537i} + b_{538} x_{538i} + b_{539} x_{539i} + b_{540} x_{540i} + b_{541} x_{541i} + b_{542} x_{542i} + b_{543} x_{543i} + b_{544} x_{544i} + b_{545} x_{545i} + b_{546} x_{546i} + b_{547} x_{547i} + b_{548} x_{548i} + b_{549} x_{549i} + b_{550} x_{550i} + b_{551} x_{551i} + b_{552} x_{552i} + b_{553} x_{553i} + b_{554} x_{554i} + b_{555} x_{555i} + b_{556} x_{556i} + b_{557} x_{557i} + b_{558} x_{558i} + b_{559} x_{559i} + b_{560} x_{560i} + b_{561} x_{561i} + b_{562} x_{562i} + b_{563} x_{563i} + b_{564} x_{564i} + b_{565} x_{565i} + b_{566} x_{566i} + b_{567} x_{567i} + b_{568} x_{568i} + b_{569} x_{569i} + b_{570} x_{570i} + b_{571} x_{571i} + b_{572} x_{572i} + b_{573} x_{573i} + b_{574} x_{574i} + b_{575} x_{575i} + b_{576} x_{576i} + b_{577} x_{577i} + b_{578} x_{578i} + b_{579} x_{579i} + b_{580} x_{580i} + b_{581} x_{581i} + b_{582} x_{582i} + b_{583} x_{583i} + b_{584} x_{584i} + b_{585} x_{585i} + b_{586} x_{586i} + b_{587} x_{587i} + b_{588} x_{588i} + b_{589} x_{589i} + b_{590} x_{590i} + b_{591} x_{591i} + b_{592} x_{592i} + b_{593} x_{593i} + b_{594} x_{594i} + b_{595} x_{595i} + b_{596} x_{596i} + b_{597} x_{597i} + b_{598} x_{598i} + b_{599} x_{599i} + b_{600} x_{600i} + b_{601} x_{601i} + b_{602} x_{602i} + b_{603} x_{603i} + b_{604} x_{604i} + b_{605} x_{605i} + b_{606} x_{606i} + b_{607} x_{607i} + b_{608} x_{608i} + b_{609} x_{609i} + b_{610} x_{610i} + b_{611} x_{611i} + b_{612} x_{612i} + b_{613} x_{613i} + b_{614} x_{614i} + b_{615} x_{615i} + b_{616} x_{616i} + b_{617} x_{617i} + b_{618} x_{618i} + b_{619} x_{619i} + b_{620} x_{620i} + b_{621} x_{621i} + b_{622} x_{622i} + b_{623} x_{623i} + b_{624} x_{624i} + b_{625} x_{625i} + b_{626} x_{626i} + b_{627} x_{627i} + b_{628} x_{628i} + b_{629} x_{629i} + b_{630} x_{630i} + b_{631} x_{631i} + b_{632} x_{632i} + b_{633} x_{633i} + b_{634} x_{634i} + b_{635} x_{635i} + b_{636} x_{636i} + b_{637} x_{637i} + b_{638} x_{638i} + b_{639} x_{639i} + b_{640} x_{640i} + b_{641} x_{641i} + b_{642} x_{642i} + b_{643} x_{643i} + b_{644} x_{644i} + b_{645} x_{645i} + b_{646} x_{646i} + b_{647} x_{647i} + b_{648} x_{648i} + b_{649} x_{649i} + b_{650} x_{650i} + b_{651} x_{651i} + b_{652} x_{652i} + b_{653} x_{653i} + b_{654} x_{654i} + b_{655} x_{655i} + b_{656} x_{656i} + b_{657} x_{657i} + b_{658} x_{658i} + b_{659} x_{659i} + b_{660} x_{660i} + b_{661} x_{661i} + b_{662} x_{662i} + b_{663} x_{663i} + b_{664} x_{664i} + b_{665} x_{665i} + b_{666} x_{666i} + b_{667} x_{667i} + b_{668} x_{668i} + b_{669} x_{669i} + b_{670} x_{670i} + b_{671} x_{671i} + b_{672} x_{672i} + b_{673} x_{673i} + b_{674} x_{674i} + b_{675} x_{675i} + b_{676} x_{676i} + b_{677} x_{677i} + b_{678} x_{678i} + b_{679} x_{679i} + b_{680} x_{680i} + b_{681} x_{681i} + b_{682} x_{682i} + b_{683} x_{683i} + b_{684} x_{684i} + b_{685} x_{685i} + b_{686} x_{686i} + b_{687} x_{687i} + b_{688} x_{688i} + b_{689} x_{689i} + b_{690} x_{690i} + b_{691} x_{691i} + b_{692} x_{692i} + b_{693} x_{693i} + b_{694} x_{694i} + b_{695} x_{695i} + b_{696} x_{696i} + b_{697} x_{697i} + b_{698} x_{698i} + b_{699} x_{699i} + b_{700} x_{700i} + b_{701} x_{701i} + b_{702} x_{702i} + b_{703} x_{703i} + b_{704} x_{704i} + b_{705} x_{705i} + b_{706} x_{706i} + b_{707} x_{707i} + b_{708} x_{708i} + b_{709} x_{709i} + b_{710} x_{710i} + b_{711} x_{711i} + b_{712} x_{712i} + b_{713} x_{713i} + b_{714} x_{714i} + b_{715} x_{715i} + b_{716} x_{716i} + b_{717} x_{717i} + b_{718} x_{718i} + b_{719} x_{719i} + b_{720} x_{720i} + b_{721} x_{721i} + b_{722} x_{722i} + b_{723} x_{723i} + b_{724} x_{724i} + b_{725} x_{725i} + b_{726} x_{726i} + b_{727} x_{727i} + b_{728} x_{728i} + b_{729} x_{729i} + b_{730} x_{730i} + b_{731} x_{731i} + b_{732} x_{732i} + b_{733} x_{733i} + b_{734} x_{734i} + b_{735} x_{735i} + b_{736} x_{736i} + b_{737} x_{737i} + b_{738} x_{738i} + b_{739} x_{739i} + b_{740} x_{740i} + b_{741} x_{741i} + b_{742} x_{742i} + b_{743} x_{743i} + b_{744} x_{744i} + b_{745} x_{745i} + b_{746} x_{746i} + b_{747} x_{747i} + b_{748} x_{748i} + b_{749} x_{749i} + b_{750} x_{750i} + b_{751} x_{751i} + b_{752} x_{752i} + b_{753} x_{753i} + b_{754} x_{754i} + b_{755} x_{755i} + b_{756} x_{756i} + b_{757} x_{757i} + b_{758} x_{758i} + b_{759} x_{759i} + b_{760} x_{760i} + b_{761} x_{761i} + b_{762} x_{762i} + b_{763} x_{763i} + b_{764} x_{764i} + b_{765} x_{765i} + b_{766} x_{766i} + b_{767} x_{767i} + b_{768} x_{768i} + b_{769} x_{769i} + b_{770} x_{770i} + b_{771} x_{771i} + b_{772} x_{772i} + b_{773} x_{773i} + b_{774} x_{774i} + b_{775} x_{775i} + b_{776} x_{776i} + b_{777} x_{777i} + b_{778} x_{778i} + b_{779} x_{779i} + b_{780} x_{780i} + b_{781} x_{781i} + b_{782} x_{782i} + b_{783} x_{783i} + b_{784} x_{784i} + b_{785} x_{785i} + b_{786} x_{786i} + b_{787} x_{787i} + b_{788} x_{788i} + b_{789} x_{789i} + b_{790} x_{790i} + b_{791} x_{791i} + b_{792} x_{792i} + b_{793} x_{793i} + b_{794} x_{794i} + b_{795} x_{795i} + b_{796} x_{796i} + b_{797} x_{797i} + b_{798} x_{798i} + b_{799} x_{799i} + b_{800} x_{800i} + b_{801} x_{801i} + b_{802} x_{802i} + b_{803} x_{803i} + b_{804} x_{804i} + b_{805} x_{805i} + b_{806} x_{806i} + b_{807} x_{807i} + b_{808} x_{808i} + b_{809} x_{809i} + b_{810} x_{810i} + b_{811} x_{811i} + b_{812} x_{812i} + b_{813} x_{813i} + b_{814} x_{814i} + b_{815} x_{815i} + b_{816} x_{816i} + b_{817} x_{817i} + b_{818} x_{818i} + b_{819} x_{819i} + b_{820} x_{820i} + b_{821} x_{821i} + b_{822} x_{822i} + b_{823} x_{823i} + b_{824} x_{824i} + b_{825} x_{825i} + b_{826} x_{826i} + b_{827} x_{827i} + b_{828} x_{828i} + b_{829} x_{829i} + b_{830} x_{830i} + b_{831} x_{831i} + b_{832} x_{832i} + b_{833} x_{833i} + b_{834} x_{834i} + b_{835} x_{835i} + b_{836} x_{836i} + b_{837} x_{837i} + b_{838} x_{838i} + b_{839} x_{839i} + b_{840} x_{840i} + b_{841} x_{841i} + b_{842} x_{842i} + b_{843} x_{843i} + b_{844} x_{844i} + b_{845} x_{845i} + b_{846} x_{846i} + b_{847} x_{847i} + b_{848} x_{848i} + b_{849} x_{849i} + b_{850} x_{850i} + b_{851} x_{851i} + b_{852} x_{852i} + b_{853} x_{853i} + b_{854} x_{854i} + b_{855} x_{855i} + b_{856} x_{856i} + b_{857} x_{857i} + b_{858}$$

