



УДК 621.375.132

**THEORETICAL BACKGROUND TO OPTIMIZE CONSTRUCTING THE  
OSCILLATORS OF PERIODIC ELECTRIC OSCILLATION BASED ON  
TRANSISTOR STRUCTURES WITH NEGATIVE RESISTANCE  
ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПОБУДОВИ ГЕНЕРАТОРІВ  
ПЕРІОДИЧНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛИВАНЬ НА ОСНОВІ ТРАНЗИСТОРНИХ  
СТРУКТУР З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ**

Semenov A.O. / Семенов А.О.

c.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.

ORCID: 0000-0001-9580-6602

Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Khmelnytsky shose 95, 21021

Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Хмельницьке шосе 95, 21021

**Анотація.** У роботі розглянуто теоретичні засади для оптимізації побудови генераторів електричних коливань на основі транзисторних схем і структур з від'ємним опором. Наведено модифіковану математичну модель ван дер Поля, яка описує динамічні процеси осциляторного та релаксаційного режимів роботи генератора. Отримано фазові портрети генераторів, часові та частотні характеристики генерованої напруги. Проаналізовано основні протиріччя, які виникають у автоколивальній системі таких генераторів. Наведено підходи до оптимізації побудови електрично керованих генераторів на основі транзисторних структур з від'ємним опором.

**Ключові слова:** генератор, математична модель, ван дер Поль, фазовий портрет, оптимізація.

**Вступ.**

Сучасний стан розвитку пристроїв генерування та формування сигналів суттєвим чином визначається останніми досягненнями технології виготовлення напівпровідникових приладів [1]. Такий підхід приводить до того, що з часом буде досягнута межа технологічних можливостей фізичної реалізації напівпровідникових приладів. Тому останнім часом все більше уваги приділяється розробці та дослідженню властивостей транзисторних схемотехнічних аналогів багатошарових напівпровідникових приладів.

Новим напрямком в розробці радіотехнічних пристроїв для генерування та формування сигналів із заданими параметрами і характеристиками є використання нелінійних та реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором [2]. Застосування ємнісного та індуктивного ефектів і від'ємного диференціального опору транзисторних схем і структур значно спрощує побудову та функціонування таких пристроїв формування сигналів як фільтри, фазообертачі, помножувачі та подільники частоти, а також різноманітні генераторні пристрої: генератори опорних коливань, діапазонні генератори керовані напругою, генератори імпульсів різної форми (прямокутних, пилоподібних, трикутних і спеціальної форми) [2].

Метою роботи є формування теоретичних засад для оптимізації побудови генераторів періодичних коливань, сумісних з мікроелектронною базою, принцип роботи яких оснований на функціональній залежності нелінійних і реактивних властивостей транзисторних схем і структур з від'ємним опором від зміни режимів живлення та керування.



### Основний текст

У осциляторному режимі роботи еквівалентна схема генератора на основі транзисторних схем і структур з від'ємним опором має вигляд рис. 1,а [2]. Для еквівалентної схеми генератора на основі першого закону Кірхгофа маємо [3]

$$i_T(u) = C \frac{du}{dt} + \frac{u}{R} + \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u dt. \quad (1)$$

