

УДК 621.373.5

А. О. Семенов, к. т. н.

КВАЗІЛІНІЙНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ГЕНЕРАТОРІВ НА ОСНОВІ ТРАНЗИСТОРНИХ СТРУКТУР З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ

У статті запропоновано квазілінійну модель генератора синусоїдальних коливань з фіксованою частотою, активним елементом якого є транзисторна структура з від'ємним опором. За допомогою методу фазової площини отримано аналітичні співвідношення амплітуди й частоти стаціонарних коливань, а також дисперсійні значення флуктуацій амплітуди й фази генерованого сигналу в реальному часі. Отримані співвідношення є простими й наочними та можуть бути використані для інженерного розрахунку таких генераторів на етапі проектування.

Ключові слова: генератор, транзисторна структура, від'ємний опір, квазілінійна модель, флуктуації амплітуди й фази.

1. Вступ

Останнім часом для побудови генераторів електричних коливань широко використовують транзисторні структури з від'ємним опором (ТСВО) для компенсації втрат енергії в пасивних колах настроювання та коливній системі генератора [1, 2]. Розроблено підходи до дослідження базових схем генераторів електричних коливань (ГЕК) на основі ТСВО, за допомогою яких отримано рівняння основних параметрів генераторів, умов самозбудження й стійкості тощо [3, 4]. Проте в багатьох випадках практичного застосування необхідно дослідити питання стійкості розроблених ГЕК на основі ТСВО, однією з задач якого є дослідження флуктуацій амплітуди й фази стаціонарних генерованих коливань.

Метою роботи є розробка квазілінійної моделі ГЕК на основі ТСВО, зручної для отримання аналітичних співвідношень відносних флуктуацій амплітуди й фази стаціонарних генерованих коливань.

2. Квазілінійна математична модель ГЕК на основі ТСВО

Більшість практичних схем ГЕК на основі ТСВО під час роботи на фіксованій частоті генерації квазігармонічних коливань можна представити у вигляді паралельного резонансного контура першого роду [5].

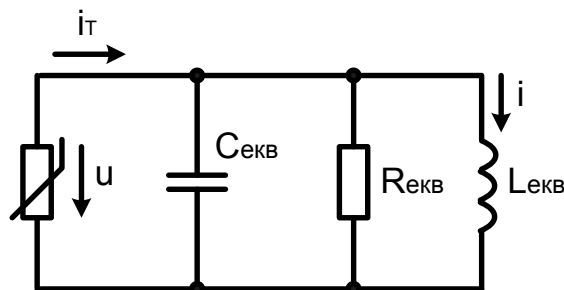


Рис. 1. Еквівалентна схема ГЕК на основі ТСВО з квазігармонічним генерованим сигналом

На рис. 1 прийняті такі позначення: $i_T(u)$ – кероване джерело струму, яке являє собою залежність струму крізь ТСВО від напруги й визначається режимом живлення генератора; $C_{екв}$, $L_{екв}$ і $R_{екв}$ – відповідно еквівалентні ємність, індуктивність і опір активних втрат вибіркової системи генератора. Еквівалентна ємність коливального контуру

$$C_{екв} = C(u) + C_H + C_{мон}, \quad (1)$$

де $C(u)$ – еквівалентна ємність, величина якої визначається реактивною складовою повного опору ТСВО; C_H – ємність елементів настройки й навантаження генератора, перерахована до коливального контуру; $C_{мон}$ – ємність монтажу.

Рівняння, яке описує залежність еквівалентної ємності реактивної складової повного опору ТСВО, можна представити у вигляді степеневого ряду [6]

$$C(u) = C_0 + \sum_{k=1}^{\infty} C_k u^k, \quad (2)$$

де C_0 – еквівалентна ємність, яка визначається режимом живлення ТСВО.

Для якісного аналізу фізичних процесів, що протікають у ГЕК на основі ТСВО, достатньо обмежитися першими двома членами ряду (2)

$$C(u) = C_0 + C_1 u + C_2 u^2. \quad (3)$$

Під час роботи ГЕК на основі ТСВО на фіксованій частоті з квазігармонічним генерованим сигналом коефіцієнти C_1 і C_2 степеневого ряду (3) порівняно малі [6], а тому при малій амплітуді генерованих коливань

$$C(u) \approx C_0. \quad (4)$$

Еквівалентна індуктивність коливального контуру

$$L_{екв} = L_k + L_{нар}, \quad (5)$$

де L_k – індуктивність котушки, $L_{нар}$ – перерахована до коливального контуру паразитна індуктивність виводів транзисторів активного елемента генератора.

