

А. О. Овчарук**СУЧАСНІ МЕТОДИ МОДУЛЯЦІЇ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИГНАЛІВ:
ОГЛЯД ТА КЛАСИФІКАЦІЯ**

У статті представлено системний огляд сучасних підходів до модуляції радіотехнічних сигналів з урахуванням їх класифікації, практичного застосування та перспектив інтеграції в мікроелектронні автогенератори на основі транзисторних структур із від'ємним диференційним опором. Розкрито особливості класичних аналогових методів модуляції, серед яких амплітудна, частотна, фазова, імпульсна, балансна та односмугова, з акцентом на їх перевагах у простоті реалізації й недоліках, пов'язаних зі спектральною ефективністю та стійкістю до шумів. Детально розглянуто цифрові методи модуляції, включаючи ASK, FSK, PSK, QAM та OFDM, які стали основою сучасних систем мобільного зв'язку, супутникових каналів та мереж інтернету речей. Проаналізовано їх здатність забезпечувати високу швидкість передавання даних, ефективне використання частотного спектра та адаптивність до різних умов поширення сигналу. Висвітлено тенденції розвитку комбінованих і багаторівневих форматів модуляції, зокрема застосування адаптивних алгоритмів, що дозволяють підвищувати ефективність систем зв'язку за умов динамічної зміни характеристик каналу. Проведено порівняльний аналіз методів модуляції за критеріями спектральної та енергетичної ефективності, стійкості до завад, складності апаратної реалізації, що дозволяє оцінити їх придатність для використання у високочастотних генераторах. Окрему увагу приділено перспективам впровадження цифрових схем модуляції в автогенераторах на основі структур із від'ємним диференційним опором, де критичною є задача оптимізації балансу між енергоспоживанням, стабільністю сигналу та рівнем інтеграції в мікроелектронні системи. Узагальнення проведеного аналізу створює підґрунтя для подальших досліджень у напрямі розробки енергоефективних і високопродуктивних засобів модуляції, що відповідають вимогам сучасних телекомунікаційних технологій.

Ключові слова: модуляція, аналогові методи, цифрові методи, автогенератори, спектральна ефективність, транзисторні структури, QAM, OFDM.

Вступ

Сучасні системи радіозв'язку функціонують в умовах стрімкого зростання потреб суспільства у швидкій та надійній передачі великих обсягів інформації. Розвиток цифрових технологій, поява мобільних стандартів п'ятого покоління (5G) [1], підготовка до впровадження 6G [2], активне поширення інтернету речей (IoT), бездротових сенсорних мереж і супутникових каналів зв'язку [3] зумовлюють зростання вимог до спектральної та енергетичної ефективності модуляційних методів. У цих умовах вибір оптимальної схеми модуляції стає одним із визначальних факторів ефективності функціонування телекомунікаційних систем. Традиційні аналогові методи модуляції (амплітудна, частотна, фазова) залишаються важливими для класичних систем, таких як радіомовлення чи авіаційний зв'язок. Проте їхні обмеження – низька спектральна ефективність, значна чутливість до шумів та перешкод – не дозволяють у повному обсязі задовольнити потреби новітніх високошвидкісних каналів. Це обумовлює перехід до цифрових методів модуляції, які дають змогу суттєво підвищити пропускну здатність каналів, забезпечують стійкість до завад і можуть адаптуватися до умов поширення сигналу [4]. Разом із тим, цифрові методи (PSK, QAM, OFDM тощо), незважаючи на очевидні переваги, вимагають складних алгоритмів генерації та демодуляції, значних обчислювальних ресурсів, високої стабільності джерела сигналу та якісних схем синхронізації [5]. Це ускладнює їх реалізацію в мікроелектронних пристроях, особливо тих, що базуються на автогенераторах із від'ємним диференційним опором (ВДО). Автогенератори на мікроелектронних транзисторних структурах з ВДО розглядаються як перспективна база для побудови високочастотних генераторів завдяки своїй компактності, можливості інтеграції в мікросхеми та енергоефективності [4, 5].