x_3 – площа вимірювання рівня напруженості електричної складової електромагнітного поля («-1» – вертикальна, «1» – горизонтальна).

Як параметр дослідження розглядали ширину головної пелюстки діаграми спрямованості випромінюючих антен різних НР, що визначається зміною величини рівня напруженості електричної складової електромагнітного поля за відхиленням відносно осі симетрії антени (табл. 3), причому y_i значення параметра відповідають вище згаданим НР.

Коефіцієнти рівняння регресії визначили за формулою (1):

$$B = (91.638 \quad -20.987 \quad -4.212 \quad -2.212 \quad 0.763 \quad -0.238 \quad 0.638 \quad 0.812)^T.$$

За допомогою експериментальних досліджень було встановлено та перевірено наступне рівняння регресії (перевірка значимості коефіцієнтів лінійної регресії була виконана за допомогою критерія Стюдента):

$$\hat{y}_i = b_0 x_{0i} + b_1 x_{1i} + b_2 x_{2i}.$$

Значущість усіх факторів (у відсотках) розраховували за формулою (2), а суттєвих взаємодій факторів (у відсотках) відповідно за формулою (3).

У даному випадку маємо значимість тільки окремо діючих один від одного двох факторів – відстані, на якій досліджують рівень напруженості електричної складової електромагнітного поля (18%) та рівень потужності зондування випромінювання НР (4%).

Проведені три натурні експериментальні дослідження за повнофакторним планом дали наступні оцінки:

- 15% та 7% мають значущості впливу таких факторів як матеріал корпусу досліджуваного пристрою і його взаємодії з видом цього пристрою на **здатність виявляти ЗП в активованому стані засобами нелінійної радіолокації**. Це пов'язано з тим, що матеріал корпусу визначав рівень поглиненої потужності ЗС в досліджуваному ЗП;
- 20% та 8% мають значущості впливу таких факторів як рівень потужності ЗС НР та його взаємодії з резонансною частотою антенної структури імітатора ЗП відповідно на **здатність виявляти пасивні імітатори ЗП засобами нелінійної радіолокації**;
- 4% має значущість впливу фактора рівня потужності зондування випромінювання НР на **здатність локалізувати ЗП засобами нелінійної радіолокації**.

