

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra27.01.053>  
УДК 621.396.967+621.382.2.029.64

**Г.П. ЄРМАК, О.С. ВАСИЛЬЄВ, А.В. ВАРАВІН,  
М.В. БАЛАБАН, О.В. ФАТЄЄВ, В.М. ЖЕЛТОВ**

Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України  
12, вул. Акад. Проскури, Харків, 61085, Україна  
E-mail: [ermak@ire.kharkov.ua](mailto:ermak@ire.kharkov.ua)

## **ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ТА ОБРОБКИ СИГНАЛІВ АВТОДИННОГО РАДІОЛОКАТОРА З ШИРОКОЮ СМУГОЮ МОДУЛЯЦІЇ ЧАСТОТИ**

### **Частина 1. Моделювання режимів роботи автодина з частотною модуляцією з урахуванням нелінійності модуляційної характеристики**

***Предмет та мета роботи.** У першій частині роботи на основі математичної моделі автодинного автогенератора з одноконтурною коливальною системою, що перестроюється за частотою зміною ємності варактора, проведений аналіз особливостей формування сигналів у автодинному радіолокаторі з широкою смугою частотної модуляції за наявності нелінійності модуляційної характеристики.*

***Методи та методологія роботи.** Метод досліджень — математичний аналіз роботи автодинного автогенератора з електронним перестроюванням частоти. Для аналізу процесів формування випромінюваних автодинних сигналів використовувалися методи чисельного моделювання спектральних, частотних та амплітудних характеристик автодинного радіолокатора з частотною модуляцією.*

***Результати роботи.** Проведено чисельне моделювання спектрів сигналів автодинного відгуку для різних відстаней до об'єкта, що відбиває, і амплітуд модулюючої напруги на варакторі. Показано, що за нелінійного характеру залежності частоти генератора від напруги на варакторі спостерігається розширення спектра сигналу автодинного відгуку. Виявлено, що збільшення відстані до об'єкта приводить до зміщення частоти сигналу автодинного відгуку у бік більш високих частот. Результати розрахунків отримані для автодина, виконаного на діоді Ганна 8-мм діапазону.*

***Висновок.** Аналіз результатів досліджень особливостей формування сигналів і спектральних характеристик у автодинних приймально-передавальних пристроях з широким перестроюванням частоти показав, що для досягнення високих значень роздільної здатності автодинних локаторів необхідно розробляти методи корекції законів частотної модуляції та обробки сигналів відгуку від об'єктів локації. Методи та способи вирішення цих завдань будуть відображені у другій частині роботи.*

***Ключові слова:** автодин, автодинний сигнал, частотна модуляція, нелінійність модуляційної характеристики, система ближньої радіолокації, генератор на діоді Ганна, варактор.*

Ц и т у в а н н я: Єрмак Г.П., Васильєв О.С., Варавін А.В., Балабан М.В., Фатєєв О.В., Желтов В.М. Особливості формування та обробки сигналів автодинного радіолокатора з широкою смугою модуляції частоти. Частина 1. Моделювання режимів роботи автодина з частотною модуляцією з урахуванням нелінійності модуляційної характеристики. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2022. Т. 27. № 1. С. 53—63. <https://doi.org/10.15407/rpra27.01.053>

© Publisher PH «Akademperiodyka» of the NAS of Ukraine, 2022. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Приймально-передавальні системи автодинного типу є малогабаритними і надійними технологічними пристроями, що знайшли широке застосування у вирішенні різних завдань на транспорті, в промисловості, наукових дослідженнях і військовій справі [1–6]. Принцип роботи таких систем ґрунтується на зміні амплітуди, частоти та робочого струму автогенератора при впливі на нього відбитого сигналу. Ці зміни називаються автодинним відгуком.

За наявності впливу на автодин випромінювання, відбитого від рухомого об'єкта, частота автодинного відгуку дорівнює частоті Доплера. У зв'язку з цим найбільш широке застосування автодини знайшли в системах ближньої радіолокації (СБРЛ) для вимірювання швидкості і виявлення рухомих об'єктів [7].

Можливості використання автодинів для вимірювання відстані менш вивчені, але становлять практичний інтерес для вирішення широкого кола радіолокаційних задач, а також контролю параметрів технологічних процесів і наукових досліджень.

Завдання вимірювання відстані з допомогою автодинних СБРЛ пов'язані з розвитком методів модуляції амплітуди або частоти автогенераторів. На цей час в автодинних радіолокаторах досліджено та реалізовано різні методи модуляції сигналів для вимірювання відстані — фазовий, частотний, імпульсний та їх модифікації [8–10]. Аналіз результатів цих досліджень показує, що найбільш інформативними та гнучкими у застосуванні є автодинні системи з різними законами лінійної частотної модуляції (ЛЧМ) — несиметричним та симетричним пилкоподібним. Такі системи дозволяють вимірювати відстань до нерухомих і рухомих об'єктів, їх швидкість переміщення, при цьому є можливість виключати вплив сигналів, що заважають, від цілей, розташованих на певних відстанях [10].

Однак застосування методів модуляції в автодинних СБРЛ наштовхується на ряд обмежень, пов'язаних як зі складністю аналізу процесів, що виникають в автогенераторах при одночасному впливі на генератор власного запізнювального відбитого випромінювання, так і з впливом нелінійності форми модуляційної характеристики автогенератора на спектральні характеристики автодинного сигналу.

При вимірюванні відстані до об'єкта однією з важливих характеристик СБРЛ з ЛЧМ є розділь-

на здатність за відстанню, яка визначається шириною смуги перестроювання частоти передавача та лінійністю форми вихідного сигналу.

У зв'язку з тим, що характеристики перестроювання частоти реальних автогенераторів відрізняються від лінійних, завдання створення автодинних приймально-передавальних пристроїв з широкою смугою перестроювання частоти вимагає проведення досліджень особливостей формування та обробки сигналів у таких пристроях та розробки методів корекції закону частотної модуляції зондувального випромінювання автодинних генераторів. Результати таких досліджень необхідні для створення радіолокаторів з високою роздільною здатністю та точністю вимірювання відстані.

## 1. Моделювання режимів роботи автодина з лінійно-частотною модуляцією

У цьому розділі розглянуто побудову математичної моделі автодинного автогенератора з електронним перестроюванням частоти та проведено аналіз особливостей формування сигналів у автодинному радіолокаторі з широкою смугою частотної модуляції. Проведено моделювання режимів роботи автодина з частотною модуляцією за несиметричним пилкоподібним законом модуляції. Досліджено вплив нелінійності модуляційної характеристики автогенератора на спектр сигналу автодинного відгуку. Дані результати конкретизовані на випадок застосування автодинного генератора на діоді Ганна (ДГ) 8-мм діапазону з перестроюванням частоти за допомогою варактора.