Модуляція радіотехнічних сигналів є ключовим процесом, що визначає ефективність сучасних систем зв'язку. З розвитком мобільних технологій (4G, 5G, підготовка до 6G), супутникових каналів і інтернету речей (IoT) постають нові вимоги до спектральної та енергетичної ефективності, стійкості до завад і можливості апаратної реалізації модуляційних методів. Традиційні аналогові методи (АМ, ЧМ, ФМ, односмугова, балансна, імпульсна модуляція) зберігають своє значення у класичних системах, але не забезпечують необхідної пропускної здатності та захисту від шумів у високошвидкісних мережах. Саме тому цифрові методи (PSK, QAM, OFDM) стали основою сучасних телекомунікацій, забезпечуючи високу швидкість передавання даних та ефективне використання частотного спектра. Однак цифрові схеми вимагають складних алгоритмів та стабільних генераторів сигналів, що ускладнює їх впровадження в мікроелектронних пристроях, зокрема в автогенераторах на основі транзисторних структур із від'ємним диференціальним опором (ВДО). Такі генератори є перспективними завдяки компактності, енергоефективності та можливості інтеграції, але потребують адаптованих методів модуляції.

Питання модуляції радіотехнічних сигналів активно досліджуються у науковій літературі. У фундаментальних працях описано базові принципи аналогових і цифрових методів модуляції, визначено їх переваги та обмеження, а також окреслено сфери практичного застосування. Особлива увага приділяється критеріям вибору модуляційного методу, серед яких спектральна та енергетична ефективність, стійкість до завад, а також складність реалізації. У сучасних телекомунікаційних системах простежується чітка тенденція до домінування цифрових методів модуляції, що витісняють класичні аналогові підходи. Цифрові формати забезпечують високу швидкість передавання даних, оптимальне використання спектра та можливість адаптивної роботи залежно від умов каналу. Вони стали основою для мобільного зв'язку нових поколінь, широкосмугових бездротових систем і супутникових каналів. Значна кількість досліджень присвячена розвитку ортогональних багаточастотних методів, які забезпечують стійкість до спотворень та дозволяють реалізувати багатокористувацькі системи з високою пропускною здатністю. Паралельно розвивається напрям комбінованих і багаторівневих форматів модуляції, що поєднують високу спектральну ефективність з адаптивністю. Окремий пласт робіт присвячено автогенераторам на основі структур із від'ємним диференціальним опором, які демонструють перспективність для побудови високочастотних мікроелектронних пристроїв. У цих дослідженнях показано потенціал використання таких генераторів як базових елементів для реалізації сучасних методів модуляції. Разом з тим, питання інтеграції складних цифрових форматів у генераторах з від'ємним диференціальним опором ще не отримали достатньої уваги та залишаються актуальним напрямом наукового пошуку.

Метою роботи є систематизація сучасних методів модуляції радіотехнічних сигналів, аналіз їхніх характеристик і визначення можливостей застосування у високочастотних автогенераторах на основі мікроелектронних транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором.

Виклад основного матеріалу

Модуляція є процесом накладання інформаційного сигналу на високочастотне коливання (несучу), яке використовується для передавання даних у каналі зв'язку. Основна мета модуляції полягає у забезпеченні можливості передачі інформації на великі відстані, ефективному використанні спектра та підвищенні завадостійкості системи [6, 7].

Для формування модульованого сигналу необхідно змінювати один або кілька параметрів несучого коливання – амплітуду, частоту, фазу чи їх комбінації. У загальному випадку модульований сигнал можна подати у вигляді:

$$s(t) = A(t) \cdot \cos[\omega_c t + \varphi(t)], \quad (1)$$

де $A(t)$ – амплітудна характеристика, що може змінюватися відповідно до інформаційного сигналу, ω_c – кутова частота несучої, $\varphi(t)$ – фазові відхилення. Залежно від того, який параметр змінюється, визначаються різні типи модуляції.

Методи модуляції умовно поділяють на три основні групи: аналогові, цифрові, комбіновані та гібридні методи [6, 7].

В аналогових методах змінюється параметр безперервного сигналу (амплітуда, частота, фаза), використовуються переважно в радіомовленні, телевізійних та класичних комунікаційних системах.

Цифровий метод модулює послідовність дискретних символів, лежать в основі сучасних телекомунікаційних систем (мобільний зв'язок, Wi-Fi, супутникові канали).

Комбіновані та гібридні методи поєднують аналогові та цифрові принципи, застосовуються у високошвидкісних мережах нового покоління, де потрібна гнучкість до зміни умов каналу.

Для визначення доцільності застосування того чи іншого методу використовують низку критеріїв.