Таблиця 3

Номер експ-ту	Умови дослідження	Фактори				Добуток факторів				Ширина головної пелюстки ДС, °					Середнє значення, °
		x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	
1	R= 0.5 м, P _{ЗС} =maxP _{НР} , верт. пл.	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	130	120	118	105	124	119,4
2	R= 3 м, P _{ЗС} =maxP _{НР} , верт. пл.	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	76	85	75	65	89	78
3	R= 0.5 м, P _{ЗС} <maxP _{НР} , верт. пл.	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	99	110	110	97	133	109,8
4	R= 3 м, P _{ЗС} <maxP _{НР} , верт. пл.	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	62	68	63	60	88	68,2
5	R= 0.5 м, P _{ЗС} =maxP _{НР} , горизонт. пл.	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	110	121	118	100	130	115,8
6	R= 3 м, P _{ЗС} =maxP _{НР} , горизонт. пл.	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	60	66	66	60	99	70,2
7	R= 0.5 м, P _{ЗС} <maxP _{НР} , горизонт. пл.	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	97	110	105	91	125	105,6
8	R= 3 м, P _{ЗС} <maxP _{НР} , горизонт. пл.	1	1	1	1	1	1	1	1	61	60	62	60	88	66,2

Все це переконує, що високий рівень потужності НВЧ поля істотно впливає на демаскуючі властивості досліджуваних ЗП з нелінійними елементами. Це пов'язано зі зміною початкових вольт-амперних характеристик напівпровідників, наприклад, діодів внаслідок появи значного термоструму гарячих носіїв заряду через р–п-перехід, тому виникає питання в доцільності використання в НР високих рівнів потужності ЗС, оскільки саме ВАХ діодів визначає ефективність ідентифікації напівпровідників засобами нелінійної радіолокації за співвідношенням рівнів 2-ї та 3-ї гармонік прийнятого сигналу відгуку.

В роботі [6] теоретично показано та експериментально підтверджено, що випромінюване НР НВЧ поле впливає на характеристики струмопереносу в структурах на основі р–п-переходів. Виникає ділянка з негативним диференціальним опором (НДО) на ВАХ кремнієвих діодних структур при впливі на них відносно високого рівня НВЧ потужності ЗС НР. Це пояснюється розігрівом носіїв заряду і детекторним ефектом. На рис. 1 представлені експериментальні та теоретичні ВАХ кремнієвого НВЧ діода для різних значень потужності вхідного сигналу P_0 (дані характеристики відповідають частотам зондування більшості НР).

Нехай напруга на р–п-переході змінюється за законом

$$\tilde{U}(t, U_s) = U_0 + U_s \cos(\omega t),$$

де U_0 – напруга зміщення ($U_0 = 0.5$ В). Тоді функція відгуку матиме вид

$$I_{\text{відг}}(t, U_s) = Fx(\tilde{U}(t, U_s)),$$

де Fx – функція інтерполяції вольт-амперної характеристики р–п-переходу.

Оскільки напруга на діоді змінюється за косинусоїдальним законом, то для розрахунку рівнів гармонік використовується спектральне перетворення Фур'є для косинусних компонент

$$Ax(n_G, U_s) = \frac{1}{T} \int_{-T}^T Fx(z, U_s) \cos\left(\frac{n_G \pi z}{T}\right) dz,$$

де $Ax(n_G, U_s)$ – залежність рівня n_G -ї гармоніки від амплітуди змінної напруги на р–п-переході, $T = 10^{-9}$ с. Особливістю даного розкладу на гармоніки є те, що рівні всіх непарних гармонік дорівнюють нулю. На рис. 2 представлені залежності рівнів основних гармонік сигналу відгуку від амплітуди змінної напруги U_s .

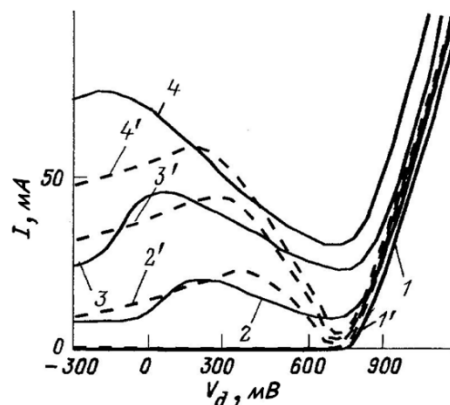


Рисунок 1 – Експериментальні (1–4) і теоретичні (1'–4') вольт-амперні характеристики $I(V_d)$ НВЧ діода 2А604А для різних значень потужності вхідного сигналу P_0 , мВт: 1, 1' — 0; 2, 2' — 150; 3, 3' — 350; 4, 4' — 500

За відсутності потужного НВЧ сигналу для отримання необхідного рівня другої гармоніки, що буде прийнятою НР, потрібно створити відносно велике значення амплітуди змінної напруги на р–п-переході, наприклад, при напрузі зміщення в 0.5 В величина U_s повинна перевищувати 0.35 В. У випадку опромінення НВЧ полем (рис. 2 а,б) друга гармоніка при заданих значеннях U_s зсунута по фазі на 180° , що в свою чергу пов'язано з від'ємною крутизною ділянки з НДО. Згідно з рис. 2 а,б зі збільшенням потужності вхідного сигналу P_0 мінімальне значення величини U_s для створення необхідного рівня другої гармоніки

зменшується і не перевищує 0.1 В, а це в свою чергу підвищує вірогідність знаходження та ідентифікації напівпровідника засобами нелінійної радіолокації за співвідношенням рівнів 2-ї та 3-ї гармонік прийнятого сигналу відгуку нелінійного елемента (демаскуючого сигналу).

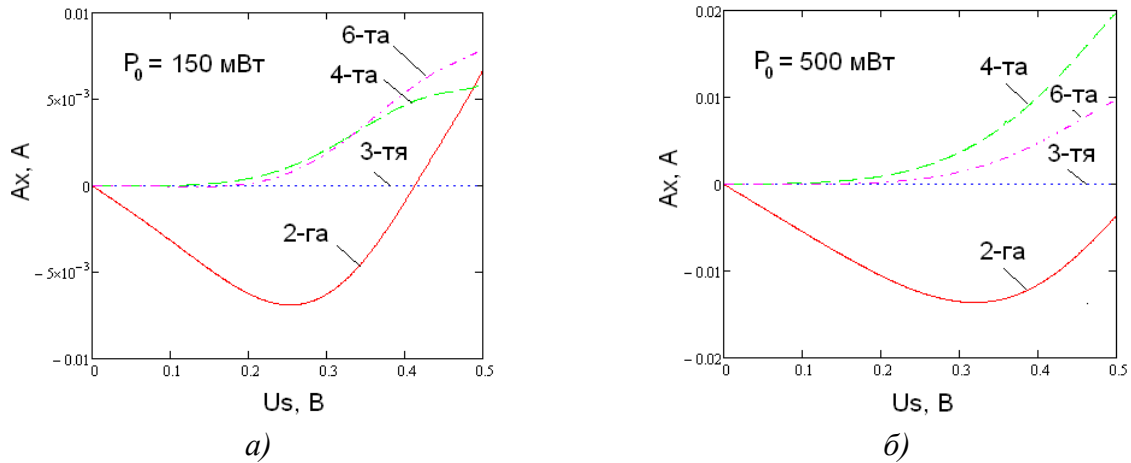


Рисунок 2 — Залежність рівнів основних гармонік сигналу відгуку від амплітуди змінної напруги U_s в функції, що інтерполює ВАХ діода при потужності вхідного сигналу P_0 , мВт: а) 150; б) 500

Розглянемо як впливають вище представлені нелінійності на особливості *розсіювання демаскуючого сигналу досліджуванним об'єктом*.