На рис. 1 наведено еквівалентну схему автодинного генератора, яка складається з кількох основних частин: активного елемента (АЕ), яким є діод Ганна (ДГ); джерела напруги зміщення  $E$ , резистора  $R_0$  та ємності  $C_0$ ; коливального контуру, що складається з ємності  $C_r$ , провідності  $G_r$  (пов'язаної з власними втратами у контурі) та індуктивності  $L_r$ ; провідності зовнішнього навантаження  $G_l$ ; джерела струму  $j_s = j_s(t, \tau)$  (відображує вплив на генератор власного відбитого випромінювання; де  $t$  — поточний час,  $\tau$  — час запізнення відбитого сигналу щодо поточного часу).

Автодинний генератор пов'язаний із навантаженням (антенною системою) без будь-якої розв'язки. Робоче зміщення на АЕ автодинного генератора подається від джерела живлен-

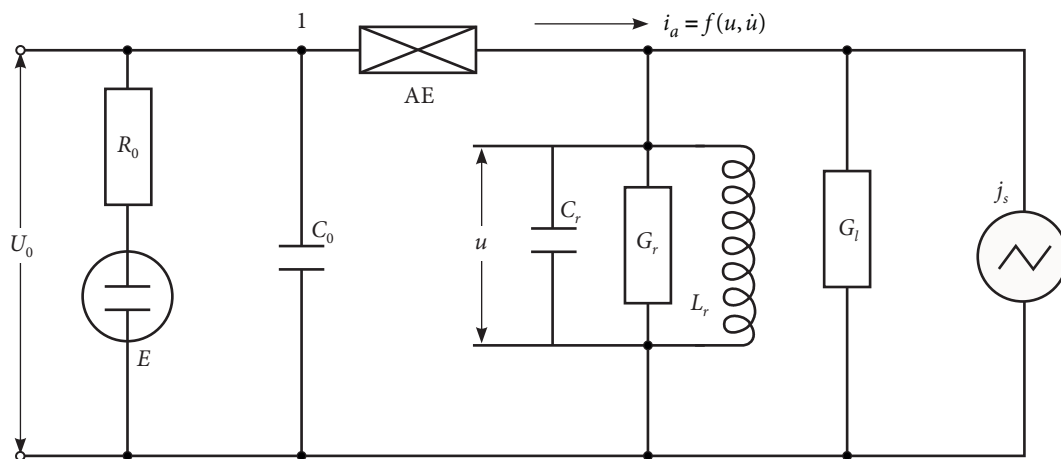


Рис. 1. Еквівалентна схема одноконтурного автодина

ня  $E$ . Електромагнітні коливання виробляються генератором на частоті коливального контуру та подаються на антенну систему, після чого випромінюються у вільний простір у вигляді електромагнітної хвилі. Частотна модуляція випромінювання здійснюється шляхом перестроювання власної частоти коливального контуру зміною ємності контуру напругою  $U$  на варакторі. У розглянутій схемі реєстрація автодинного ефекту здійснюється шляхом детектування змін амплітуди коливань на активному елементі. Передбачається, що напругу живлення активного елемента  $U_0$  стабілізована за допомогою стабілізатора напруги. У такий спосіб фактично реалізовано схему внутрішнього детектування автодинного сигналу.

### 1.1. Основне рівняння збудженого генератора та система неоднорідних диференціальних рівнянь із запізненням

Для опису процесів, що мають перебіг у збудженому автодинному генераторі з еквівалентною схемою, зображеною на рис. 1, встановимо систему диференціальних рівнянь.

В якості першого рівняння системи візьмемо рівняння балансу струмів для вузла 1 (рис. 1):

$$\frac{dU_0}{dt} = \frac{1}{R_0 C_0} (E - U_0 - R_0 I_0), \quad (1)$$

де  $I_0$  — стала складова струму через активний елемент, а  $U_0$  — напруга на ньому.

Для опису процесів у коливальному контурі  $G_r - L_r - C_r$  скористаємося нелінійним диферен-

ціальним рівнянням:

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + \omega^2 u = F(u, \dot{u}, t, \tau), \quad (2)$$

де

$$F(u, \dot{u}, t, \tau) = -\frac{\omega_c}{Q_l} \left( \left( 1 + \frac{1}{G_l} \frac{d i_a(u, \dot{u})}{dt} \right) \frac{du}{dt} - \frac{1}{G_l} \frac{d j_s(t, \tau)}{dt} \right); \quad (3)$$

$\omega_c = \sqrt{L_r C_r}$ ;  $Q_l = \omega_c C_r / (G_l + G_r)$  — навантажена добротність;  $u$  — миттєва напруга на коливальному контурі;  $i_a$  — миттєвий струм АЕ.

У випадку, коли навантажена добротність резонатора  $Q_l$  досить велика, так що величина  $1/Q_l$  може розглядатися в якості малого параметра, рівняння (2) відноситься до типу диференціальних рівнянь із запізненням, що описують власні коливання в системах, близьких до лінійних, тобто може бути приведене до такого вигляду:

$$\ddot{u} + \omega^2 u = \varepsilon f(u, \dot{u}, t, \tau). \quad (4)$$

Зведемо систему диференціальних рівнянь (2)–(4) до системи неоднорідних лінеаризованих рівнянь з запізненням. Для цього скористаємося методикою, описаною в [11, 12], яка полягає у такому:

У припущенні, що навантажена добротність генератора  $Q_l$  досить велика, розв'язок рівняння (4) будемо шукати у квазігармонічному ви-

гляді відносно невідомих амплітуди  $A(t)$  та фази  $\psi(t)$  [11, 12]:

$$u(t) = A(t) \cos(\psi(t)). \quad (5)$$

Зведемо диференціальне рівняння другого порядку (4) до системи з двох диференціальних рівнянь першого порядку для шуканих функцій амплітуди і фази.

Застосуємо метод побудови асимптотичного наближення до розв'язання нелінійного диференціального рівняння з запізненням. При цьому врахуємо тільки перше наближення до розв'язку [13].

Отримаємо скорочені диференціальні рівняння для середніх значень відносних амплітуди і фази, усереднивши їх за періодом коливань [13–15].

Лінеарізуємо скорочені диференціальні рівняння, використовуючи розвинення в ряд Тейлора в околі точки стаціонарності незбуреного автономного генератора [11].