Спектральна ефективність – здатність передавати максимальну кількість інформації в одиниці частотного ресурсу.

Енергетична ефективність – мінімізація енергоспоживання при збереженні якості зв'язку.

Стійкість до шумів і завад – здатність підтримувати коректну передачу сигналу у складних умовах.

Складність апаратної реалізації – рівень апаратних і обчислювальних ресурсів, необхідних для генерації та демодуляції сигналів.

Гнучкість і масштабованість – можливість адаптувати метод до різних умов каналу та інтегрувати в багатокористувацькі системи.

Амплітудна модуляція (АМ) полягає у зміні амплітуди несучого сигналу пропорційно миттєвому значенню інформаційного сигналу [6]. При цьому частота та фаза несучої залишаються незмінними. Сигнал можна описати рівнянням:

$$s(t) = [A_c + m(t)] \cdot \cos(\omega_c t), \quad (2)$$

де A_c – амплітуда несучої, $m(t)$ – інформаційний сигнал, ω_c – кутова частота несучої.

АМ використовується у цивільній авіації на VHF для радіотелефонії застосовують подвійносмугову АМ із повною несучою частотою. Вибір АМ зумовлений відсутністю “ефекту захоплення” (на відміну від FM), що дозволяє диспетчеру розпізнавати накладання викликів у завантаженому ефірі.

Частотна модуляція (ЧМ) полягає у зміні миттєвої частоти несучої відповідно до амплітуди інформаційного сигналу [6]. Амплітуда несучої при цьому залишається сталою.

$$s(t) = A_c \cdot \cos[\omega_c t + k_f \int m(t) dt], \quad (3)$$

де k_f – коефіцієнт девіації частоти.

ЧМ застосовується у аналоговому радіомовленні із типовими девіаціями 75 кГц (або 50 кГц залежно від регіону), попереднім акцентуванням (преемфазою) та стерео-мультиплексом. Така схема забезпечує високу завадостійкість і якісну передачу аудіо.

Фазова модуляція (ФМ) базується на зміні початкової фази несучої хвилі відповідно до інформаційного сигналу [7]. При цьому амплітуда та середня частота несучої залишаються незмінними.

$$s(t) = A_c \cdot \cos[\omega_c t + k_p m(t)], \quad (4)$$

де k_p – коефіцієнт девіації фази.

ФМ в чистому вигляді використовується рідко, однак її ідея реалізована в цифрових

фазових маніпуляціях. Як приклад – супутникові канали телевізійного мовлення, де застосовують QPSK як практичну реалізацію фазового кодування.

Імпульсна модуляція передбачає використання періодичної послідовності імпульсів як несучої, параметри яких змінюються відповідно до інформаційного сигналу[8]. Залежно від того, що саме змінюється, виділяють: PAM (Pulse Amplitude Modulation) – модуляція амплітуди імпульсів; PWM (Pulse Width Modulation) – модуляція тривалості імпульсів; PPM (Pulse Position Modulation) – модуляція положення імпульсів.

Імпульсна модуляція застосовується у дротових високошвидкісних інтерфейсах Ethernet використовуються багаторівневі імпульсні амплітудні сигнали: від PAM – 5 у гігабітних системах на мідних парах до PAM – 4 у надшвидкісних електричних та оптичних лінках. PWM застосовуються у каналах видимого світла, де потрібно сумістити передачу даних із димінгом світлодіодів. Варіанти PPM використовуються в ультраширокосмужових системах ближньої дії для високої точності позиціонування.

Балансна модуляція ґрунтується на пригніченні несучої компоненти в амплітудно-модульованому сигналі. У результаті передається тільки дві бічні смуги спектра, що суттєво зменшує енергетичні втрати[8]. Сигнал описується рівнянням:

$$s(t) = m(t) \cdot \cos(\omega_c t), \quad (5)$$

де відсутній сталий доданок, що відповідає несучій.

Балансна модуляція практично виконує роль будівельного блоку QAM. Такий принцип лежить в основі кабельних систем із модуляціями.