Як найпростіший імітатор ЗП для НР часто використовують напівпровідниковий діод, навантажений на симетричний вібратор. Нехай, в середовищі, заповненому однорідною лінійною ізотропною речовиною з діелектричною ϵ_a та магнітною μ_0 проникностями, провідністю σ розташований циліндричної форми радіуса a електричний вібратор довжини $2l$. Вібратор має область V_{p-n} (розріз), обмежену двома металевими поперечними перерізами $S_{\perp}(-b)$ та $S_{\perp}(b)$, розташованими на відстані $2b \ll 2l$, і заповнену немагнітною речовиною з нелінійними за електричним полем властивостями. До розрізу вібратора підводиться стороннє постійне електричне поле "зсуву" з напруженістю E_{00}^{cm} . На деяких відстанях від осі вібратора розташовані два сторонні джерела електромагнітного поля (ЕМП): перше збуджує електромагнітне поле на частоті ω , друге – на частоті Ω . Позначимо напруженість сумарного падаючого електричного поля через $\bar{E}^{nao}(p, t)$, де p – точка спостереження, t – час (див. рис. 3).

Припустимо, що вібратор знаходиться в зонах Фраунгофера обох сторонніх джерел. Тоді падаюче поле в околі вібратора є суперпозицією двох локально плоских хвиль, що падають під кутами ϑ_{10} та ϑ_{01} щодо нормалі до осі вібратора. На область V_{p-n} впливає стороннє ЕМП з напруженостями електричного та магнітного полів $E^{cm}(p, t)$, $H^{cm}(p, t)$, які утворені накладенням двох гармонічних полів і поля постійного "зсуву". Це стороннє поле створює в області V_{p-n} сторонній струм, для представлення якого використаємо модель нитки лінійного струму щільності $\bar{I}^{cm}(z, t) = 1_z i^{cm}(z, t)$ [8], де 1_z – одиничний вектор, паралельний осі z , $i^{cm}(z, t)$ – струм в перетині $S_{\perp}(z)$. Струм $\bar{I}^{cm}(z, t)$ породжує вторинний струм $\bar{I}^e(p, t)$ на плечах вібратора. Спектральні складові вторинного струму мають комбінаційні частоти.

При розрахунках розсіяного поля, породжуваного вторинним струмом, приймемо осі z декартової та циліндричної (r, ϕ, z) систем координат (ДСК та ЦСК) направленими вздовж осі вібратора, а їх початки сполученими з центром області V_{p-n} . Вважаємо, що I^{cm} та $\bar{I}^e$ не залежать від ϕ . Тоді E_z^{cm} теж не залежить від ϕ і записується у вигляді тригонометричного багаточлена:

$$E_z^{cm}(z, t) = \sum_{m,n} \dot{E}_{zmn}^{cm}(z) \exp(i\omega_{mn}t), \text{ при } r = a + 0. \quad (4)$$

де $\dot{E}_{zmn}^{\tilde{n}\tilde{o}}(z) = \dot{E}_{z10}^{\tilde{r}\tilde{a}\tilde{a}}(z)\delta_{mn}^{10} + \dot{E}_{z01}^{\tilde{n}\tilde{i}}(z)\delta_{mn}^{01} + E_{00}^{\tilde{n}\tilde{i}}(z)\delta_{mn}^{00}$, $|\dot{E}_{z10}^{\tilde{r}\tilde{a}\tilde{a}}|$ та $|\dot{E}_{z01}^{\tilde{r}\tilde{a}\tilde{a}}|$ – амплітуди стороннього (від НР) ЕМП; $\omega_{mn} = m\omega + n\Omega$, $m, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

З достатньою точністю поле "зсуву" при $r = a + 0$, $z \in (-b, b)$ внаслідок малого значення b можна вважати однорідним за z .

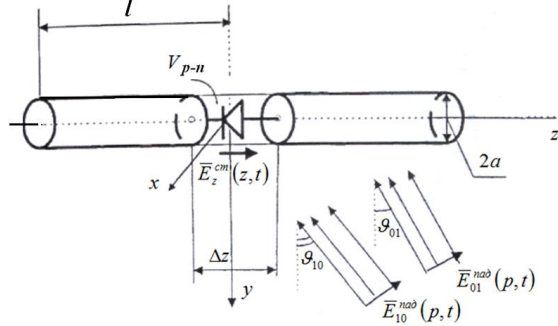


Рисунок 3 – Симетричний вібратор, навантажений на напівпровідниковий діод

Вторинний струм представимо рядом Фур'є:

$$I_z^e(z, t) = \sum_{m, n} \dot{I}_{zm, n}^e(z) \cdot \exp(i\omega_{mn}t).$$

Вважаємо, що вольт-амперна характеристика V_{p-n} відповідає рис. 1. ЕМП мають задовольняти рівнянням Максвелла, граничним умовам на вібраторі та умовам випромінювання. Залежність від часу прийнята як $\exp(i\omega t)$.