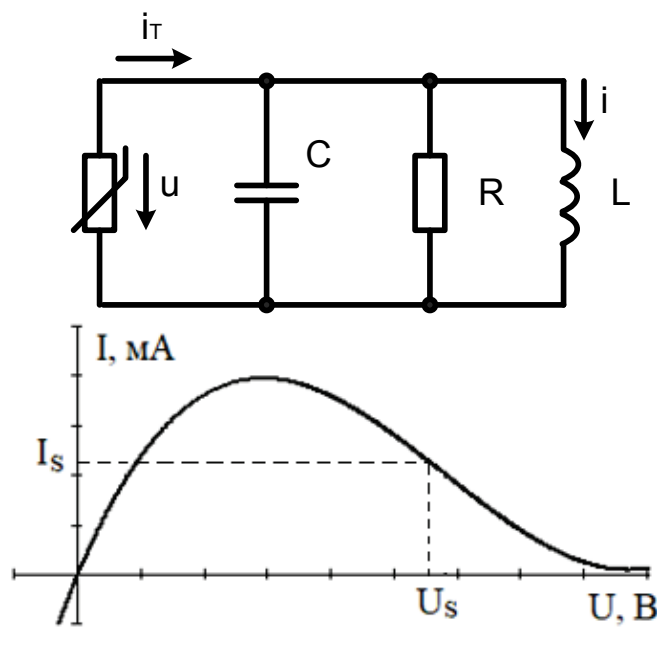


Рис.1. Еквівалентна схема (а) та апроксимована ВАХ транзисторної структури (б) генератора електричних коливань

Продиференціювавши рівняння (2.1) і привівши подібні у роботі [4] автором було отримано таке диференціальне рівняння у нормованому часі  $\tau = \omega_0 t$  (де  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$  - частота генерованих коливань)

$$\frac{d^2 u}{d\tau^2} + \frac{1}{\omega_0} \left( \frac{1}{RC} - \frac{di_T(u)}{du} \right) \frac{du}{d\tau} + u = 0. \quad (2)$$

Рівняння апроксимації статичної ВАХ ТСВО поліномом третього ступеня має вигляд [2]

$$i_T(u) = (I_s + gU_s - hU_s^3) - (g - 3hU_s^2)u - 3hU_s u^2 + hu^3, \quad (3)$$

де  $g, h$  - коефіцієнти апроксимації.

Відповідно до методики [3], підставивши  $i_T(u)$  з (3) у (2) та привівши подібні, диференціальне рівняння (2) приведено до вигляду Ван дер Поля [3]



$$\frac{d^2u}{d\tau^2} + \mu(1 - bu - qu^2) \frac{du}{d\tau} + u = 0, \quad (4)$$

де безрозмірні коефіцієнти із урахуванням апроксимації (3) обраховуються по таких формулах, які отримані автором у роботі [4]

$$\mu = \sqrt{\frac{L}{C}}(g - 3hU_s^2) - R\sqrt{\frac{C}{L}}, \quad b = \frac{3hU_s}{\mu}, \quad q = \frac{3h}{\mu} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (5)$$

Результати дослідження динамічних процесів у транзисторних генераторах при різних параметрах динамічної системи (2), які отримані автором у роботі [4], наведені на рис. 2 – рис. 4.

Для виявлення протиріч, які виникають у ван дер Поль подібних автоколивальних системах, перетворимо рівняння (4) до вигляду

$$\frac{d^2u}{d\tau^2} + u = \mu(qu^2 + bu - 1) \frac{du}{d\tau}, \quad (6)$$

де  $\mu$  - малий параметр,  $u$ ,  $\frac{du}{d\tau}$ ,  $\frac{d^2u}{d\tau^2}$  - досліджувана функція часу генерованої напруги та її похідні.

Ліва частина рівняння (6) є лінійною, а права – нелінійною частинами автоколивальної системи. При  $\mu = 0$ , матимемо  $\frac{d^2u}{d\tau^2} + u = 0$ , рішенням якого є  $u(\tau) = U_m \cos(\omega_0\tau + \varphi_0)$ , де  $U_m$  - амплітуда коливань генерованої напруги;  $\omega = 1$  - частота і  $\varphi_0$  - їх початкова фаза. Величина амплітуди та фази генерованих коливань синусоїдальної напруги визначаються з початкових умов.

Права частина диференціального рівняння (6) визначає нелінійні властивості активного елемента генератора на основі транзисторної структури.

Як видно з рис. 2 – рис. 4 від значення малого параметру  $\mu$  залежать режим роботи автоколивальної системи (осциляторний або релаксаційний), частота автоколивань, час установлення стаціонарного режиму та коефіцієнт гармонік. Аналіз результатів модельного дослідження генераторів при різних значеннях параметрів автоколивальної системи (4), які подані на рис. 2 – рис. 4, визначає основне протиріччя – неможливо одночасно отримати автоколивання з малим коефіцієнтом гармонік і малим часом установлення стаціонарних автоколивань.