Еквівалентний активний опір коливального контура генератора

$$R_{екв} = \frac{R_n \cdot R_{втр}}{R_n + R_{втр}}, \quad (6)$$

де R_n – опір навантаження, $R_{втр}$ – опір активних втрат у коливальній системі й колах настроювання генератора.

На основі відомої апроксимації статичної ВАХ приладу з ВО [7], з урахуванням особливостей статичних ВАХ ТСВО Λ -типу автором у [8] запропонована апроксимація

$$i_T(u) = I_S - g(u - U_S) + h(u - U_S)^3, \quad (7)$$

де U_S, I_S – координати середини спадаючої ділянки вольт-амперної характеристики ТСВО (ділянки від'ємного опору); g, h – коефіцієнти апроксимації, які визначають з експериментальних даних.

Розкривши дужки й звівши подібні у співвідношенні (7), отримаємо рівняння апроксимації статичної ВАХ ТСВО поліномом третього степеня [8]

$$i_T(u) = (I_S + gU_S - hU_S^3) - (g - 3hU_S^2)u - 3hU_S u^2 + hu^3. \quad (8)$$

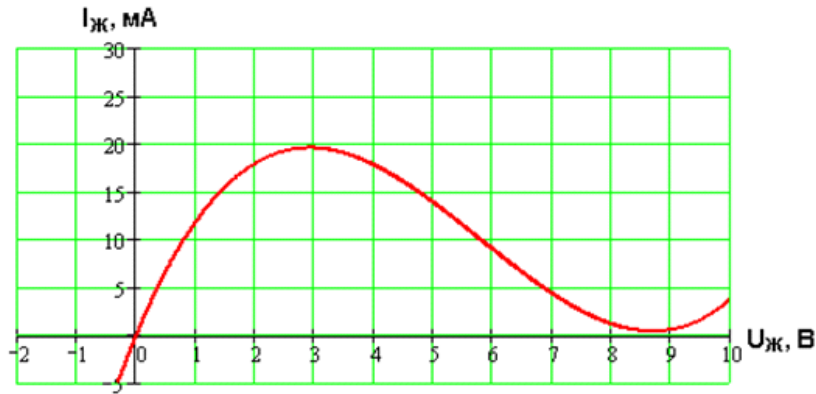


Рис. 2. Графік апроксимованої статичної ВАХ ТСВО рівнянням (8)

На рис. 2 представлено графік апроксимованої статичної ВАХ ТСВО, побудований автором за допомогою рівняння (8) у MathCad 11.0. Величину спадаючої ділянки статичної ВАХ можна отримати, дослідивши функцію (8) на екстремуми. Координати початку й кінця ділянки від'ємного опору визначаються з умови

$$\frac{di_T(u)}{du} = -g + 3h(u - U_S)^2 = 0, \quad (9)$$

звідки

$$U_{max} = U_S - \sqrt{\frac{g}{3h}}, \quad (10)$$

$$U_{min} = U_S + \sqrt{\frac{g}{3h}}, \quad (11)$$

а величина максимального і мінімального струмів ділянки від'ємного опору

$$I_{max} = I_S + g\sqrt{\frac{g}{3h}} - h\left(\sqrt{\frac{g}{3h}}\right)^3, \quad (12)$$

$$I_{min} = I_S - g\sqrt{\frac{g}{3h}} + h\left(\sqrt{\frac{g}{3h}}\right)^3. \quad (13)$$

Величини I_S , U_S , g , і h рівняння апроксимації (8) спадаючої ділянки ВАХ ТСВО можна визначити з системи лінійних алгебраїчних рівнянь (10) – (13) за експериментально отриманими точками початку (U_{max} , I_{max}) і кінця (U_{min} , I_{min}) ділянки від'ємного опору.

