

**ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Факультет радіотехніки, зв'язку та приладобудування**

**Кафедра радіотехніки**

# **Дослідження впливу нелінійних властивостей ТСВО на форму і потужність генерованих коливань**

Дипломна робота

на здобуття кваліфікації радіоінженера

за спеціальністю 7.05090101 – радіотехніка

Виконав - **Зубарев Олександр Васильович**

студент групи РТр-14сп

Керівник дипломної роботи – **Семенов Андрій Олександрович,**

**кандидат технічних наук, доц. каф. РТ**

**Вінниця - 2015**

**Метою дипломної роботи** є розробка математичних моделей генераторів електричних коливань на основі транзисторних структур з від'ємним опором з підвищеним коефіцієнтом корисної дії, стабільністю та розширеним діапазоном перебудови частоти.

**Об'єктом дослідження** є процес перетворення енергії джерел постійної напруги в енергію електричних коливань в генераторних пристроях на основі транзисторних структур з від'ємним опором з електричною перебудовою частоти генерації.

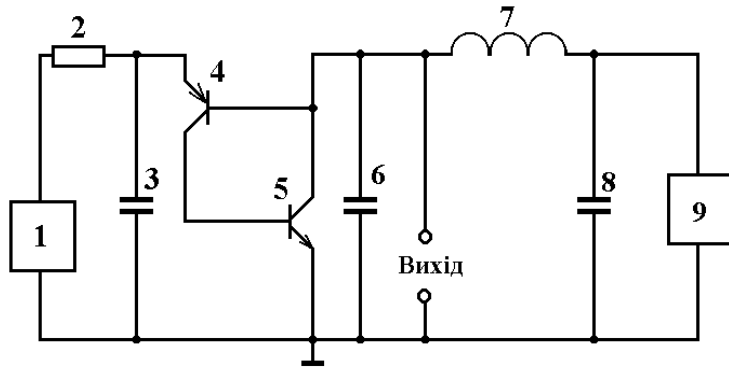
**Предметом дослідження** є статичні і динамічні характеристики активних елементів генераторів електричних коливань на основі транзисторних структур з від'ємним опором з електричною перебудовою частоти генерації.

#### **Задачі дослідження:**

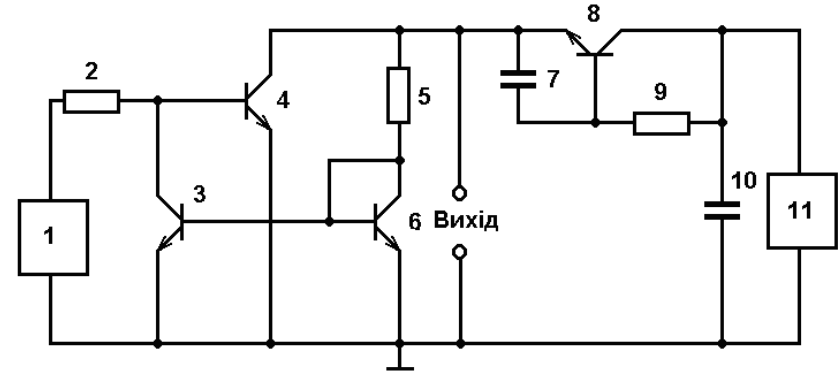
- Розробити квазілінійні математичні моделі генераторів на основі транзисторних структур з від'ємним опором.
- Отримати рівняння, які апроксимують статичні ВАХ активних елементів генераторів на основі транзисторних структур з від'ємним опором з врахуванням фізичних процесів, які в них протікають, що дасть змогу обрати оптимальні режими їх електричного живлення для підвищення ККД.
- На основі методу фазової площини провести дослідження стійкості роботи розроблених схем генераторів, визначити амплітуду і частоту стаціонарних коливань.
- На основі квазілінійної моделі генератора визначити флуктуації амплітуди і фази генерованих коливань, що дасть змогу оцінити короткотривалу нестабільність генератора.
- На основі асимптотичного методу малого параметру розробити математичну нелінійну модель генератора на основі транзисторної структури з від'ємним опором, визначити режими збудження, амплітуду і частоту стаціонарних коливань.
- Визначити нелінійні спотворення форми і нелінійне відхилення частоти генерованих коливань.