Для квазігармонічних коливань осциляторного режиму при малих значеннях  $\mu$  рівняння генерованої напруги можна подати у вигляді ряду [5]

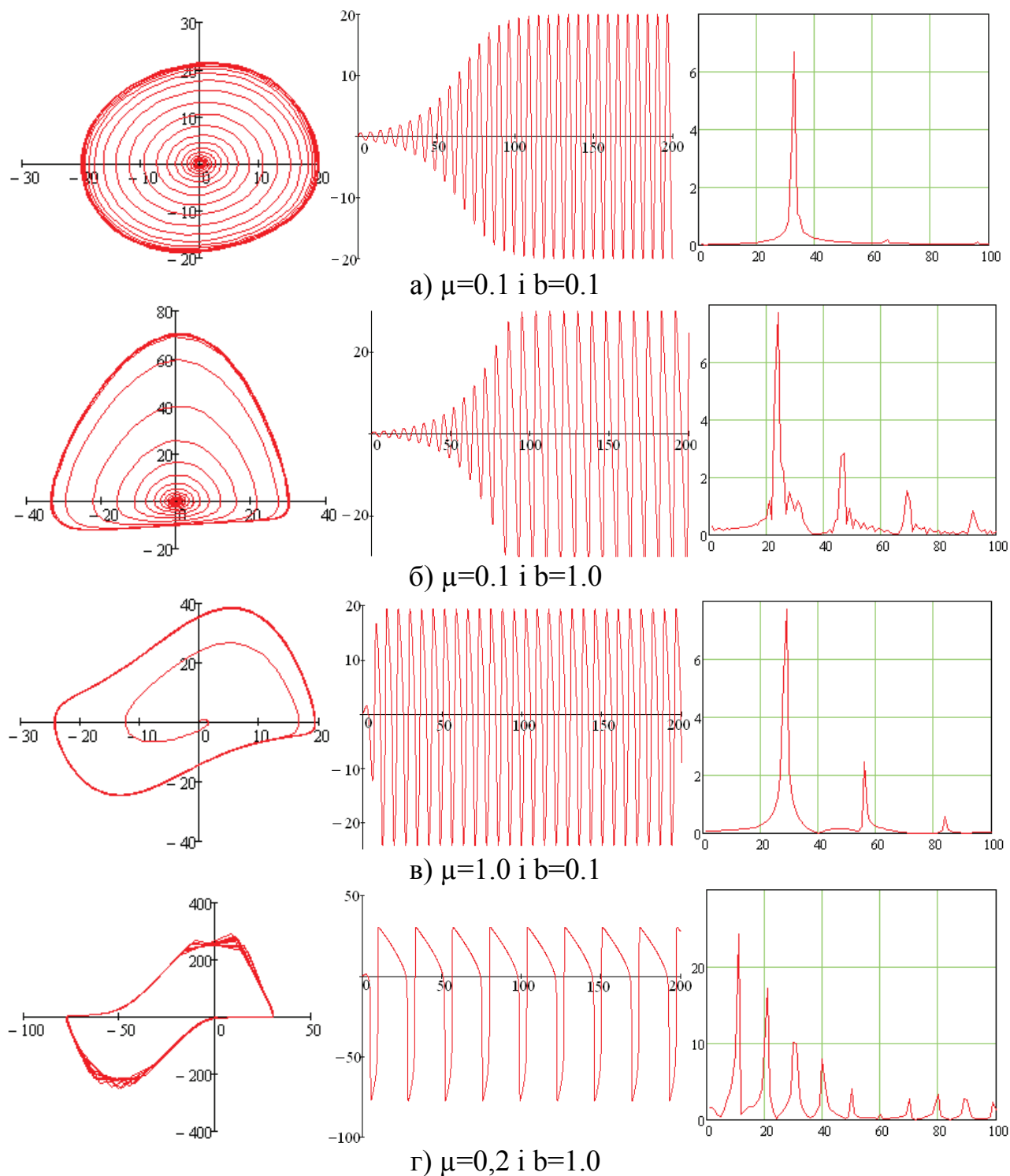
$$u = U_m \cos(\psi) + \mu u_1(U_m, \psi) + \mu^2 u_2(U_m, \psi) + \dots, \quad (7)$$