Лінійну модель ГЕК на основі ТСВО побудуємо на основі фізичних параметрів еквівалентної схеми з рис. 1. З урахуванням обраних напрямків струмів на рис. 1 можна записати систему диференціальних рівнянь

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = \frac{u}{L_{екв}}, \\ \frac{du}{dt} = \frac{1}{C_{екв}} \left(i_T - \frac{u}{R_{екв}} - i \right). \end{cases} \quad (14)$$

Скористаємось загальноприйнятими співвідношеннями хвильового опору й добротності коливального контура

$$\rho = \omega_0 L_{екв} = \frac{I}{\omega_0 C_{екв}} = \sqrt{\frac{L_{екв}}{C_{екв}}}, \quad (15)$$

$$Q = \frac{\rho}{R_{екв}} = \frac{I}{\omega_0 C_{екв} R_{екв}}. \quad (16)$$

Система рівнянь (14) у нормованому часі

$$t_H = \omega_0 t, \quad (17)$$

де $\omega_0 = \frac{I}{\sqrt{L_{екв} C_{екв}}}$ – резонансна частота коливального контуру, матиме вигляд

$$\begin{cases} \frac{d\rho i}{dt_H} = u, \\ \frac{du}{dt_H} = -\rho i + \left[-\frac{u}{Q} + \rho i_T \right]. \end{cases} \quad (18)$$

Враховуючи, що еквівалентна добротність коливальної системи ГЕК на ТСВО значно більша за одиницю [1]

$$Q \gg 1 \quad (19)$$

і струм, який протікає крізь ТСВО, у Q разів менший за струм індуктивності, система диференціальних рівнянь (18) набуде вигляду [9]

$$\begin{cases} \frac{d\rho i}{dt_H} = u, \\ \frac{du}{dt_H} = -\rho i + \mu F, \end{cases} \quad (20)$$

де

$$\mu F = -\frac{1}{Q} u + \rho i_T. \quad (21)$$

Складова (2.41) представляє собою малий параметр зовнішньої дії на коливальний контур, що враховує нелінійні властивості генератора. Приймаючи малий параметр $\mu = 0$, що відповідає гармонічному генерованому сигналу, розв'яжемо методом фазової площини систему диференціальних рівнянь, яка близька до лінійної консервативної

$$\begin{cases} \frac{d\rho i}{dt_H} = u, \\ \frac{du}{dt_H} = -\rho i. \end{cases} \quad (22)$$

Фазовий портрет, що відповідає системі (22), у координатах ρi та u являє собою сімейство концентричних кіл з радіусом U_m , що визначається енергією, яка накопичена в коливальній системі [9]. Рішенням системи (22) є рівняння [9]

$$u = U_m \cos(t_H + \varphi) = U_m \cos \psi, \quad (23)$$

$$\rho i = -\frac{du}{dt_H} = U_m \sin(t_H + \varphi) = U_m \sin \psi. \quad (24)$$

Знайдемо закон встановлення амплітуди U_m і фази φ рівнянь (23) – (24) під дією малих сил μF . З другого рівняння системи (20) випливає

$$du = -\rho idt_H + \mu F dt_H. \quad (25)$$

Елементарні прирости амплітуди dU_m і фази $d\varphi$ описують співвідношеннями

$$dU_m = d_\mu u \cos \psi, \quad (26)$$

$$d\varphi = -\frac{d_\mu u}{U_m} \sin \psi. \quad (27)$$

Диференціальні рівняння встановлення миттєвих значень амплітуди й фази рівнянь (23) і (24) мають вигляд [9]

$$\frac{dU_m}{dt_H} = \left(-\frac{u}{Q} + \rho i_T \right) \cos \psi, \quad (28)$$

$$\frac{d\varphi}{dt_H} = -\frac{1}{U_m} \left(-\frac{u}{Q} + \rho i_T \right) \sin \psi. \quad (29)$$

Подальший аналіз процесів встановлення коливань у ГЕК на ТСВО проведемо, представивши струм ТСВО у вигляді складної дії, що містить детерміновану й випадкову складові [9]

$$i_T = i_D + i_B, \quad (30)$$

де i_D – детермінована складова струму ТСВО, i_B – випадкова складова струму ТСВО.

Для визначення встановленого режиму автоколивань за відсутності флуктуацій обмежуються аналізом скорочених рівнянь встановлення амплітуди й фази, які отримують шляхом усереднення рівнянь (23) і (24) за період. При цьому вважається, що величини амплітуди й фази, встановлених коливань, протягом періоду є постійними [9].

$$\frac{dU_m}{dt_H} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left[-\frac{U_m}{Q} \cos \psi + \rho i_T \right] \cos \psi d\psi = -\frac{U_m}{2Q} + \frac{\rho}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_T \cos \psi d\psi, \quad (31)$$

$$\frac{d\varphi}{dt_H} = -\frac{1}{2\pi U_m} \int_0^{2\pi} \left[-\frac{U_m}{Q} \cos \psi + \rho i_T \right] \sin \psi d\psi = -\frac{\rho}{2\pi U_m} \int_0^{2\pi} i_T \sin \psi d\psi. \quad (32)$$