Односмужова модуляція є подальшим удосконаленням балансної. Застосовується у далекому зв'язку, широко використовуються в односмужовій телефонії з пригніченою несучою, як правило на верхній боковій смузі. Це зменшує займану смугу й підвищує енергоефективність порівняно з традиційною АМ. У цьому методі несуча пригнічується, а разом з нею видаляється одна з бічних смуг [7, 9]. Завдяки цьому вдається значно зекономити як спектр, так і потужність. Сигнал описується як:

$$s(t) = \frac{1}{2} [m(t) \cdot \cos(\omega_c t) \pm \hat{m}(t) \cdot \sin(\omega_c t)], \quad (6)$$

де $\hat{m}(t)$ – аналітичне продовження сигналу.

Таблиця 1 [10]

Методи аналогової модуляції радіосигналів

Вид модуляції	Основний принцип	Переваги	Недоліки
Амплітудна	Зміна амплітуди несучої відповідно до сигналу	Простота реалізації; сумісність із класичними радіоприймачами	Висока чутливість до шумів та завад; низька спектральна ефективність
Частотна	Зміна миттєвої частоти несучої	Висока завадостійкість; хороша якість відтворення	Більша ширина смуги; складніші демодулятори
Фазова	Зміна фази несучої	Висока стійкість до амплітудних шумів; основа цифрових методів	Високі вимоги до синхронізації; складна апаратура
Імпульсна	Модуляція параметрів імпульсів (амплітуда, ширина, положення)	Простота перетворення в цифрову форму; завадостійкість	Неекономне використання спектра; потреба синхронізації
Балансна	Передача лише бічних смуг (без несучої)	Економія енергії; краща завадостійкість, ніж АМ	Складність відновлення несучої; ширший спектр
Односмужова	Передача лише однієї бічної смуги	Найвища спектральна ефективність; економія потужності	Дуже складна генерація та прийом; висока вартість апаратури

Амплітудна маніпуляція (ASK-Amplitude Shift Keying) є цифровим аналогом амплітудної модуляції. Передача інформації здійснюється шляхом зміни амплітуди несучої хвилі відповідно до дискретного повідомлення[11]. При логічному “0” передається відсутність

сигналу або сигнал із мінімальною амплітудою. При логічному “1” передається сигнал з максимальною амплітудою. Математично сигнал описується як:

$$s(t) = A \cdot m(t) \cdot \cos(\omega_c t), \quad (7)$$

де $m(t)$ – двійковий інформаційний сигнал, A – амплітуда, ω_c – кутова частота несучої.

Як приклад – використовується у безконтактній системі ближнього радіозв'язку та ідентифікації.

Частотна маніпуляція (FSK-Frequency Shift Keying) є цифровим аналогом частотної модуляції. Передача інформації здійснюється шляхом зміни частоти несучої залежно від значення двійкового сигналу [11, 12]: при логічному “0” сигнал передається на частоті f_0 ; при логічному “1” сигнал передається на частоті f_1 . Для багаторівневих систем (M-FSK) використовується кілька частот, де кожна частота відповідає певній комбінації бітів.

Ця маніпуляція є базовою для енергоощадних персональних мереж ближнього радіусу дії. Така схема забезпечує просту та надійну роботу пристроїв із низьким енергоспоживанням.

Математичний вираз для сигналу:

$$s(t) = A \cdot \cos(2\pi f_i t), \quad f_i \in \{f_0, f_1, \dots, f_M\} \quad (8)$$

де M – кількість можливих частотних станів.

Фазова маніпуляція (PSK-PhaseShiftKeying) є цифровим аналогом фазової модуляції. Інформація кодується у вигляді зміни фази несучого сигналу [12]. У найпростішому випадку (BPSK-Binary PSK) використовується дві фази, що відрізняються на 180° . У більш складних варіантах (QPSK-Quadrature PSK) застосовуються чотири фази, кожна з яких відповідає двом бітам інформації. Подальший розвиток – багаторівневі PSK (наприклад, 8-PSK, 16-PSK), які дозволяють збільшувати швидкість передачі даних.

Фазові маніпуляції широко застосовують у супутникових і мікрохвильових каналах, де важливі спектральна ефективність і завадостійкість за обмеженої лінійності підсилювачів.

Математично сигнал описується як:

$$s(t) = A \cdot \cos(2\pi f_c t + \varphi_i) \quad (9)$$

де φ_i – фаза, що відповідає певній бітовій комбінації.

Квадратурна амплітудна модуляція (QAM – Quadrature Amplitude Modulation) поєднує амплітудну (ASK) та фазову (PSK) модуляцію. Інформація передається шляхом одночасної зміни як амплітуди, так і фази несучої хвилі [13]. Це дозволяє значно збільшити кількість символів, які можуть передаватися одним сигналом.