де  $u = U_m \cos(\psi)$  - функція, що описує перше наближення установлених квазігармонічних коливань,  $u_1(U_m, \psi)$  і  $u_2(U_m, \psi)$  - періодичні функції, що

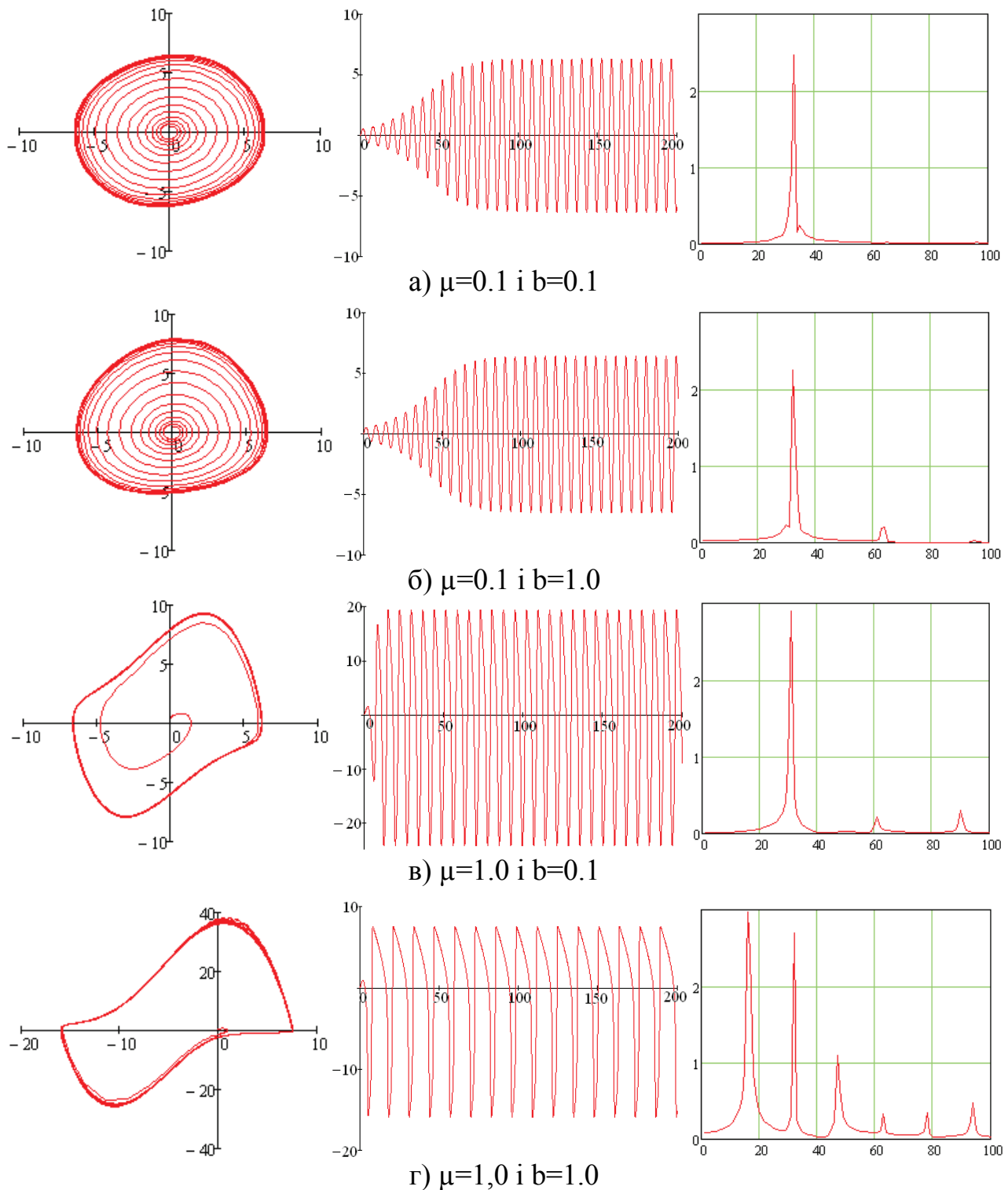


описують вищі наближення рішення рівняння;  $U_m$  - усереднена амплітуда;  $\psi = \omega\tau + \varphi$  - повна фаза.