У результаті отримаємо систему лінеаризованих диференціальних рівнянь із запізненням у матричному вигляді [11]:

$$\begin{bmatrix} \tau_0 (da_0/dt) \\ \tau_p (da_1/dt) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha_{00} & \alpha_{01} & \varepsilon_0 \\ \alpha_{10} & \alpha_{11} & \varepsilon_1 \\ \beta_{10} & \beta_{11} & \xi_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \chi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ B_C \\ B_S \end{bmatrix}. \quad (6)$$

де  $\tau_0 = R_0 C_0$  — стала часу кола автозміщення;  $\tau_p = 2Q_n / \omega_c$  — стала часу резонатора;  $R_0$  та  $C_0$  — величини ємності і опору в колі автозміщення;  $\alpha_{00}$ ,  $\alpha_{01}$ ,  $\alpha_{10}$ ,  $\alpha_{11}$ ,  $\beta_{10}$ ,  $\beta_{11}$ ,  $\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_1$ ,  $\xi_1$  — диференціальні параметри активного елемента генератора [11];  $a_0 = u_0 / U_0$  — відносна зміна автодинного автозміщення;  $a_1 = a / A_0$  та  $\chi = \Delta\omega / \omega_0$  — відносні зміни амплітуди і частоти автоколивань, де  $u_0 = u - U_0$ ,  $a = A - A_0$  та  $\Delta\omega = \omega - \omega_0$  — абсолютні зміни автозміщення  $u$ , амплітуди  $A$  та частоти  $\omega$  від їх стаціонарних значень  $U_0$ ,  $A_0$  та  $\omega_0$ ;

$$B_C = 2\Gamma(t, \tau)(Q_l / Q_e) \cos \delta(t, \tau); \quad (7)$$

$$B_S = 2\Gamma(t, \tau)(Q_l / Q_e) \sin \delta(t, \tau), \quad (8)$$

де  $Q_l$  та  $Q_e$  — навантажена і зовнішня добротності генератора;  $\Gamma(t, \tau)$  — модуль миттєвого коефіцієнта відбиття;  $\delta(t, \tau) = \psi(t) - \psi(t, \tau)$  — миттєва різниця фази коливання в даний момент часу і

фази електромагнітної хвилі, що повернулася від об'єкта локації;  $\tau = 2l/c$  — час, упродовж якого електромагнітна хвиля пройде відстань від генератора до об'єкта і назад;  $l$  — відстань до об'єкта.

Залежність модуля миттєвого коефіцієнта відбиття від поточного часу і часу запізнювання визначається рівнянням

$$\Gamma(t, \tau) = \Gamma(P(t) / P(t - \tau))^{1/2}, \quad (9)$$

де  $\Gamma$  — коефіцієнт згасання випромінювання при його поширенні до об'єкта і назад;  $P(t)$  — вихідна потужність автодина в поточний момент часу на зовнішньому навантаженні генератора.

## 1.2. Ітераційна схема рішення неоднорідних диференціальних рівнянь, в наближенні квазістаціонарних автоколивань

Припустимо, що частота коливань автогенератора за відсутності відбитого випромінювання змінюється в часі за таким законом:

$$\begin{aligned} \omega(t) &= \omega_0 + \Delta\omega(t) = \\ &= \omega_0 [1 + (\Delta\omega_{FM} / \omega_0) f(t)], \end{aligned} \quad (10)$$

де  $\Delta\omega(t)$  — зміна частоти коливань, що пов'язана з частотною модуляцією;  $f(t)$  — нормована функція модуляції з періодом  $T_M = 2\pi / \Omega_M$ ,  $\Delta\omega_{FM}$  — девіація частоти модуляції.

Як показано в роботі [16], автоколивання можна вважати квазістаціонарним, якщо справедлива нерівність

$$\Delta\omega_{FM} \Omega_M \ll \omega_0^2. \quad (11)$$

У роботі [11] показано, що для НВЧ-генераторів ця умова виконується і процес встановлення коливань у НВЧ-автогенераторі можна вважати безінерційним. Це припущення значно спрощує аналіз автодинної системи і дозволяє в рівнянні (6) покласти  $da_0/dt = 0$  та  $da_1/dt = 0$ .

Ще одним припущенням може бути незмінність миттєвого коефіцієнта відбиття протягом одного періоду коливання, тобто  $\Gamma(t, \tau) = \Gamma$ . Як показано в роботі [11], якщо значення періоду  $T_M$  значно перевищує час запізнювання  $\tau$ , це припущення цілком справедливе.

Розв'язуючи систему рівнянь (6) методом Крамера, враховуючи (10) і прийняті припущення,

отримаємо систему рівнянь

$$a_0(t) = \frac{\Delta \omega_{FM}}{\omega_0} C_{FM,0} f(t) + \Gamma C_{SM,0} \cos[\delta(t, \tau) - \psi_0]; \quad (12)$$

$$a_1(t) = \frac{\Delta \omega_{FM}}{\omega_0} C_{FM,1} f(t) + \Gamma C_{SM,1} \cos[\delta(t, \tau) - \psi_1]; \quad (13)$$

$$\omega(t) = \omega_0 + \Delta \omega_{FM} f(t) - \Delta \omega_{SM} \sin[\delta(t, \tau) + \theta], \quad (14)$$

де  $\Delta \omega_{SM}$  — девіація частоти автоколивань, що визначається виразом

$$\Delta \omega_{SM} = \Gamma \omega_0 / Q_e (\alpha_{00} \alpha_{11} - \alpha_{01} \alpha_{10}) / \Lambda \cos \theta; \quad (15)$$

$\psi_0$ ,  $\psi_1$ , та  $\theta$  — фазові кути зміщення автодинних відгуків  $a_0$ ,  $a_1$  та  $\omega$ , які задані виразами

$$\psi_0 = \arctg \left( \frac{\alpha_{00} \varepsilon_0 - \alpha_{01} \varepsilon_1}{\varepsilon_0 \beta_{11} - \alpha_{01} \xi_1} \right); \quad (16)$$

$$\psi_1 = \arctg \left( \frac{\alpha_{00} \varepsilon_1 - \alpha_{10} \varepsilon_0}{\alpha_{00} \xi_1 - \varepsilon_0 \beta_{10}} \right); \quad (17)$$

$$\theta = \arctg \left( \frac{\alpha_{00} \beta_{11} - \alpha_{01} \beta_{10}}{\alpha_{00} \alpha_{11} - \alpha_{01} \alpha_{10}} \right); \quad (18)$$

$C_{FM,0}$  та  $C_{FM,1}$  — коефіцієнти перетворення частоти в зміну автозміщення та амплітуди коливань при модуляції частоти зміною напруги на варакторі, які задано виразами

$$C_{FM,0} = (\alpha_{10} \varepsilon_1 - \alpha_{11} \varepsilon_0) / \Lambda; \quad (19)$$

$$C_{FM,1} = (\alpha_{10} \varepsilon_0 - \alpha_{00} \varepsilon_1) / \Lambda; \quad (20)$$

$C_{SM,0}$  — коефіцієнт автодетектування,  $C_{SM,1}$  — коефіцієнт автодинного посилення сигналу, які задано виразами

$$C_{SM,0} = 2(Q_l / Q_e) (\varepsilon_0 \beta_{11} - \alpha_{01} \xi_1) / \Lambda \cos \psi_0; \quad (21)$$

$$C_{SM,1} = 2(Q_l / Q_e) (\alpha_{00} \xi_1 - \varepsilon_0 \beta_{10}) / \Lambda \cos \psi_1. \quad (22)$$

Тут і далі  $\Lambda$  — визначник системи (6).