Вводячи косинусоїдальну (I_{IC}) і синусоїдальну (I_{IS}) складові першої гармоніки розкладу струму ТСВО $i_T(U_m \cos \psi)$ у ряд Фур'є, рівняння (31) і (32) можна представити у вигляді

$$\frac{dU_m}{dt_H} = -\frac{1}{2} \frac{U_m}{Q} + \frac{1}{2} \rho I_{IC}, \quad (33)$$

$$\frac{d\varphi}{dt_H} = -\frac{1}{2} \frac{\rho I_{IS}}{U_m}. \quad (34)$$

З рівнянь (33) – (34) випливає, що втрати в коливальній системі ГЕК на основі ТСВО впливають лише на амплітудні співвідношення. Проінтегрувавши рівняння (33), визначимо зменшення амплітуди коливань, зумовлене опором втрат $R_{екв}$ за період

$$\Delta_R U_m = -\frac{\pi}{Q} U_m. \quad (35)$$

Подальше дослідження встановлених коливань ГЕК на основі ТСВО проведемо для м'якого режиму. М'який режим самозбудження ГЕК виникає, коли робоча точка розташована на спадаючій ділянці статичної ВАХ у області найбільшої крутизни. Використовуючи запропоновану апроксимацію кубічним поліномом (8), ми отримали рівняння залежності амплітуди першої гармоніки струму ТСВО від амплітуди напруги на контурі

$$I_{m1} = -(g - 3hU_S^2)U_m + \frac{3}{4}hU_m^3. \quad (36)$$

Враховуючи залежність інерційних властивостей ТСВО від частоти, перша гармоніка струму ТСВО зсунута на кут φ_β відносно напруги на контурі

$$i_D = I_{m1} \cos(\psi - \varphi_\beta). \quad (37)$$

З урахуванням (37), ми отримали рівняння косинусоїдальної і синусоїдальної складових струму першої гармоніки ТСВО, які мають вигляд

$$I_{IC} = \left[-(g - 3hU_S^2)U_m + \frac{3}{4}hU_m^3 \right] \cos \varphi_\beta, \quad (38)$$

$$I_{IS} = \left[-(g - 3hU_S^2)U_m + \frac{3}{4}hU_m^3 \right] \sin \varphi_\beta. \quad (39)$$

Підставивши (38) і (39) відповідно в (33) і (34), ми отримали скорочені рівняння встановлення амплітуди й фази генерованих коливань ГЕК на основі ТСВО, які мають вигляд

$$2 \frac{dU_m}{dt_H} = -U_m \left[\frac{4}{3h\rho Q \cos \varphi_\beta} + \frac{4}{3} \frac{g - 3hU_S^2}{h} - U_m^2 \right] \frac{3}{4} h \cos \varphi_\beta, \quad (40)$$

$$2 \frac{d\varphi}{dt_H} = \rho \left[g - 3hU_S^2 - \frac{3}{4}hU_m^2 \right] \sin \varphi_\beta. \quad (41)$$

Відповідно рівняння (40) ми отримали умову м'якого режиму самозбудження ГЕК на основі ТСВО

$$(g - 3hU_m^2) > \frac{I}{Q\rho \cos \varphi_\beta}. \quad (42)$$

Рівняння стаціонарної амплітуди коливань, яке ми отримали, має вигляд

$$U_{CT} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{g - 3hU_S^2}{h} + \frac{I}{hQ\rho \cos \varphi_\beta}}. \quad (43)$$

Нормована частота стаціонарних коливань у нормованому часі t_H визначається шляхом підстановки (43) в (41) з урахуванням (23) – (24) [9]

$$\omega_{0H} = 1 + \frac{d\varphi}{dt_H} = 1 - \frac{I}{2Q} \operatorname{tg} \varphi_\beta. \quad (44)$$

Частота генерованих стаціонарних коливань у реальному часі визначається з (44) з урахуванням (17)

$$\omega_{CT} = \omega_0 \left(1 - \frac{I}{2Q} \operatorname{tg} \varphi_\beta \right). \quad (45)$$

3. Визначення флуктуацій амплітуди і фази стаціонарних генерованих коливань ГЕК на основі ТСВО

Для м'якого режиму самозбудження ГЕК на основі ТСВО представимо рішення системи диференціальних рівнянь (22) з урахуванням флуктуацій амплітуди і фази у вигляді [9]

$$u(t) = U_{CT} [1 + \tilde{u}(t)] \sin[t_H + \tilde{\varphi}(t)], \quad (46)$$

де $\tilde{u}(t)$ – відносні амплітудні флуктуації, $\tilde{\varphi}(t)$ – флуктуації фази відносно початкового значення.