Комплексні амплітуди паралельних вібратору складових векторів напруженостей зондуємого ЕМП

$$\begin{aligned} \dot{E}_{z10}^{nad}(z) &= \dot{E}_{0,10}^{nad} \cos \vartheta_{10} \exp(-ik_{10}z \sin \vartheta_{10}), \\ \dot{E}_{z01}^{nad}(z) &= \dot{E}_{0,01}^{nad} \cos \vartheta_{01} \exp(-ik_{01}z \sin \vartheta_{01}), \end{aligned} \quad (5)$$

де $k_{10} = \omega_{10} \sqrt{\tilde{\varepsilon}_{a10} \mu_0}$, $k_{01} = \omega_{01} \sqrt{\tilde{\varepsilon}_{a01} \mu_0}$ – коефіцієнти поширення на частотах ω_{10} , ω_{01} в середовищі з комплексними діелектричними проникностями $\tilde{\varepsilon}_{a10} = \varepsilon_a(1 - i\sigma/\varepsilon_a\omega_{10})$ та $\tilde{\varepsilon}_{a01} = \varepsilon_a(1 - i\sigma/\varepsilon_a\omega_{01})$; $\dot{E}_{0,10}^{nad}$, $\dot{E}_{0,01}^{nad}$ – комплексні амплітуди напруженостей падаючих електричних полів. Напруженість повного поля, що існує поза вібратором

$$\bar{E}(p, t) = \bar{E}^{nad}(p, t) + \bar{E}^n(p, t) + \bar{E}^e(p, t), \quad (6)$$

де $\bar{E}^n$ – вектор напруженості первинного електричного поля, збуджуваного струмом I^e , $\bar{E}^e$ – напруженість вторинного поля, породжуваного вторинним струмом в плечах вібратора. Для E_z виконуються граничні умови

$$E_z^{\hat{a}} = E_z^{\tilde{n}\tilde{o}} - E_z^{\tilde{r}\tilde{a}\tilde{a}} - E_z^{\tilde{r}} - E_{00}^{\tilde{n}\tilde{i}} \quad \text{при } z \in (-b, b), \quad r = a, \quad (7)$$

$$E_z^{\hat{a}} = -(E_z^{\tilde{r}\tilde{a}\tilde{a}} + E_z^{\tilde{r}}) \quad \text{при } z \in (-l, -b) \cup (b, l), \quad r = a, \quad (8)$$

Нехай, функції $E_z^{nad}(z, t)$, $E_z^n(z, t)$, $E_z^e(z, t)$ є періодичними. Представляючи їх та електричний векторний потенціал $A_z^e(z, t)$ рядами Фур'є, а потім виражаючи комплексні амплітуди $\dot{E}_{zmn}^e$ через $\dot{A}_{zmn}^e$, з (8) одержимо диференціальне рівняння відносно $\dot{A}_{zmn}^e$ при $r = a$ (далі для простоти запису опускаємо крапку в позначенні комплексних амплітуд):

$$(1/i\omega_{mn}\tilde{\varepsilon}_{amn})\left(\partial^2 A_{zmn}^e/\partial z^2 + k_{mn}^2 A_{zmn}^e\right) = \begin{cases} E_{zmn}^{cm} - E_{zmn}^{nao} - E_{zmn}^n, \text{ при } z \in (-b, b), \\ -(E_{zmn}^{nao} + E_{zmn}^n), \text{ при } z \in (-l, -b) \cup (b, l), \end{cases} \quad (9)$$

де $\tilde{\varepsilon}_{amn}$ – комплексна діелектрична проникність на частоті ω_{mn} , $k_{mn} = \omega_{mn}\sqrt{\tilde{\varepsilon}_{amn}\mu_0}$, $E_{zmn}^n(z)$ – комплексна амплітуда напруженості первинного поля, збуджуваного струмом I_{zmn}^{cm} .

Розв'язок рівняння (9) можна одержати за допомогою методу функцій Гріна [7]. В результаті маємо інтегральне рівняння для щільності лінійного вторинного електричного струму з відомою правою частиною:

$$\left(\int_{-l}^{-b} + \int_b^l\right) I_{zmn}^e(z') \tilde{K}_{mn}(z, z') dz' = \begin{cases} p_{1mn}(z), \text{ при } -l \leq z \leq -b, \\ p_{2mn}(z), \text{ при } b \leq z \leq l, \\ p_{3mn}(z), \text{ при } -b \leq z \leq b, \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{де } p_{1mn}(z) = 0.5ik_{mn} \left(\exp(-ik_{mn}z) \int_{-l}^z \exp(ik_{mn}z') f_{1mn}(z') dz' + \exp(ik_{mn}z) \left(\int_z^{-b} \exp(-ik_{mn}z') f_{1mn}(z') dz' + \int_{-b}^b \exp(-ik_{mn}z') f_{2mn}(z') dz' + \int_b^l \exp(-ik_{mn}z') f_{1mn}(z') dz' \right) \right),$$

$$p_{2mn}(z) = 0.5ik_{mn} \left(\exp(-ik_{mn}z) \int_{-l}^{-b} \exp(ik_{mn}z') f_{1mn}(z') dz' + \exp(-ik_{mn}z) \int_{-b}^b \exp(ik_{mn}z') f_{2mn}(z') dz' + \exp(-ik_{mn}z) \int_b^l \exp(ik_{mn}z') f_{1mn}(z') dz' + \exp(ik_{mn}z) \int_z^l \exp(-ik_{mn}z') f_{1mn}(z') dz' \right),$$

$$p_{3mn}(z) = 0.5ik_{mn} \left(\exp(-ik_{mn}z) \int_{-l}^{-b} \exp(ik_{mn}z') f_{1mn}(z') dz' + \exp(-ik_{mn}z) \int_{-b}^z \exp(ik_{mn}z') f_{2mn}(z') dz' + \exp(ik_{mn}z) \left(\int_z^b \exp(-ik_{mn}z') f_{2mn}(z') dz' + \int_b^l \exp(-ik_{mn}z') f_{1mn}(z') dz' \right) \right),$$

$$f_{1mn}(z) = -i\omega_{mn}\tilde{\varepsilon}_{amn}k_{mn}^{-2}(E_{zmn}^{nao} + E_{zmn}^n), \quad f_{2mn}(z) = i\omega_{mn}\tilde{\varepsilon}_{amn}k_{mn}^{-2}(E_{zmn}^{cm} - E_{zmn}^{nao} - E_{zmn}^n),$$

$$\tilde{K}_{mn}(z, z') = K_{mn}(z, z') - \alpha_{mn}K_{0mn}(z, z'), \quad K_{mn}(z, z') = \frac{\exp(-ik_{mn}R(z, z'))}{R(z, z')}, \quad R(z, z') = \sqrt{(z - z')^2 + a^2},$$

$$K_{0mn}(z, z') = \frac{b_{1mn}K_{2mn}(z') - b_{2mn}K_{1mn}(z')}{a_{2mn}b_{1mn} - b_{2mn}a_{1mn}} \exp(ik_{mn}z) + \frac{a_{2mn}K_{1mn}(z') - b_{1mn}K_{2mn}(z')}{a_{2mn}b_{1mn} - b_{2mn}a_{1mn}} \exp(-ik_{mn}z),$$