Наприклад: 16-QAM передає 4 біти за символ (16 різних станів). 64-QAM передає 6 бітів за символ. 256-QAM передає 8 бітів за символ. QAM є основою для адаптивної модуляції даних у стільникових системах останніх поколінь і кабельних мережах. Перемикання між порядками дозволяє гнучко погоджувати швидкість передачі з умовами каналу.

Математично сигнал описується як:

$$s(t) = I(t) \cdot \cos(2\pi f_c t) - Q(t) \cdot \sin(2\pi f_c t), \quad (10)$$

де $I(t)$ та $Q(t)$ – складові, що визначають амплітуду та фазу сигналу.

Багаточастотна модуляція (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing) це метод модуляції, у якому дані передаються одночасно на великій кількості піднесучих, що розташовані ортогонально одна до одної. Завдяки ортогональності піднесучі не заважають одна одній, що дозволяє максимально ефективно використовувати смугу частот [12, 13]. Кожна піднесуча модулюється окремо (наприклад, QPSK чи QAM), а потім всі сигнали об'єднуються в один багаточастотний потік. Це робить систему дуже стійкою до багатопроменевих спотворень. Використовується в мобільних мережах та ефірному телемовленні.

Таблиця 2 [14]

Методи цифрової модуляції радіосигналів

Метод модуляції	Принцип роботи	Переваги	Недоліки
ASK (Amplitude Shift Keying)	Інформація кодується зміною амплітуди несучої	Простота реалізації	Дуже чутливий до шумів, низька завадостійкість
FSK (Frequency Shift Keying)	Інформація кодується зміною частоти несучої	Стійкий до амплітудних шумів	Потребує ширшої смуги, складніша реалізація
PSK (Phase Shift Keying)	Інформація кодується зміною фази несучої	Висока спектральна ефективність, стійкість до шумів	Високі вимоги до синхронізації
QAM (Quadrature Amplitude Modulation)	Поєднання зміни амплітуди та фази	Дуже висока швидкість передачі, ефективне використання спектра	Чутливість до шумів, складність реалізації
OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)	Поділ даних на ортогональні піднесучі	Висока швидкість, стійкість до багатопроменевих спотворень	Складність реалізації, високе PAPR

Автогенератор – це електронний пристрій, який створює періодичні коливання без зовнішнього гармонічного сигналу на вході. У традиційних схемах для підтримки коливань використовується позитивний зворотний зв'язок. Особливість автогенераторів на основі транзисторних структур із від'ємним диференціальним опором полягає у використанні внутрішніх властивостей напівпровідникових приладів для компенсації втрат в резонансному колі.

У ділянці вольт-амперної характеристики (ВАХ) деяких напівпровідникових елементів (тунельних діодів, лавинних транзисторів, гетероструктурних польових транзисторів) спостерігається область, де збільшення напруги призводить до зменшення струму. Ця область і називається від'ємним диференціальним опором [15]:

$$R_{\text{диф}} = \frac{dU}{dI} < 0. \quad (11)$$

Фактично така ділянка може замінювати активний елемент підсилювача, оскільки вона компенсує втрати у коливальному контурі. Це дозволяє підтримувати сталі коливання [16].

Для математичного опису ділянки із від'ємним диференціальним описом зручно користуватися кусочно – лінійною апроксимацією ВАХ:

$$I(U) = \begin{cases} s_1 U, & 0 \leq U < U_p, \\ I_p + s_2 (U - U_p), & U_p \leq U \leq U_v, \\ I_v + s_3 (U - U_v), & U > U_v, \end{cases} \quad (12)$$

де (U_p, I_p) – «пік», (U_v, I_v) – «долина», $s_1 > 0$, $s_3 > 0$, а $s_2 < 0$ задає спадну ділянку (ВДО).