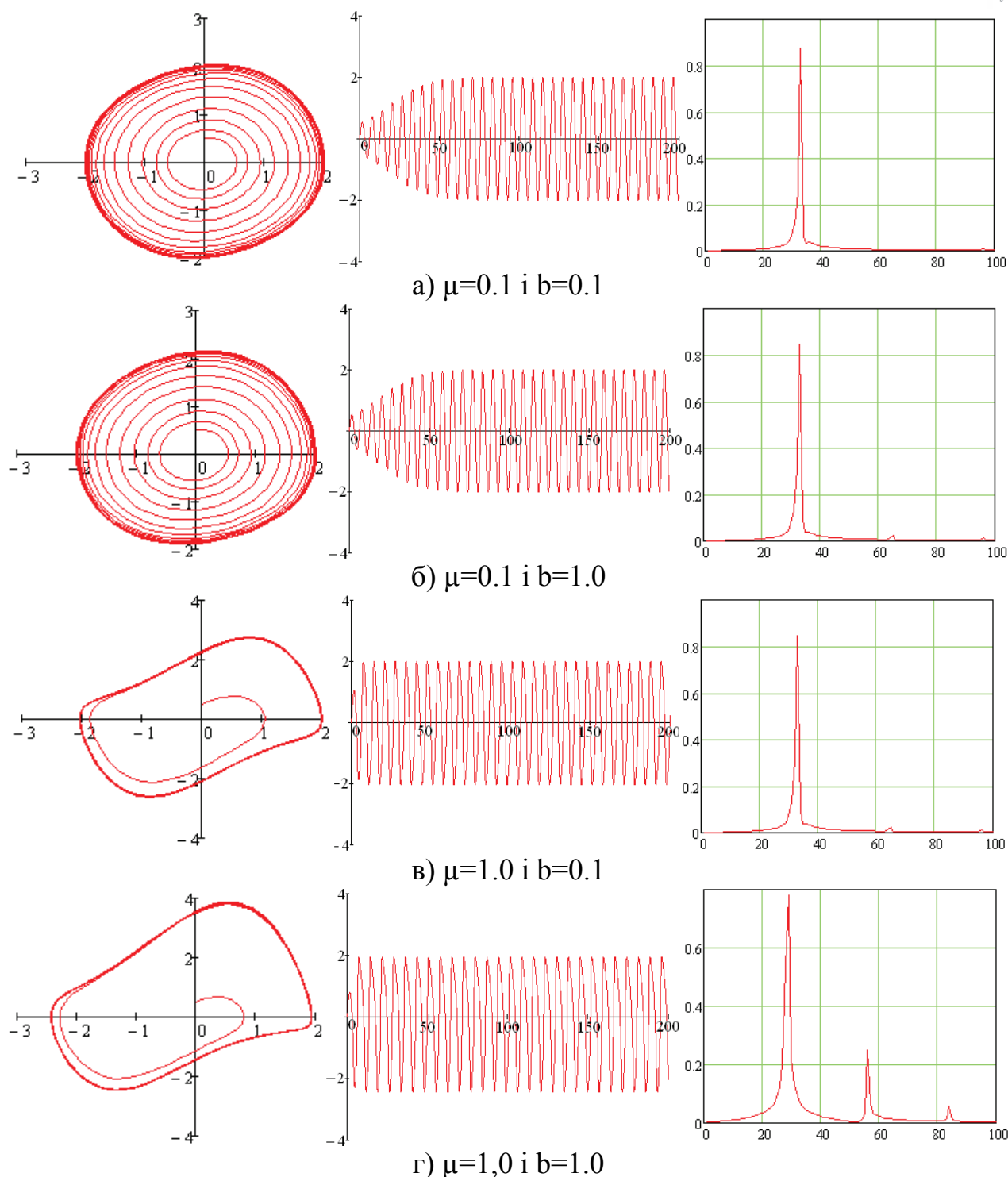
Отримані рівняння (6)-(7) покладені в основу процесу оптимізації осциляторного режиму роботи таких генераторів.