$$\alpha_{mn} = \int_{-l}^{-b} f_{1mn}(z) dz + \int_{-b}^b f_{2mn}(z) dz + \int_b^l f_{1mn}(z) dz,$$

$$K_{1mn}(z') = \frac{1}{4\pi} (p_{1mn}(-b)K_{mn}(-l, z') - p_{1mn}(-l)K_{mn}(-b, z')),$$

$$K_{2mn}(z') = \frac{1}{4\pi} (p_{2mn}(l)K_{mn}(b, z') - p_{2mn}(b)K_{mn}(l, z')),$$

$$a_{1mn} = (p_{1mn}(-b)\exp(-ik_{mn}l) - p_{1mn}(-l)\exp(-ik_{mn}b))\alpha_{mn},$$

$$b_{1mn} = (p_{1mn}(-b)\exp(ik_{mn}l) - p_{1mn}(-l)\exp(ik_{mn}b))\alpha_{mn},$$

$$\begin{aligned} a_{2mn} &= (p_{1mn}(l)\exp(ik_{mn}b) - p_{1mn}(b)\exp(ik_{mn}l))\alpha_{mn}, \\ b_{2mn} &= (p_{1mn}(l)\exp(-ik_{mn}b) - p_{1mn}(b)\exp(-ik_{mn}l))\alpha_{mn}. \end{aligned}$$

За допомогою інтегральної форми першого рівняння Максвелла, представлень вектора електричної індукції та густини об'ємного електричного струму провідності в розрізі локальними рядами Тейлора відносно E_{00}^{cm} та розкладання в узагальнений ряд Фур'є I^{cm} по t [8] можна одержати зв'язок спектральних складових струмів I_{zmn}^{cm} в розрізі та напруженості стороннього поля $E_{mn}^{cm}(z)$.

Знайдемо вираз для напруженості первинного поля $\bar{E}^n$ на поверхні області V_{p-n} . За умови $k_{mn}b \ll l$ вважаємо, що первинне поле еквівалентно полю електричного випромінювача малої електричної довжини зі струмом I^{cm} . Тоді для комплексної амплітуди $\bar{E}^n$ на частоті ω_{mn} одержимо [8, 9]:

$$E_{zmn}^n(z) = (1/i4\pi\omega_{mn}\tilde{\epsilon}_{amn}) \int_{-b}^b I_{zmn}^{cm} (\partial_z^2 + k_{mn}^2) \frac{\exp(-ik_{mn}R(z, z'))}{R(z, z')} dz'.$$

Вважаючи I_{zmn}^{cm} в межах V_{p-n} однорідним по z та проводячи диференціювання під знаком інтеграла, одержимо:

$$\begin{aligned} E_{zmn}^n(z) &\approx (1/i4\pi\omega_{mn}\tilde{\epsilon}_{amn}) I_{zmn}^{cm}(0) \times \\ &\times \int_{-b}^b \frac{\exp(-ik_{mn}R(z, z'))}{R^5(z, z')} [(2R^2(z, z') - 3a^2)(ik_{mn}R(z, z') + 1) + k_{mn}^2 a^2 R^2(z, z')] dz'. \end{aligned} \quad (11)$$

При чисельному вирішенні інтегральних рівнянь (10) використано розклад струмів I_{mn}^e по базисним функціям

$$\sin\left(\frac{\pi(2q-1)(l-|z|)}{2l\mu_{mn}}\right), \quad q = 1, 2, \dots, N_{mn}, \quad (12)$$

які задовольняють граничній умові $I_{mn}^e(\pm l) = 0$. В (13) N_{mn} – число використаних базисних функцій, при яких вихідні розподіли мають фізичний сенс (N_{mn} обирається експериментально), $\mu_{mn} = \omega/\omega_{mn}$.

Для кожної частоти ω_{mn} складалася система лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) з невідомими коефіцієнтами розкладання $I_{mn,q}$. Порядок СЛАР дорівнює $2N_{mn}$, оскільки вторинний струм на кожному з плечей представлявся у вигляді розкладу в скінчений ряд по функціям (12). Останнє викликано несиметричністю розподілу вторинного струму на основній частоті внаслідок додаткового набігу фаз падаючої хвилі вздовж вібратора.

Отже, приведений аналіз дозволяє за відомими рівняннями потужності та напруженостей опромінюючого НВЧ поля знайти розподіл вторинного електричного струму по симетричному вібратору з нелінійним навантаженням для певної частоти ω_{mn} .

Як приклад, на рис. 4 показані амплітудні розподіли вторинного струму по обох плечах вібратора для частот ω_{10} та ω_{20} при рівнях потужностей опромінюючого поля 150 та 500 мВт за наступних початкових умов: $\omega/2\pi = 1\text{ ГГц}$; $l = 0.025\text{ м}$; $a = 0.001\text{ м}$; $2b = 0.05\text{ м}$; $\sigma = 0\text{ См/м}$; $\epsilon_a = \epsilon_0$; $2|E_0^{nao}| = 14\text{ В/м}$ для 500 мВт та $2|E_0^{nao}| = 6\text{ В/м}$ для 150 мВт; $E_0^{cm} = 2|E_{01}^{cm}| = 10\text{ В/м}$.

На рис. 5 представлені розподіли модуля та фази вторинного струму на основній частоті при двох значеннях кута падіння $\mathcal{G}_{10}$ хвилі на частоті ω_{10} . Видно, що розподіли модуля хоча і видозмінюють форму при зміні $\mathcal{G}_0$, але залишаються майже симетричними. Фазові розподіли істотно змінюються зі зміною $\mathcal{G}_0$, причому тим різкіше, чим ближче точка спостереження, описувана координатою z , наближена до краю вібратора. Розподіли фази, на відміну від модуля, більш асиметричні.

При збільшенні кута падіння спостерігається зниження амплітуди вторинного струму, що відповідає фізичним міркуванням: при нормальному падінні в зазорі вібратора наводиться поле максимальної амплітуди, при ковзному падінні ($\vartheta_0 = \pi/2$) – поле в зазорі відсутнє.