Як видно з рівнянь (12)–(14), за частотної модуляції автодинний відгук буде містити не тільки корисний сигнал, але і складову, яка повторює закон модуляції, так звану паразитну амплітудну модуляцію (ПАМ). Вона є небажаною компонентою автодинного відгуку, її зазвичай намагаються відфільтрувати або позбутися від неї у будь-який інший спосіб.

Оскільки величина  $\delta(t, \tau)$  є різницею фаз сигналів, то її можна також визначити як набіг фази на поточній частоті  $\delta(t, \tau) = 2l/c \omega(t)$ . Тоді, помноживши (14) на  $2l/c$ , отримаємо трансцендентне рівняння для відшукування функції  $\delta(t, \tau)$  як функції від змінної часу  $t$ :

$$\delta(t, \tau) = 2l/c (\omega_0 + \Delta \omega_{FM} f(t)) - p \sin[\delta(t, \tau) + \theta], \quad (23)$$

де  $p = \Delta \omega_{SM} 2l/c$  — параметр спотворень автодинного сигналу.

Відшукування розв'язку рівняння (23) можливо проводити рекуррентно з використанням формули

$$\begin{aligned} \delta(t, \tau) = & [\omega_0 + \Delta \omega_{FM} f(t)](2l/c) - \\ & - p \sin\{[\omega_0 + \Delta \omega_{FM} f(t)](2l/c) + \theta - \\ & - p \sin\{[\omega_0 + \Delta \omega_{FM} f(t)](2l/c) + \theta - \dots \\ & - p \sin\{[\omega_0 + \Delta \omega_{FM} f(t)](2l/c) + \theta\} \dots\}, \end{aligned} \quad (24)$$

але при цьому слід перевіряти відповідність такої схеми. Як було показано в роботі [11], ключовим для збіжності є значення параметра  $p$ . Так, наприклад, показано, що для значень  $p \leq 0,98$  збіжність рекуррентної схеми побудови розв'язку (24) забезпечується.

Для отримання частотної і амплітудної характеристик автодина (ЧХА і АХА) з відфільтрованою ПАМ скористаємося такими формулами:

$$\begin{aligned} \chi(t, \tau) = & -\Delta \omega_{SM} / \omega_0 \sin[\delta(t, \tau) + \theta] = \\ = & -\Gamma \tilde{C}_{SM} \sin[\delta(t, \tau) + \theta]; \end{aligned} \quad (25)$$

$$a_1(t, \tau) = \Gamma C_{SM,1} \cos[\delta(t, \tau) - \psi_1], \quad (26)$$

де  $\tilde{C}_{SM}$  — деяка константа, яка підкреслює явну залежність ЧХА від параметра  $\Gamma$ .

### 1.3. Моделювання сигналу автодинного відгуку від одиночної цілі в генераторах з варакторним перестроюванням частоти

У генераторах з варакторним перестроюванням частоти одним з основних параметрів, що визначають значення вихідної частоти, є напруга на варакторі  $V$ . Частотна модуляція випромінювання здійснюється шляхом її варіації (див. розд. 1.1). Крім зазначеного, існує ще один спосіб впливати на частоту сигналу генерації шляхом зміни напруги живлення генератора. Про-

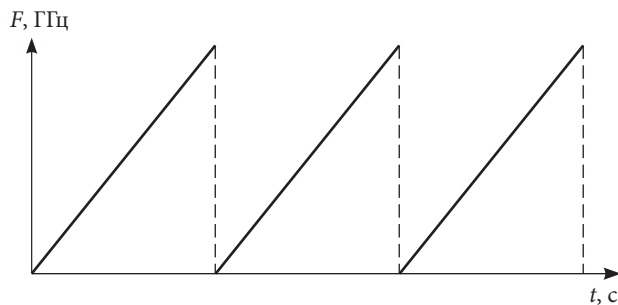


Рис. 2. Часова залежність частоти вихідного модельного ЛЧМ-сигналу автодинного генератора

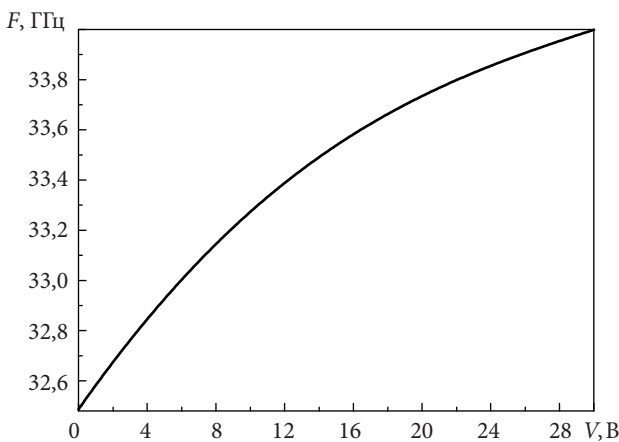


Рис. 3. Перестроювальна характеристика  $F(V)$  реального генератора

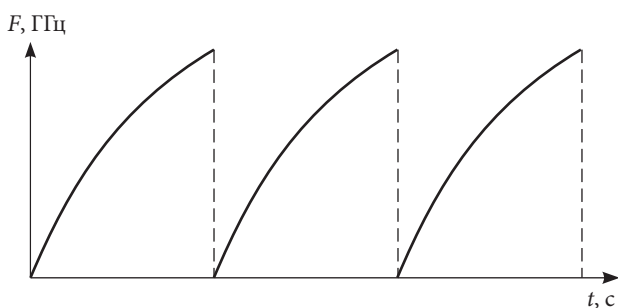


Рис. 4. Часова залежність частоти вихідного сигналу неідеального ЛЧМ-генератора

те такий спосіб (для розглянутих у цій роботі автодинів) має істотні недоліки: перестроювання частоти можливе лише у відносно невеликих межах; від напруги живлення генератора сильно залежить амплітуда вихідного сигналу. Виходячи із зазначеного, впливати на генератор для отримання частотно-модульованого випромінювання потрібно переважно варіацією керуючої напруги на варакторі.

Для моделювання процесів детектування в ЛЧМ-радіолокації часто використовують послідовність зондуючих імпульсів «строго лінійної» пілкоподібної форми (див. рис. 2). При цьому припускають, що для формування зондувального імпульсу слід використовувати керуючу напругу на варакторі автодина —  $V(t)$ , що змінюється у часі за таким же «строго лінійним» законом. Також неявно передбачається, що залежність частоти сигналу генерації від напруги на варакторі (тобто перестроювальна характеристика  $F(V)$ ) — лінійна.