На цій ділянці:

$$\frac{dI}{dU} = s_2 < 0, \quad R_{\text{диф}} = \frac{1}{s_2} < 0. \quad (13)$$

Робоча точка генератора визначається розв'язком рівняння перетину з навантажувальною прямою:

$$I(U) = \frac{U_{DD} - U}{R_L}. \quad (14)$$

Енергоефективність модуляцій в автогенераторах із ВДО оцінюємо за РАЕ та ККД:

$$\eta = \frac{P_{RF,out}}{P_{DC}}, \quad PAE = \frac{P_{RF,out} - P_{in}}{P_{DC}} \approx \frac{P_{RF,out}}{P_{DC}} \quad (\text{коли } P_{in} \approx 0) \quad (15)$$

Автогенератор із ВДО зручно подавати еквівалентом паралельного RLC із негативною провідністю $-G_N(A)$. У сталому режимі амплітуди A :

$$G_N(A) = G_R, \quad G_R = \frac{1}{R_{втр}} + \frac{1}{R_{навантаж}} \quad (16)$$

тобто нелінійність активного елемента підлаштовує $-G_N$ під сумарні втрати. Модуляція змінює або G_N , або реактивні параметри (частоту/фазу), або навантаження; від цього залежить, чи зберігається оптимальний баланс втрат і наскільки ростуть втрати на огинаючу/перемодуляцію.

Два ключові принципи:

Постійна огинаюча (FSK/PM/PSK) зберігається оптимум $-G_N \approx G_R$ протягом символів кращий η /РАЕ і менші вимоги до «резерву» по амплітуді.

Змінна огинаюча (AM/ASK/QAM/OFDM) потрібен запас по амплітуді та/або глибини керування, інакше зрив стійкості гірший η /РАЕ, особливо за великого PAPR (для OFDM типовий діапазон від кількох до десяти дБ).

АМ: Середня потужність зростає із глибиною m як $P_{AM} \propto (1 + m^2/2)$, але енергія в несучій не переносить даних. В автогенераторі це змушує тримати запас стійкості (робоча точка ближче до лінійної ділянки), що зменшує η . Практично АМ доречна для простих передавачів або коли потрібна сумісність зі спадковими приймачами; для систем із жорсткими обмеженнями споживання краще уникати.

ЧМ: змінює частоту резонансу (фазу), не вимагаючи зміни амплітуди. У ВДО-автогенераторі це реалізують варикапом, зміною напруги зміщення чи реактивностей, тож $-G_N$ може залишатись поблизу оптимального значення. В результаті вища η , ніж у АМ, за тієї ж якості сигналу. Обмеження: надто велика девіація розтягує спектр і збільшує вимоги до навантаження/фільтра.

ФМ: Як і ЧМ, постійна огинаюча висока енергоефективність. У генераторній реалізації зручно керувати фазою через невеликі зсуви частоти/реактивності; РАЕ близький до ЧМ. Важливо обмежити швидкість фазових стрибків відносно смуги резонатора, інакше зростають втрати в петлі стабілізації амплітуди.

Імпульсна модуляція: РАМ у синусоїдних автогенераторах веде до змінної огинаючої, тож η зазвичай нижча. Доцільна у дрових/низькочастотних інтерфейсах. PPM/PWM можуть бути енергоощадними у пакетному/імпульсному режимі: генератор вмикається на короткі пакети (низький середній P_{DC}). Компроміс – більші вимоги до смуги тракту та спектральні «хвости» при крутих фронтах; потрібне формування імпульсу.

Балансна модуляція: Енергія не витрачається на несучу, але огинаюча змінна, тож потрібен back-off стійкості. У ВДО-генераторі DSB-SC вимагає або двоканального (I/Q) формування, або підмішування – обидва варіанти знижують загальний η проти PM/FSK, але краще за класичну АМ завдяки відсутності «порожньої» несучої.

Односмугова модуляція: Виграє у спектральній ефективності та потужності, оскільки відкидається зайва бокова смуга і несуча. Проте це лінійна схема зі змінною огинаючою у генераторній реалізації, як і для DSB-SC, потрібен запас стійкості; η зазвичай середня між DSB-SC і QAM за тієї ж швидкості даних.

ASK: Для ООК можливий дуже високий середній η у низькому коефіцієнті заповнення (генератор вимикається між «1»), але це підвищує вимоги до пригнічення перехідних процесів і до фільтрації (щоб не «засмічувати» сусідні канали). Для неповного ASK (10 – 30 % відсікання) η нижча, але простіше виконати спектральні вимоги.

FSK Постійна огинаюча одна з найкращих схем за η для ВДО-автогенераторів. Реалізується керуванням частотою через варикап або зміною навантаження. Вузька девіація висока енергоефективність і низькі вимоги до «резерву» амплітуди; велика девіація більша смуга, але η усе ще краща, ніж у AM/ASK.