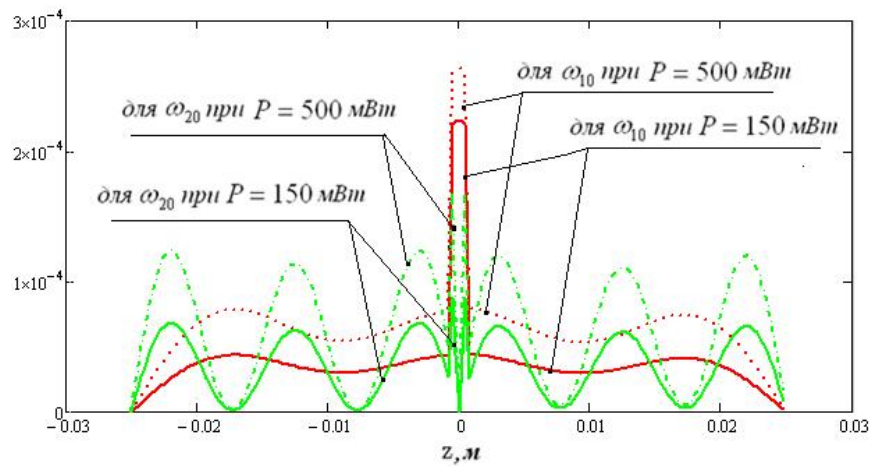


Рисунок 4 – Розподіл амплітуди вторинного струму по обох плечах вібратора для частот ω_{10} та ω_{20} при рівнях потужностей опромінюючого поля 150 та 500 мВт

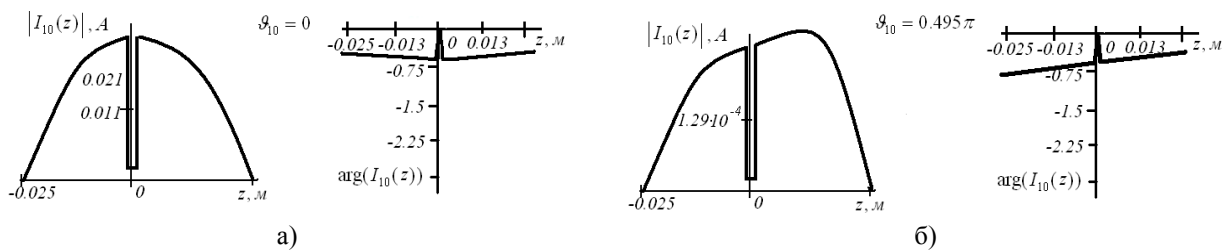


Рисунок 5 – Амплітудні та фазові розподіли вторинного струму на основній частоті при значеннях кута падіння $\vartheta_{10} = 0$ (а) та $\vartheta_{10} = 0.495\pi$ (б) хвилі на частоті ω_{10}

За знайденими розподілами вторинного струму були розраховані залежності азимутальних складових комплексних амплітуд напруженостей вторинного електричного поля $|E_\theta^e|$ від кута місця θ в зоні Фраунгофера ($R = 2\text{ м}$) [9, 10]:

$$E_\theta^e = \frac{j60\pi \sin \theta \exp(-jk_{mn}R)}{\lambda_{mn}R} \int_{-l}^l I_{zmn}(z') \exp(jk_{mn}z' \cos \theta) dz'.$$

На рис. 6 представлені залежності азимутальних складових комплексних амплітуд напруженостей вторинного електричного поля для частот ω_{10} та ω_{20} при рівнях потужностей опромінюючого поля 150 та 500 мВт. На рис. 6 видно, що розсіювання симетричним вібратором з нелінійним навантаженням перевипромінюваного сигналу залежить від величини рівня НВЧ потужності зондуємого сигналу – чим вище рівень НВЧ потужності зондуємого сигналу, тим більший ефективний радіус розсіювання досліджуваного об'єктом демаскуючого сигналу за кутом місця в зоні Фраунгофера, що в свою чергу підвищує ймовірності знаходження та вірної ідентифікації напівпровідникових елементів засобами нелінійної радіолокації.

Отже, приведений аналіз дозволяє за відомими рівнями потужності та напруженостей опромінюючого НВЧ поля знайти розподіл вторинного електричного струму по симетричному вібратору з нелінійним навантаженням для будь-якої складової та її гармонік бігармонічного зондуємого сигналу чи їх комбінацій.

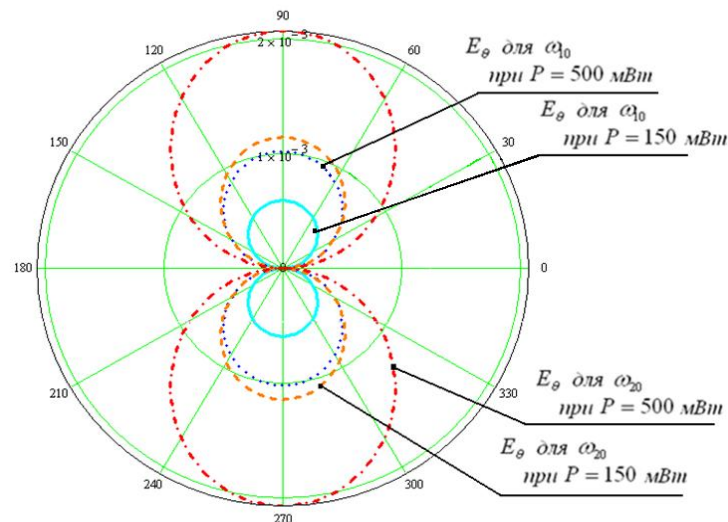


Рисунок 6 – Залежності азимутальних складових комплексних амплітуд напруженостей вторинного електричного поля від кута місця θ в зоні Фраунгофера ($R = 2\text{ м}$)

Це дає змогу за знайденими розподілами вторинного струму розрахувати залежності азимутальних складових комплексних амплітуд напруженостей вторинного електричного поля від кута місця в зоні Фраунгофера для кратних гармонік складових бігармонічного зонduючого сигналу. Приведені розрахунки показує, що розсіювання симетричним вібратором з нелінійним навантаженням перевипромінюваного сигналу залежить від величини рівня НВЧ потужності зонduючого сигналу – чим вище рівень НВЧ потужності зонduючого сигналу, тим більшим є ефективний радіус розсіювання досліджуваного об'єктом демаскуючого сигналу за кутом місця в зоні Фраунгофера, що в свою чергу підвищує ймовірності знаходження та вірної ідентифікації напівпровідників засобами нелінійної радіолокації.