У рівнянні (46) для спрощення математичних викладок покладено, що фазовий зсув між напругою на контурі й першою гармонікою струму ТСВО дорівнює нулю $\varphi_\beta = 0$, що припустимо для багатьох схем ГЕК на приладах з Λ -характеристикою. Якщо $\varphi_\beta \neq 0$, тоді під час переходу до нормованого часу системи (17) слід використовувати співвідношення [9]

$$t_H = \omega_0 \left[1 + \frac{d\varphi}{dt} \right] t. \quad (47)$$

Експериментальні дослідження ГЕК на ТСВО показали, що в стаціонарному режимі флуктуації амплітуди й фази генерованих коливань за період є порівняно малими [2]. Тому для відносних флуктуацій амплітуди й фази виконуються співвідношення

$$|\tilde{u}(t)| \ll 1, \quad (48)$$

$$|\tilde{\varphi}(t)| \ll 1. \quad (49)$$

З урахуванням співвідношень (48) – (49) скорочені диференціальні рівняння відносних флуктуацій амплітуди й фази

$$\frac{d\tilde{u}}{dt_H} = -b_0 \tilde{u} + \eta_{\tilde{u}}(t), \quad (50)$$

$$\frac{d\tilde{\varphi}}{dt_H} = q_0 - q_1 \tilde{u} + \eta_{\tilde{\varphi}}(t), \quad (51)$$

де q_0 – постійна поправка до частоти, якою можна знехтувати ($q_0 = 0$), q_1 – коефіцієнт, що враховує вплив флуктуацій амплітуди генерованих коливань на частоту, вважаючи ГЕК на ТСВО з гармонічним генерованим сигналом квазіізохорними, можна прийняти $q_1 = 0$; b_0 – коефіцієнт, що враховує ступінь стійкості граничного циклу фазового портрету ГЕК на основі ТСВО; $\eta_{\tilde{u}}(t)$ і $\eta_{\tilde{\varphi}}(t)$ – нормальні стаціонарні випадкові процеси з нульовими середніми, рівняння яких у загальному вигляді [9]

$$\eta_{\tilde{u}}(t) = -\frac{I}{2\pi U_{CT}} \int_{t_H}^{t_H+2\pi} i_B \cos t_H dt_H, \quad (52)$$

$$\eta_{\tilde{\varphi}}(t) = -\frac{I}{2\pi U_{CT}} \int_{t_H}^{t_H+2\pi} i_B \sin t_H dt_H, \quad (53)$$

$$\langle \eta_{\tilde{u}}(t) \rangle = \langle \eta_{\tilde{\varphi}}(t) \rangle = 0. \quad (54)$$

Функції автокореляції стаціонарних випадкових процесів $\eta_{\bar{u}}(t)$ і $\eta_{\bar{\varphi}}(t)$

$$K_{\eta_{\bar{u}}}(\theta) = K_{\eta_{\bar{\varphi}}}(\theta) = \frac{1}{2\pi U_{CT}^2} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{\zeta}(1 + \Omega) \cos \Omega \theta d\Omega, \quad (55)$$

де S_{ζ} – енергетичний спектр випадкової складової струму ТСВО, $\Omega = \frac{\Delta\omega}{2}$ – половина ширини смуги пропускання коливальної системи генератора.

Вважаючи, що флуктуаційний струм $i_B(t)$ в смугі пропускання контура має рівномірний енергетичний спектр [9]

$$S_i(\omega) = S_i(\omega_0) \text{ при } |\omega - \omega_0| < \Omega, \quad (56)$$

енергетичні спектри амплітудних і фазових флуктуацій в межах смуги пропускання коливального контура [9]

$$S_{\eta_{\bar{u}}}(\Omega) = S_{\eta_{\bar{\varphi}}}(\Omega) = \frac{S_i(\omega_0)}{2U_{CT}^2}. \quad (57)$$

Ми отримали коефіцієнт ступеня стійкості граничного циклу на основі співвідношення

$$\begin{aligned} b_0 &= \frac{1}{U_{CT}} \frac{d}{du} \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(-\frac{1}{Q} u \cos t_H + \rho i_T \right) \sin t_H dt_H \right]_u = \\ &= \frac{1}{U_{CT}} \frac{d}{du} \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(-\frac{1}{Q} u \cos t_H + \rho \left(I_S - g(u - U_S) + h(u - U_S)^3 \right) \right) \sin t_H dt_H \right]_u \approx \\ &\approx 3hU_S^2 - g. \end{aligned} \quad (58)$$