**Апробація результатів роботи.** За результатами теоретичних та експериментальних досліджень автором опубліковано **4 праці** з яких: **1** у фаховому виданні з переліку **ВАК України**, **1** у закордонному виданні з індексуванням у **Scopus**, **2** тези конференції.

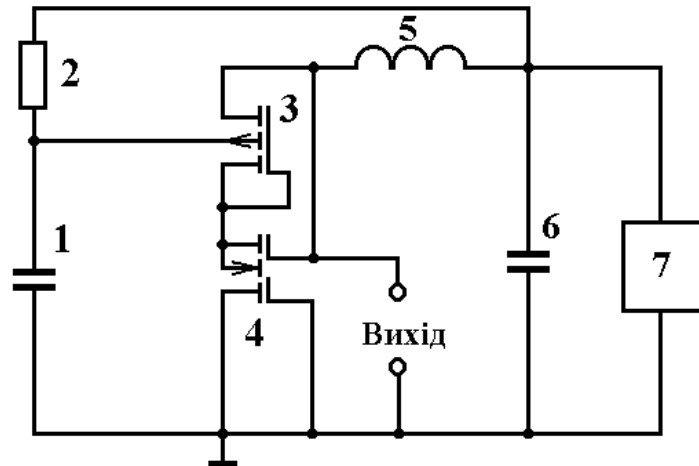
**Патент на корисну модель 7411,  
МКИ Н03В7/00. Генератор з  
електричним регулюванням  
частоти генерації**



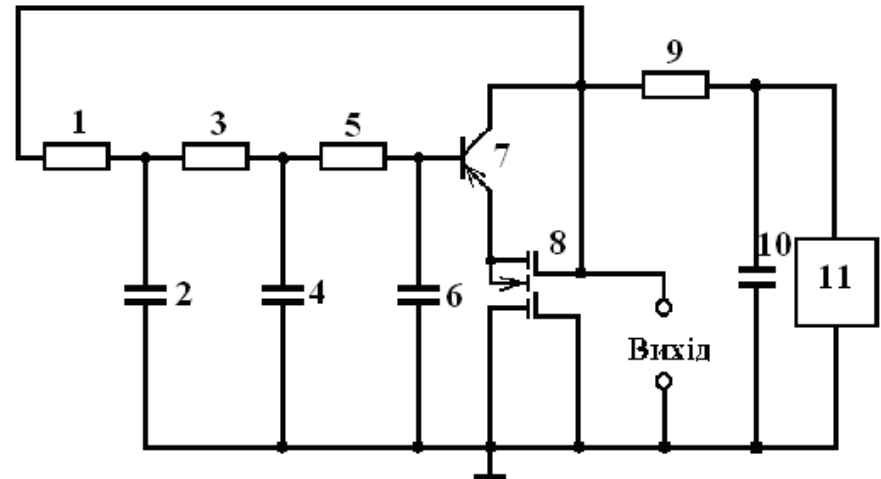
**Патент на корисну модель 16590,  
МКИ Н03В7/00. Стабільний діапазонний  
генератор гармонічних коливань**



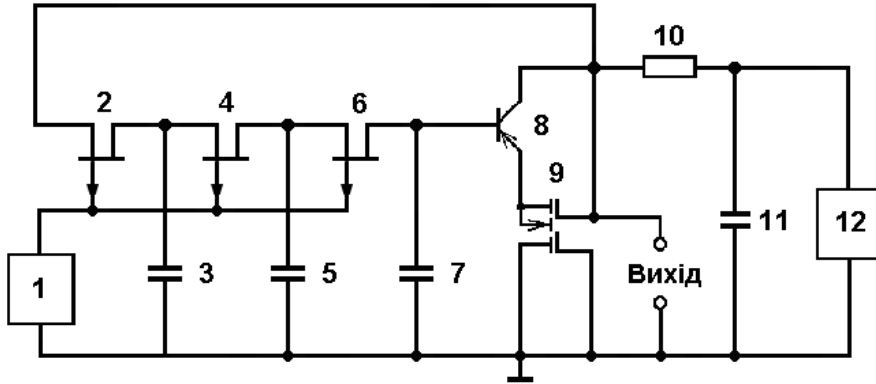
**Патент на корисну модель 7911,  
МКИ Н03В7/00.  
Генератор електричних коливань**