IV Висновки

Натурні експериментальні дослідження **здатності виявляти закладні пристрої в активному стані засобами нелінійної радіолокації** за повнофакторним планом підтвердили вплив не тільки діючих окремо один від одного факторів, а також значний внесок їх взаємодії:

- виду досліджуваного пристрою;
- матеріалу корпусу досліджуваного пристрою;
- робочої частоти досліджуваного пристрою;
- взаємодії виду досліджуваного пристрою з матеріалом його корпусу;
- взаємодії виду досліджуваного пристрою з його робочою частотою.

Натурні експериментальні дослідження **здатності виявляти пасивні імітатори закладних пристроїв засобами нелінійної радіолокації** за повнофакторним планом підтвердили суттєвий вплив тільки одного окремо діючого фактора. Значимими виявилися також внески деяких взаємодій розглянутих факторів:

- рівня потужності зонduючого сигналу нелінійного радіолокатора;
- взаємодії виду досліджуваного закладного пристрою з резонансною частотою його антенної структури;
- взаємодії рівня потужності зонduючого сигналу нелінійного радіолокатора з резонансною частотою антенної структури імітатора закладного пристрою.

Натурні експериментальні дослідження **здатності локалізувати закладні пристрої засобами нелінійної радіолокації** за повнофакторним планом підтвердили значимість тільки окремо діючих один від одного двох факторів:

- відстані, на якій досліджують рівень напруженості електричного поля;
- рівня потужності зонduючого випромінювання нелінійного радіолокатора.

НВЧ випромінювання нелінійних радіолокаторів, величина якого досягає 100...800 мВт, впливає на характеристики струмопереносу в структурах на основі р-п-переходів. Теоретичне пояснення

експериментально виявленого ефекту виникнення негативного диференціального опору на ВАХ діодних структур при впливі на них високого рівня НВЧ потужності можливе при врахуванні розігріву носіїв заряду і детекторного ефекту. Отримані результати доводять доцільність використання в нелінійних радіолокаторах високих рівнів потужності зонduючого сигналу, оскільки зі збільшенням потужності НВЧ сигналу мінімізується значення величини амплітуди змінної напруги на діоді, здатної спричинити випромінювання демаскуючого сигналу, що в свою чергу підвищить вірогідність знаходження та ідентифікації напівпровідника засобами нелінійної радіолокації за співвідношенням рівнів прийнятих 2-ї та 3-ї гармонік сигналу відгуку нелінійного елемента.

Розсіювання симетричним вібратором з нелінійним навантаженням перевипромінюваних гармонік залежить від величини рівня НВЧ потужності зонduючого сигналу – чим вище рівень НВЧ потужності зонduючого сигналу, тим більшим є ефективний радіус розсіювання досліджуваного об'єктом демаскуючого сигналу за кутом місця в зоні Фраунгофера, що в свою чергу підвищує ймовірності знаходження та вірної ідентифікації напівпровідникових елементів засобами нелінійної радіолокації.

Література: 1. Хорошко В. А., Чекатков А. А. Методы и средства защиты информации. К.: "Юниор", 2003. – 504 с. 2. Каторин Ю. Ф. Куренков Е. В., Лысов А. В., Остапенко А. Н. Энциклопедия промышленного шпионажа: ООО «Издательство Полигон».- С.-Петербург, 2000. – 512 с. 3. Каргашин В. Л., Ткач В. Н., Ткачев Д. В. Нелинейная ближняя радиолокация. Новые алгоритмы идентификации электронных устройств // Специальная Техника, ОАО «Электрозавод», Москва, №6, 2006г. с: 42–48. 4. Радченко С. Г. Математическое моделирование технологических процессов в машиностроении. – К.: ЗАО «Укрспецмонтажпроект», 1998. – 274 с. 5. Радченко С. Г. Устойчивые методы оценивания статистических моделей: Монография. – К.: ПП «Санспель», 2005. – 504 с. 6. Зінченко М. В., Зінковський Ю. Ф. Ідентифікація напівпровідників засобами нелінійної локації за двома гармоніками // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут" Серія — Радіотехніка. Радіоапаробудування. – 2009. – Вип. 38. – 169 с. 7. Соболев С. Л. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1966. – 443 с. 8. Петров Б. М. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Радио и связь, 2000. – 559 с. 9. Марков Г. Т., Сазанов Д. М. Антенны. Учебник для студентов радиотехнических специальностей вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М., «Энергия», 1975. – 528 с. 10. Вычислительные методы в электродинамике. – Под ред. Митры, М.: Мир, 1977. – 485 с.

УДК 62-768:537.531

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТАЛЕВОЇ СІТКИ ДЛЯ ЕКРАНУВАННЯ

Юрій Яремчук, Максим Припула, Євгеній Ніколаєв, Вікторія Козел

Вінницький національний технічний університет

Анотація: Проведено аналіз ефективності застосування металевої сітки для екранування.

Summary: The effectiveness of metal mesh for shielding is analyzed.

Ключові слова: Суцільний екран, екран із сітки, ефективність екранування.

І Вступ

Зростання кількості електронних пристроїв для обробки інформації призводить до збільшення рівня випромінювання в оточуюче середовище. Разом з тим, активне використання електромагнітних ресурсів, що пов'язане з розвитком радіозв'язку і різноманітних систем передавання та обробки інформації, телебачення, мобільного зв'язку, радіолокації і радіонавігації, призводить до появи додаткового електромагнітного фону [1].

З появою додаткового електромагнітного фону зростає ймовірність витоку інформації з пристроїв обробки за рахунок електромагнітних випромінювань і наведень [2].

В зв'язку з цим все гостріше постає проблема захисту від витоку інформації за рахунок електромагнітних випромінювань або від зовнішнього впливу електромагнітних випромінювань на цілісність інформації в пристроях її обробки [3].

Для усунення наведень від технічних засобів передавання інформації в приміщеннях, лінії яких виходять за межі контрольованої зони, необхідно не тільки придушити їх у лініях, а й обмежити сферу дії електромагнітного поля, яке створюється в безпосередній близькості від джерела системою його внутрішніх