PSK Також постійна огинаюча. Для BPSK/QPSK η висока й порівняна з FSK/PM. Важливі швидкі точні фазові стрибки без перерозгойдування амплітуди; у практиці застосовують інжекційне підсинхронення або рознесення фазових кроків на кілька періодів, щоб не втрачати стійкість.

QAM: Змінна огинаюча з високими вимогами до лінійності. В автогенераторі з ВДО це означає суттєвий back-off по амплітуді/глибині керування, щоб не вибивати робочу точку з ділянки ВДО. У підсумку η помітно нижча, ніж у PSK/FSK. Пом'якшення: полярна передача (фаза в генераторі, амплітуда-окремим малопотужним каскадом), попередня корекція спотворень (предисторсія) та контроль амплітуди з обмеженням PAPR.

OFDM: Багатонесуча з високим PAPR (типово від кількох до десяти дБ), що змушує тримати великий запас по стійкості, і це різко знижує η . Для автогенератора з ВДО доцільні обмеження PAPR (кліпінг з відновленням, тонке підмішування, вибір карт рознесення), усереднене керування – G_N або використання DFT-s-OFDM/квазірівноенергетичних карт, якщо це сумісно з протоколом.

Для автогенераторів на структурах із ВДО найвищу енергоефективність зазвичай дають FSK/PM/PSK (постійна огинаюча). AM/ASK/SSB/DSB-SC забезпечують середню ефективність і потребують запасу по стійкості. QAM і OFDM-найвимогливіші з погляду η через змінну огинаючу та високий PAPR; їх доцільно застосовувати лише за наявності архітектурних заходів із зниження навантаження на генератор (полярна передача, попередня корекція спотворень, обмеження PAPR).

В автогенераторах із ВДО амплітудна модуляція реалізується шляхом впливу модулюючої напруги на робочу точку транзисторної структури. Це змінює амплітуду коливань у коливальному контурі.

ЧМ реалізується за допомогою впливу модулюючого сигналу на ємність або індуктивність контуру (варикап у схемі автогенератора). Це змінює частоту коливань відповідно до інформаційного сигналу.

ФМ ґрунтується на зміні початкової фази коливань у колі автогенератора. Це досягається введенням фазозсувного елемента в контур або зміною умов зворотного зв'язку під дією модулюючого сигналу [16].

Цифрова модуляція базується на зміні параметрів несучої хвилі (амплітуди, частоти, фази або їх комбінацій) дискретним чином відповідно до цифрових даних. Використання автогенераторів на основі мікроелектронних транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором (ВДО) дає можливість реалізувати високошвидкісні та компактні модулятори, інтегровані безпосередньо у мікросхеми сучасних телекомунікаційних систем.

ASK у автогенераторах із ВДО реалізується шляхом подачі цифрового сигналу керування на вхідну схему, що впливає на амплітуду коливань у коливальному контурі.

FSK реалізується через зміну ємності або індуктивності резонансного контуру за допомогою варикапів чи керованих транзисторних структур. У результаті формується дві або більше робочих частот, які відповідають різним бітам інформації.

У PSK інформація кодується зміною фази коливань, що формується автогенератором із ВДО. Це досягається введенням керованих фазозсувних елементів або керуванням режимом транзисторів.

QAM передбачає одночасну зміну амплітуди та фази сигналу, що в автогенераторах із

ВДО реалізується комбінованим керуванням декількома параметрами кола.

У схемах на базі ВДО OFDM реалізується через паралельну генерацію багатьох ортогональних піднесучих. Це досягається завдяки використанню масиву узгоджених автогенераторів [17].