Однак перестроювальна характеристика реального генератора на основі напівпровідникового діода Ганна має залежність, відмінну від лінійної. Приклад такої характеристики для генератора на основі діода Ганна АА727А при застосуванні варактора 3А637А-6 представлено на рис. 3.

Нелінійність перестроювальної характеристики визначають як відношення максимального відхилення модуляційної характеристики від лінійного закону до її діапазону перестроювання частоти за період модуляції. Максимальне зна-

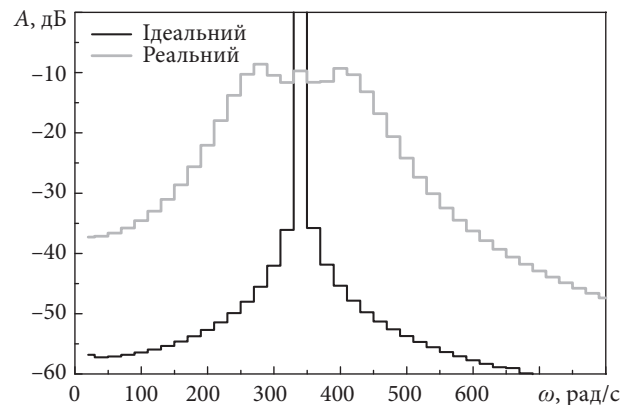


Рис. 5. Результати чисельного моделювання спектральних діаграм вихідного сигналу автодина для реального випадку (з урахуванням нелінійності перестроювальної характеристики  $F(V)$ ) та ідеального випадку (при лінійній перестроювальній характеристиці  $F(V)$ )

чення нелінійності перестроювальної характеристики генератора на основі діода Ганна AA727A досягало 10 %.

Отже, послідовність зондувальних імпульсів реального автодина при «строго лінійній» залежності від часу напруги на варакторі матиме вигляд, представлений на рис. 4.

Для ілюстрації впливу нелінійності побудуємо спектральні діаграми вихідного сигналу (рис. 5), для реального випадку (з урахуванням нелінійності характеристики  $F(V)$ , зображеної на рис. 3) та «ідеального» випадку. Для їх чисельного моделювання скористаємося формулою (24). Для побудови діаграм були задані значення таких параметрів: тривалість зондувального ЛЧМ-імпульсу  $T_M = 0,05$  с; амплітуда варіювання напруги на варакторі (амплітуда модуляції)  $\Delta V = 15$  В; коефіцієнт автодинних спотворень  $p = 1,00069 \cdot 10^{-4}$ ; коефіцієнт неізохронності  $\theta = 1$ ; центральна частота генерації  $\omega_0 = 2\pi \cdot 32,48646 \cdot 10^9$  рад/с; відстань до цілі  $l = 2,38$  м; ширина спектра зондувального імпульсу  $\Delta\omega_{FM} = 2\pi \cdot 1,051386 \cdot 10^9$  рад/с; кількість ітерацій  $N_{iteration} = 10$ ; величина автодинної девіації частоти  $\Delta\omega_{SM} = 2\pi \cdot 10^3$  рад/с. Перестроювальна характеристика реального генератора  $F(V)$  апроксимувалася поліномом 5-го порядку:

$$F(V) = 3,2486 \cdot 10^{10} + 9,7381 \cdot 10^7 V - 1,9104 \cdot 10^6 V^2 - 1,0098 \cdot 10^3 V^3 + 5,1844 \cdot 10^2 V^4 - 2,2283 V^5, \quad (27)$$

при цьому похибка апроксимації складала не більше 0,01 %.

З діаграм на рис. 5 випливає, що наявність нелінійності  $F(V)$  призводить до розширення спектра автодинного відгуку. Зазначимо, що при моделюванні спектральних діаграм сигналу різницевої частоти автодинного відгуку кількість ітерацій нами покладено рівною  $N_{iteration} = 10$ , що, швидше за все, є надлишковим. Питання вибору оптимальної кількості членів ітерацій у формулі (24) пов'язані з вивченням збіжності ітераційного процесу. Дослідження збіжності ітераційного процесу при побудові розв'язку для сигналу автодинного відгуку з урахуванням кількісного внеску кожного наступного члена формули (24) у результуючу точність обчислення показало, що для забезпечення прийнятної для практичного використання точності (-40 дБ) можна обмежитися 3–4 членами. На рис. 6 наведено результа-

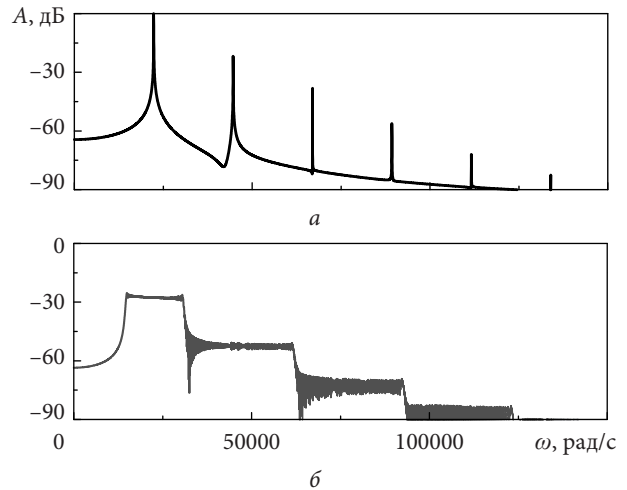


Рис. 6. Результати обчислення спектральних характеристик автодина для автодинного відгуку від відбивача в ідеальному (а) та неідеальному (б) випадках ( $l = 160$  м)

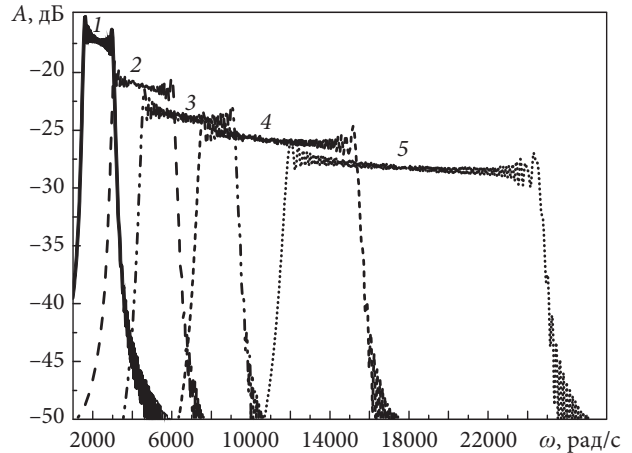


Рис. 7. Спектри автодинного відгуку при різних відстанях до відбиваючого об'єкта: криві 1–5 відповідно 15,9 м; 31,8 м; 47,7 м; 80 м; 127,3 м