**Рис. 2. Результати модельного дослідження генераторів при  $g = 0,01$  і різних значеннях параметрів автоколивальної системи (4)**



**Рис. 3. Результати модельного дослідження генераторів при  $g = 0,1$  і різних значеннях параметрів автоколивальної системи (4)**



**Рис. 4. Результати модельного дослідження генераторів при  $g = 1,0$  і різних значеннях параметрів автоколивальної системи (4)**

#### **Заключення та висновки.**

У роботі розглянуті теоретичні засади для процесу оптимізації побудови електрично керованих генераторів на основі транзисторних схем і структур з від'ємним опором. Наведено модифіковану математичну модель ван дер Поля. У результаті математичного моделювання отримано фазові портрети, часові діаграми та амплітудо-частотні спектри генерованої напруги. Наведені рівняння, які призначені для оптимізації параметрів осциляторного режиму



роботи генераторів, що полягає у зменшенні часу установлення стаціонарних коливань при досягненні заданої їхньої форми.

Література:

1. Дьяконов В. П. Генерация и генераторы сигналов / В. П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс, 2009. – 384 с.
2. Осадчук В. С. Генератори електричних коливань на основі транзисторних структур з від'ємним опором. Монографія / Осадчук В.С., Осадчук О.В., Семенов А.О. - Вінниця: ВНТУ, 2009. – 184 с.
3. Каганов В. И. Радиотехника + компьютер + MathCad / В. И. Каганов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 416 с.
4. Andriy Semenov. The Van der Pol's Mathematical Model of the Voltage-Controlled Oscillator Based on a Transistor Structure With Negative Resistance / Andriy Semenov // Proceedings of the XIII International Conference “Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science”, Lviv-Slavsko, Ukraine, February 23 – 26, 2016. – pp. 100-104. DOI: [10.1109/TCSET.2016.7451982](https://doi.org/10.1109/TCSET.2016.7451982)
5. Rybin Yu.K. Measuring Signal Generators / Yu. K. Rybin. – Springer: Dordrecht, Heidelberg, London, New York, 2014. – 488 p.

**References:**

1. D'yakonov V. P. (2009). Generatsiya i generatory signalov [Generation and signal oscillators], Moscow: DMK Press, 384 p.
2. Osadchuk V.S., Osadchuk O.V. and Semenov A.O. (2009). Heneratory elektrychnykh kolyvan na osnovi tranzystornykh struktur z vid'iemnym oporom [Generators of electric oscillations based on a transistor structures with negative resistance] Vinnytsia: VNTU, 184 p.
3. Kaganov V. I. (2001). Radiotekhnika + komp'yuter + MathCad [Radio engineering + computer + MathCad], Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 416 p.
4. Andriy Semenov (2016). The Van der Pol's Mathematical Model of the Voltage-Controlled Oscillator Based on a Transistor Structure With Negative Resistance // Proceedings of the XIII International Conference “Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science”, Lviv-Slavsko, Ukraine, February 23 – 26, 2016. – pp. 100-104. DOI: [10.1109/TCSET.2016.7451982](https://doi.org/10.1109/TCSET.2016.7451982)
5. Rybin Yu.K. (2014). Measuring Signal Generators, Springer: Dordrecht, Heidelberg, London, New York, 488 p.

**Abstract.** *The paper considers theoretical background to optimize constructing the oscillators of electric oscillation based on transistor circuits and structures with negative resistance. The modified Van der Pol mathematical model for describing dynamical processes of the oscillator operation in oscillation and relaxation modes is presented. Phase portraits of the oscillators are obtained as well as and time and frequency characteristics of the generated voltage. The main contradictions taking place in the oscillator self-oscillatory system are analyzed. Approaches to optimize constructing the electrically-controlled oscillators based on transistor structures with negative resistance are adduced.*

**Key words:** *oscillator, mathematical model, Van der Pol, phase portrait, optimization.*

Статья отправлена: 26.06.2018 г.

© Семенов А.О.