Висновки

Наведені результати системного огляду методів та засобів модуляції радіотехнічних сигналів, що реалізуються на основі автогенераторів із мікроелектронними транзисторними структурами з від’ємним диференційним опором. Розглянуто класичні підходи до аналогової модуляції – амплітудної, частотної та фазової, а також їх реалізацію у схемах на базі транзисторів із ВДО. Показано, що такі генератори дозволяють ефективно формувати стабільні несучі коливання та забезпечувати необхідний рівень керування параметрами сигналу. Особливу увагу приділено сучасним методам цифрової модуляції та маніпуляції, серед яких ASK, FSK, PSK, QAM та OFDM. Проаналізовано їхні технічні особливості, переваги та обмеження при апаратній реалізації у схемах з ВДО. Встановлено, що використання цих структур дозволяє створювати компактні та високошвидкісні модулятори з можливістю інтеграції у системи-на-чипі. Наукова новизна роботи полягає в систематизації підходів до використання транзисторних структур із ВДО у задачах аналогової та цифрової модуляції, а також у визначенні перспективних напрямів їх застосування в сучасних та майбутніх системах електронних комунікацій. Практичне значення результатів полягає в можливості розробки ефективних пристроїв модуляції для мобільного зв’язку нового покоління, бездротових сенсорних мереж, систем супутникового зв’язку та Інтернету речей. Подальші дослідження доцільно зосередити на розробці математичних моделей оптимізованих режимів роботи автогенераторів із ВДО, створенні комбінованих методів модуляції та пошуку шляхів зниження енергоспоживання мікроелектронних схем.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Dahlman E., Parkvall S., Sköld J. 5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology. Amsterdam : Academic Press, 2018. P. 1–50. ISBN 978-0-12-814323-0.
2. 6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture and Key Technologies / Z. Zhang et al. *IEEE Vehicular Technology Magazine*. 2019. T. 14, № 3. P. 28–41. DOI: 10.1109/MVT.2019.2921208.
3. Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work! / T. S. Rappaport et al. *IEEE Access*. 2013. T. 1. P. 335–349. DOI: 10.1109/ACCESS.2013.2260813.
4. Sze S. M., Ng K. K. Physics of Semiconductor Devices. 3rd ed. Hoboken : Wiley, 2006. 832 p. ISBN 978-0-471-14323-9.
5. Feiginov M. Frequency Limitations of Resonant-Tunnelling Diodes in Sub-THz and THz Oscillators and Detectors. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. 2019. T. 40. P. 365–394. DOI: 10.1007/s10762-019-00573-5.
6. Proakis J. G., Salehi M. Digital Communications. 5th ed. New York : McGraw-Hill, 2008. 1136 p. ISBN 978-0-07-295716-7.
7. Sklar B. Digital Communications: Fundamentals and Applications. 2nd ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2001. 1104 p. ISBN 978-0-13-084788-1.
8. Haykin S. Communication Systems. 5th ed. Hoboken : Wiley, 2009. 800 p. ISBN 978-0-471-69790-9.
9. 3GPP TS 38.211 V15.2.0 (2018-07). Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Physical channels and modulation (Release 15). P. 13–14. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138200_138299/138211/15.02.00_60/ts_138211v150200p.pdf.
10. Tse D., Viswanath P. Fundamentals of Wireless Communication. Cambridge : Cambridge University Press, 2005. 564 p. DOI: 10.1017/CBO9780511804123.
11. Bingham J. A. C. Multicarrier modulation for data transmission: An idea whose time has come. *IEEE Communications Magazine*. 1990. T. 28, № 5. P. 5–14. DOI: 10.1109/35.54342.
12. MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB / Cho Y. S. et al. Hoboken : Wiley, 2010. 544 p. ISBN 978-0-470-82579-3.
13. Han S. H., Lee J. H. An Overview of Peak-to-Average Power Ratio Reduction Techniques for Multicarrier Transmission. *IEEE Wireless Communications*. 2005. T. 12, № 2. P. 56–65. DOI: 10.1109/MWC.2005.1421929.
14. Lathi B. P., Ding Z. Modern Digital and Analog Communication Systems. 4th ed. New York : Oxford University Press, 2010. 880 p. ISBN 978-0-19-533145-5.
15. Razavi B. RF Microelectronics. 2nd ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2011. 928 p. ISBN 978-0-13-

713473-1.

16. Leeson D. B. A Simple Model of Feedback Oscillator Noise Spectrum. *Proceedings of the IEEE*. 1966. Т. 54, № 2. Р. 329–330. DOI: 10.1109/PROC.1966.4682.

17. Asada M., Suzuki S. Terahertz-Emitting Resonant-Tunneling Diodes. *Sensors*. 2021. Т. 21, № 12. Р. 1384. DOI: 10.3390/s21041384.

Стаття надійшла до редакції 01.09.2025.

Стаття пройшла рецензування 28.09.2025.

Овчарук Артем Олександрович – аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, факультет інформаційних електронних систем, e-mail: artyom.ovcharuk@gmail.com.

Вінницький національний технічний університет.