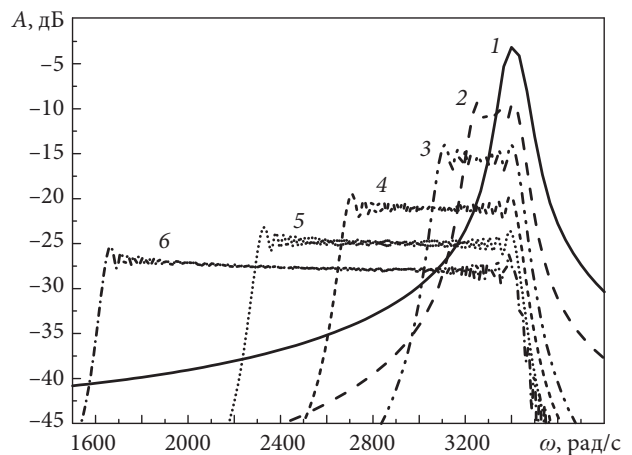


Рис. 8. Спектр автодинного відгуку для різних амплітуд модулюючої напруги (криві 1–6 відповідно 1 В, 2 В, 3 В, 5 В, 9 В, 12 В)

ти обчислення амплітуд ( $\dot{A}$ ) спектральних характеристик автодинного відгуку від відбивача, розташованого на відстані  $l = 160$  м. Параметри моделювання сигналу автодинного відгуку були такими:  $T_M = 0,05$  с,  $\Delta V = 15$  В,  $p = 1,66782 \cdot 10^{-1}$ ,  $\theta = 1$ ,  $\omega_0 = 2\pi \cdot 32,48646 \cdot 10^9$  рад/с,  $\Delta\omega_{FM} = 2\pi \times 1,051386 \cdot 10^9$  рад/с,  $\Delta\omega_{SM} = 2\pi \cdot 10^3$  рад/с.

Як видно з графіків, спектр сигналу відгуку має декілька сплесків (основний спостерігається на нульовій гармоніці, але при цьому порушуються і найвищі, кратні їй). Це обумовлено ангармонічними спотвореннями форми автодинного сигналу, які виникають внаслідок зміни фази сигналу, що формується при впливі на автогенератор з ЧМ-сигналу, відображеного від об'єкта [17, 18].

#### 1.4. Вплив відстані до об'єкта на частотну характеристику сигналу автодинного відгуку

Для вивчення впливу відстані до об'єкта на характеристику сигналу автодинного відгуку проведемо чисельне моделювання. Візьмемо до уваги нелінійний характер залежності частоти генератора від напруги на варакторі (рис. 4). Для моделювання приймемо такі параметри:  $T_M = 0,05$  с,  $\Delta V = 15$  В,  $p = 1,66782 \cdot 10^{-2} \dots 1,66782 \cdot 10^{-1}$ ,  $\theta = 1$ ,  $\omega_0 = 2\pi \cdot 32,48646 \cdot 10^9$  рад/с,  $l = 16 \dots 160$  м,  $\Delta\omega_{FM} = 2\pi \cdot 1,051386 \cdot 10^9$  рад/с,  $\Delta\omega_{SM} = 2\pi \cdot 25 \cdot 10^3$  рад/с,  $N_{iteration} = 10$ .

На рис. 7 подані результати моделювання спектра сигналу автодинного відгуку від одиночного об'єкта, що знаходився на різних відстанях. Як видно з графіків, збільшення відстані до об'єкта призводить не тільки до зміщення частоти автодинного сигналу у бік більш високих частот, але також і до розширення спектра. Також слід зазначити, що залежність зміни ширини спектра від відстані до об'єкта має лінійний характер.

#### 1.5. Вплив діапазону перестроювання частоти генератора на частотну характеристику сигналу автодинного відгуку

Дослідимо вплив діапазону перестроювання частоти генератора на характеристику сигналу автодинного відгуку. При цьому, як і у попередньому параграфі, врахуємо нелінійний характер залежності частоти генератора від напруги на варакторі (рис. 4). Також при моделюванні покладемо задані

значення для таких параметрів:  $T_M = 0,003 \dots 0,045$  с,  $\Delta V = 1 \dots 15$  В,  $\theta = 1$ ,  $\omega_0 = 2\pi \cdot 32,48646 \cdot 10^9$  рад/с,  $\Delta\omega_{FM} = 0,59985 \dots 6,60605$  рад/с,  $p = 1,66782 \cdot 10^{-1}$ ,  $l = 160$  м,  $\Delta\omega_{SM} = 2\pi \cdot 25 \cdot 10^3$  рад/с,  $N_{iteration} = 10$ .

На рис. 8 представлені результати моделювання спектра сигналу автодинного відгуку від одиночного об'єкта, що знаходиться на відстані, для різних амплітуд модулюючої напруги. Як видно з графіків, вплив нелінійності на сигнал автодинного відгуку виявляється у розширенні його спектра, що, як наслідок, може призводити до зниження роздільної здатності автодинних локаторів.

### Висновки

На основі математичної моделі автодинного генератора з варакторним перестроюванням частоти проведено чисельне моделювання спектрів сигналів автодинного відгуку при різних відстанях до відбиваючого об'єкта і амплітуд модулюючої напруги на варакторі. Досліджено вплив нелінійності модуляційної характеристики автогенератора на спектр сигналу автодинного відгуку.

Показано, що за наявності нелінійного характеру залежності частоти генератора від напруги на варакторі вплив цієї нелінійності виявляється у розширенні спектра сигналу автодинного відгуку. Виявлено, що збільшення відстані до об'єкта приводить до зміщення частоти сигналу автодинного відгуку у бік більш високих частот, а наявність нелінійності — до розширення спектра.

Аналіз результатів досліджень особливостей формування сигналів і спектральних характеристик автодинних приймально-передавальних пристроїв з широким перестроюванням частоти показав, що для досягнення високих значень роздільної здатності автодинних локаторів необхідно розробляти методи корекції законів частотної модуляції та обробки сигналів відгуку від об'єктів локації.

Методи та способи вирішення цих завдань будуть відображені у другій частині публікації.

Отримані у роботі результати аналізу сигналів розвивають і доповнюють дані досліджень, виконаних у роботах [19–22], у частині обліку нелінійності модуляційної характеристики під час розрахунку автодинного відгуку генератора.



## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Usanov D.A., Skripal A.I., Skripal A.V., Postelga A.E. A microwave autodyne meter of vibration parameters. *Instruments and Experimental Techniques*. 2004. Vol. 47, Iss. 5. P. 689–693. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:INET.0000043882.16801.3a>.
2. Alidoost S.A., Sadeghzade R., Fatemi R. Autodyne system with a single antenna. *11th Intern. Radar Symposium (IRS-2010)*. Lithuania, Vilnius. 2010. Vol. 2. P. 406–409.
3. Usanov D.A., Postelga A.E. Reconstruction of complicated movement of part of the human body using radio wave autodyne signal. *Biomedical Engineering*. 2011. Vol. 45, Iss. 1. P. 6–8. DOI: 10.1007/s10527-011-9198-9.
4. Mirsaitov F.N., Safonova E.V., Boloznev V.V. Microwave autodyne vibrosensor in aeroengine diagnostics. *European Frequency and Time Forum (EFTF)* (Neuchatel, June 23–26, 2014). Neuchatel, 2014. P. 140–143. DOI: 10.1109/EFTF.2014.7331447.
5. Kim S., Kim B.-H., Yook J.-G., Yun G.-H. Proximity vital sign sensor using self-oscillating mixer. *URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC)* (Seoul, Aug. 21–25, 2016). Seoul, 2016. P. 1446–1448.
6. Носков В.Я., Игнатков К.А., Чупахин А.П. Применение двухдиодных автодинов в устройствах радиоволнового контроля размеров изделий. *Измерительная техника*. 2016. № 7. С. 24–28.
7. Efanov A.A., Diskus C.G., Stelzer A., Thim H.W., Lubke K., Springer A.L. Development of a low-cost 35 GHz radar sensor. *Annals of Telecommunications*. 1997. Vol. 52, Iss. 3. P. 219–223. DOI: 10.1007/BF02996047.
8. Воторопин С.Д., Носков В.Я., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Ч. 5. Исследования автодинов с частотной модуляцией. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2009. № 3. P. 3–50.
9. Носков В.Я., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Ч. 6. Исследования радиоимпульсных автодинов. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2009. № 6. P. 3–51.
10. Носков В.Я., Варавин А.В., Васильев А.С., Ермак Г.П., Закарлюк Н.М., Игнатков К.А., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Ч. 9. Радиолокационное применение автодинов. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2016. № 3. P. 32–86.
11. Воторопин С.Д., Носков В.Я., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Ч. 2. Теоретические и экспериментальные исследования. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2007. № 3. P. 3–33.
12. Kurokawa K. Injection locking of microwave solid-state oscillators. *Proceedings of the IEEE*. 1973. Vol. 61, Iss. 10. P. 1386–1410.
13. Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. *Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний*. Изд. 3, исп. и доп. Москва: Физматлит, 1963. 412 с.
14. Андреев В.С. *Теория нелинейных электрических цепей*. Москва: Связь, 1972. 328 с.
15. Ланда П.С. *Автоколебания в системах с конечным числом степеней свободы*. Москва: Наука, 1980. 324 с.
16. Артым А.Д. *Теория и методы частотной модуляции*. Москва–Ленинград: Госэнергоиздат, 1961. 244 с.
17. Noskov, V.Y., Ignatkov, K.A., Chupahin, A.P., Vasiliev, A.V., Ermak, G.P., Smolskiy, S.M. Peculiarities of signal formation of the autodyne short-range radar with linear frequency modulation. *Visn. NTUU KPI, Ser. Radiotekh. radioaparotobuduv*. 2016. Iss. 67. P. 50–57. DOI: <https://doi.org/10.20535/RADAP.2016.67.50-57>.
18. Varavin A.V., Ermak G.P., Vasilev A.S., Popov I.V. Autodyne Gunn-diode transceiver with internal signal detection for short-range linear FM radar sensor *Telecommunication and Radio Engineering*. 2010. Vol. 69, Iss. 5. P. 451–458. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v69.i5.80.
19. Ermak G.P., Vasilev A.S., Varavin A.V., Popov I.V., Noskov V.Ya., Ignatkov K.A. Radar Sensors for Hump Yard and Rail Crossing Applications. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2012. Vol. 71, Iss. 6. P. 567–80.
20. Noskov V.Ya., Ignatkov K.A., Chupahin A.P., Vasiliev A.S., Ermak G.P., Smolskiy S.M. Signals of Autodyne Radars with Frequency Modulation According to Symmetric Saw-Tooth Law. *Telecommunication and Radio Engineering*. 2016. Vol. 75, Iss. 17. P. 1551–1566. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i17.40.
21. Noskov, V.Y., Ignatkov, K.A., Chupahin, A.P., Vasiliev, A.V., Ermak, G.P., Smolskiy, S.M. () Peculiarities of signal formation of the autodyne short-range radar with linear frequency modulation. *Visn. NTUU KPI, Ser. Radiotekh. radioaparotobuduv*. 2016. Iss. 67. P. 50–57. DOI: <https://doi.org/10.20535/RADAP.2016.67.50-57>.
22. Носков В.Я., Васильев А.С., Ермак Г.П., Игнатков К.А., Чупахин А.П. Флуктуационные характеристики автодинных радиолокаторов с частотной модуляцией. *Изв. вузов. Радиоэлектроника*. 2017. Т. 60. № 3. С. 154–165.

Стаття надійшла 15.12.2021

## REFERENCES

1. Usanov, D.A., Skripal, A.I., Skripal, A.V., Postelga, A.E., 2004. A microwave autodyne meter of vibration parameters. *Instruments and Experimental Techniques*, 47(5), pp. 689–693. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:INET.0000043882.16801.3a>.
2. Alidoost, S.A., Sadeghzade, R., Fatemi, R., 2010. Autodyne system with a single antenna. In: *11th Intern. Radar Symposium (IRS-2010)*. Lithuania, Vilnius. 2, pp. 406–409.