Розв'язуючи скорочені рівняння (52) – (53) з урахуванням (57), ми визначили дисперсійні значення флуктуацій амплітуди й фази генерованого сигналу в реальному часі

$$\sigma_{\bar{u}}^2 = \frac{1}{4} \frac{S(\omega_0) \cdot \omega_0^2}{U_{CT}^2 (3hU_{CT}^2 - g)}, \quad (59)$$

$$\sigma_{\bar{\varphi}}^2 = \frac{1}{2} \frac{S(\omega_0) \cdot \omega_0^2}{U_{CT}^2} t. \quad (60)$$

Отримані співвідношення (59) і (60) визначення флуктуацій амплітуди й фази стаціонарних коливань ГЕК на основі ТСВО містять параметри статичної ВАХ активного елемента генератора й рівняння енергетичного спектра флуктуаційного струму в межах струму пропускання коливального контура генератора.

Ідеалізація розробленої квазілінійної моделі полягає в прийнятому постійному значенні ємнісної складової повного опору ТСВО (співвідношення (4)). Нелінійні властивості електрично керованої ємності впливають лише на фазові співвідношення генератора. Рівняння флуктуації фази генерованих коливань ГЕК, еквівалентна схема якого представлена на рис. 1, з урахуванням (2), має вигляд

$$\frac{d\varphi}{dt} = -\frac{\omega_0}{C_0} \left[C_1 e_{u_1}(t) + C_2 \left(\frac{3}{4} u^2(t) + 3e_{u_2}^2(t) \right) + C_3 e_{u_3}(t) \left(3u^2(t) + 4e_{u_4}^2(t) \right) + \dots \right], \quad (61)$$

де $e_{u_i}(t)$ – еквівалентне джерело шумової напруги, що враховує внутрішні і зовнішні шуми генератора. На підставі рівняння (61) в роботі [6] теоретично обґрунтовано, що 1) Наукові праці ВНТУ, 2009, № 4

нелінійність ємності першого порядку (перша складова C_1) робить внесок в перетворення низькочастотного шуму $e_{in}(t)$ в шум бічної смуги поблизу носійної ω_0 ; 2) нелінійність другого порядку (складова C_2) генерує фазовий шум, внаслідок перетворення амплітуда-фаза й шумових властивостей активного елемента генератора; 3) нелінійності третього й старших порядків викликають більш складну поведінку шуму генератора, що зумовлено інтермодуляційними спотвореннями й перетвореннями амплітуда-фаза.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Осадчук В. С. Напівпровідникові прилади з від'ємним опором. Навчальний посібник / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця: ВНТУ, 2006. – 162 с.
2. Осадчук О. В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором. Монографія / О. В. Осадчук. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000. – 303 с.
3. Негоденко О. Н. Генераторы с электромеханическими преобразователями на транзисторных аналогах негетронов / Негоденко О. Н., Воронин В. А., Заруба Д. В. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2002. – № 2. – С.5 – 8.
4. Негоденко О. Н. Схемотехника, моделирование и применение транзисторных устройств с отрицательным сопротивлением / Негоденко О. Н., Румянцев К. Е., Зинченко Л. А., Липко С. И. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2002. – 214 с.
5. Дворников В. А. Автогенераторы в радиотехнике / В. А. Дворников, Г. М. Уткин. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.
6. Andrey Grebennikov. Transistor LC oscillators for wireless application: Theory and design aspects, Part II / Andrey Grebennikov // Microwave journal. – November, 2005. – P. 60 – 82.
7. Мартынов Б. А. Теория колебаний. Математические модели динамических систем: Учеб. пособие / Б. А. Мартынов. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002. – 56 с.
8. Семенов А. О. Узагальнене диференційне рівняння ГЕК на основі ТСВО / А. О. Семенов // Матеріали другої Міжнародної науково-технічної конференції “Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування” (СПРТП-2007). – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця. – 2007. – С.77 – 78.
9. Самойло К. А. Метод анализа колебательных систем второго порядка / К. А. Самойло. – М.: Сов. радио, 1976. – 208 с.

Семенов Андрій Олександрович – к. т. н., старший викладач кафедри радіотехніки, e-mail: Semenov79@ukr.net, роб. тел. (0432) 598-481.

Вінницький національний технічний університет.