3. Usanov, D.A., Postelga, A.E., 2011. Reconstruction of complicated movement of part of the human body using radio wave autodyne signal. *Biomedical Engineering*, **45**(1), pp. 6–8. DOI: 10.1007/s10527-011-9198-9.
4. Mirsaitov, F.N., Safonova, E.V., Boloznev, V.V., 2014. Microwave autodyne vibrosensor in aeroengine diagnostics. In: *European Frequency and Time Forum (EFTF)*, Neuchatel, June 23–26, 2014. Neuchatel, 2014. P. 140–143.
5. Kim, S; Kim, B.-H., Yook, J.-G., Yun, G.-H., 2016. Proximity vital sign sensor using self-oscillating mixer. In: *URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC)*, Seoul, Aug. 21–25, 2016. Seoul, 2016. P. 1446–1448.
6. Noskov, V.Ya., Ignatkov, K.A., Chupahin, A.P., 2016. Application of Two-Diode Autodynes in Devices for Radiowave Control of Product Dimensions. *Measurement Techniques*, **59**(7), pp. 715–721. DOI: 10.1007/s11018-016-1035-9.
7. Efanov, A.A., Diskus, C.G., Stelzer, A., Thim, H.W., Lubke, K., Springer, A.L., 1997. Development of a low-cost 35 GHz radar sensor. *Annals of Telecommunications*, **52**(3), pp. 219–223. DOI: 10.1007/BF02996047.
8. Votoropin, S.D., Noskov, V.Ya., Smolskiy, S.M., 2009. Modern Hybrid-Integrated Autodyne Oscillators of Microwave and Millimeter Wave Ranges and Their Application. Pt. 5. Frequency Modulated Autodyne Studies. *Successes of modern electronic engineering*, 3, pp. 3–50 (in Russian).
9. Noskov, V.Ya., Smolskiy, S.M., 2009. Modern Hybrid-Integrated Autodyne Oscillators of Microwave and Millimeter Wave Ranges and Their Application. Pt. 6. Investigations of radio pulse autodyne. *Successes of modern electronic engineering*, 6, pp. 3–51 (in Russian).
10. Noskov, V.Ya., Varavin, A.V., Vasiliev, A.S., Ermak, G.P., Zakarlyuk, N.M., Ignatkov, K.A., Smolskiy, S.M., 2016. Modern Hybrid-Integrated Autodyne Oscillators of Microwave and Millimeter Wave Ranges and Their Application. Pt. 9. Autodyne Radar Applications. *Successes of modern electronic engineering*, 3, pp. 32–86 (in Russian).
11. Votoropin, S.D., Noskov, V.Ya., Smolskiy, S.M., 2007. Modern Hybrid-Integrated Autodyne Oscillators of Microwave and Millimeter Wave Ranges and Their Application. Pt. 2. Theoretical and experimental research. *Successes of modern electronic engineering*, 3, pp. 3–33 (in Russian).
12. Kurokawa, K., 1973. Injection locking of microwave solid-state oscillators. *Proceedings of the IEEE*, **61**(10), pp. 1386–1410.
13. Bogolyubov, N.N., Mitropol'skii, Yu.A., 1963. *Asymptotic methods in the theory of nonlinear oscillations*. 3rd ed. Moscow: Fizmatlit Publ. (in Russian).
14. Andreev, V.S., 1972. *Theory of nonlinear electrical circuits*. Moscow: Svyaz' Publ. (in Russian).
15. Landa, P.S., 1980. *Self-oscillations in systems with a finite number of degrees of freedom*. Moscow: Nauka Publ. (in Russian).
16. Artym, A.D., 1961. *Theory and methods of frequency modulation*. Moscow–Leningrad: Gosenergoizdat Publ. (in Russian).
17. Noskov, V.Y., Ignatkov, K.A., Chupahin, A.P., Vasiliev, A.V., Ermak, G.P., Smolskiy, S.M., 2016. Peculiarities of signal formation of the autodyne short-range radar with linear frequency modulation. *Visn. NTUU KPI, Ser. Radiotekh. radioaparotobuduv.*, **67**, pp. 50–57. DOI: <https://doi.org/10.20535/RADAP.2016.67.50-57>.
18. Varavin, A.V., Ermak, G.P., Vasilev, A.S., Popov, I.V., 2010. Autodyne Gunn-diode transceiver with internal signal detection for short-range linear FM radar sensor. *Telecommunication and Radio Engineering*, **69**(5), pp. 451–458. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v69.i5.80.
19. Ermak, G.P., Vasilev, A.S., Varavin, A.V., Popov, I.V., Noskov, V.Ya., Ignatkov, K.A., 2012. Radar Sensors for Hump Yard and Rail Crossing Applications. *Telecommunications and Radio Engineering*, **71**(6), pp. 567–580.
20. Noskov, V.Ya., Ignatkov, K.A., Chupahin, A.P., Vasiliev, A.S., Ermak, G.P., Smolskiy, S.M., 2016. Signals of Autodyne Radars with Frequency Modulation According to Symmetric Saw-Tooth Law. *Telecommunication and Radio Engineering*, **75**(17), pp. 1551–1566. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i17.40.
21. Noskov, V.Y., Ignatkov, K.A., Chupahin, A.P., Vasiliev, A.V., Ermak, G.P., Smolskiy, S.M., 2016. Peculiarities of signal formation of the autodyne short-range radar with linear frequency modulation. *Visn. NTUU KPI, Ser. Radiotekh. radioaparotobuduv.*, **67**, pp. 50–57. DOI: <https://doi.org/10.20535/RADAP.2016.67.50-57>.
22. Noskov, V.Ya., Vasiliev, A.S., Ermak, G.P., Ignatkov, K.A., Chupahin, A.P., 2017. Fluctuation Features of Autodyne Radar with Frequency Modulation. *Radioelectronics and Communications Systems*, **60**(3), pp. 123–131.

Received 15.12.2021

G.P. Ermak, A.S. Vasilev, A.V. Varavin, M.V. Balaban, A.V. Fateev, V.N. Zheltov

O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the NASU  
12, Acad. Proskury St., Kharkiv, 61085, Ukraine

SIGNAL FORMATION AND PROCESSING FEATURES  
FROM AUTODYNE RADAR WITH A WIDE FREQUENCY MODULATION BAND.  
PART. 1. MODELING OF OPERATING MODES OF A FREQUENCY-MODULATION  
AUTODYNE IN VIEW OF MODULATION CHARACTERISTIC NONLINEARITY

**Subject and Purpose.** In Part 1 of the paper, a mathematical model of an autodyne self-oscillator with frequency tuning by varactor capacitance varying is built and thoroughly analyzed for the features of signal formation in autodyne radar with a wide frequency-modulation bandwidth and a nonlinearity in the modulation characteristic. The aim of the study is to appreciate the action that the nonlinearity of the oscillator modulation characteristic exerts on the spectral characteristics of signals from frequency-modulation autodyne radar.

**Methods and Methodology.** The research method is a mathematical analysis of the operation of an autodyne oscillator with electronic frequency tuning. To examine formation processes of emitted autodyne signals, the spectral, frequency and amplitude characteristics of signals from frequency-modulation autodyne radar are constructed with the use of numerical modeling techniques.

**Results.** Numerical modeling of autodyne response signal spectra has been performed for various distances to the reflecting object and different modulating voltages across the varactor. It has been shown that a nonlinear dependence of the generator frequency on the varactor voltage makes for the broadening of the autodyne response signal spectrum. It has been found that as the object distance increases, the frequency of the autodyne response signal moves towards the higher frequencies, while the nonlinearity makes the spectrum broaden. The obtained calculation results refer to an 8-mm Gunn diode autodyne.

**Conclusion.** The performed research of the spectral characteristics and into the features of signal formation in autodyne transceiver devices with a wide frequency tuning has shown that in order to achieve high resolution figures from autodyne radar, certain methods are needed to be developed for adjusting the laws of frequency modulation and for the processing of response signals from reflecting objects. Such a method and ways to solve these problems will be presented in Part 2 of the work.

**Keywords:** *autodyne, autodyne signal, frequency modulation, modulation characteristic nonlinearity, short-range radar, Gunn-diode oscillator, varactor.*