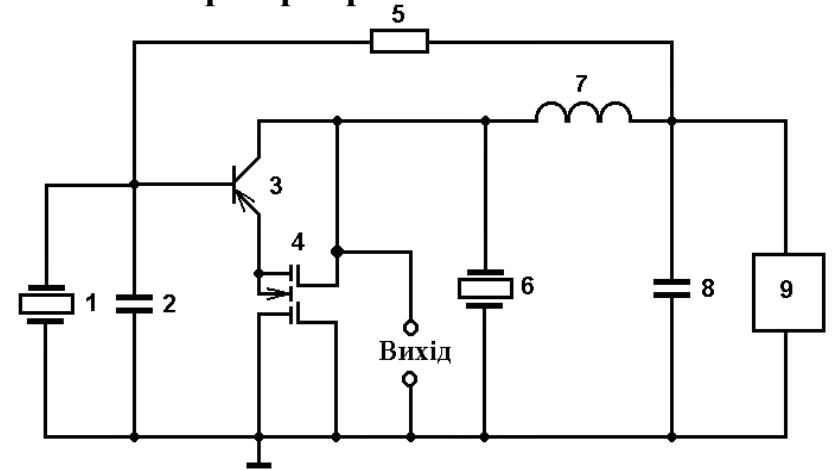
**Патент на корисну модель 9202,  
МКИ Н03В7/00. Мікроелектронний  
генератор електричних коливань**



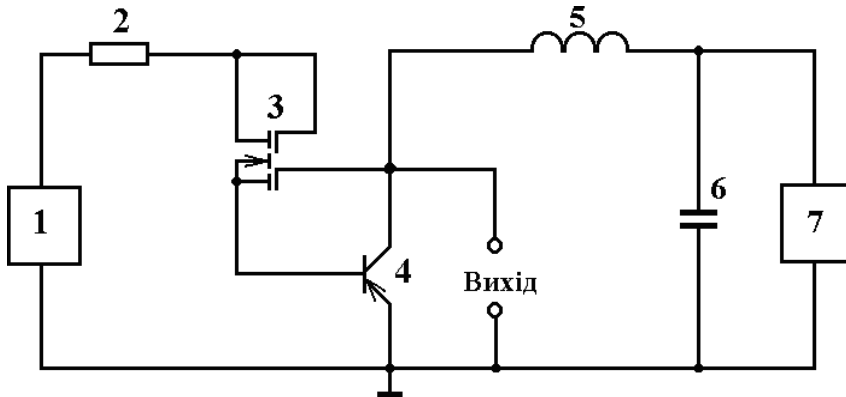
**Патент на корисну модель 16587,  
МКИ Н03В7/00.  
Електрично керований генератор**



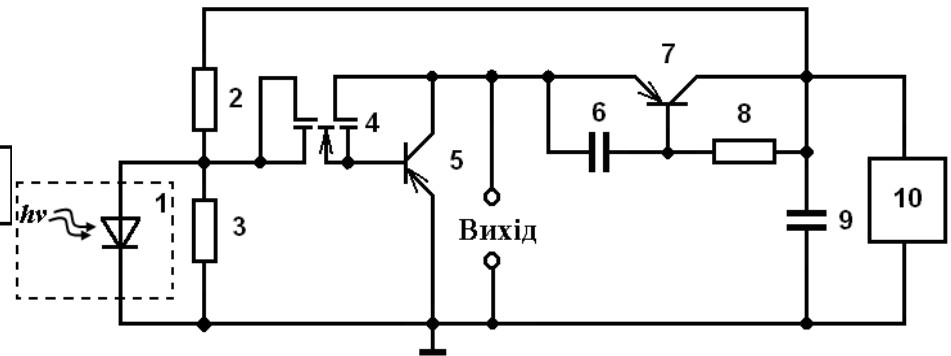
**Патент на корисну модель 14410,  
МКИ Н03В7/00. Різницецький  
генератор гармонічних коливань**



**Патент на корисну модель 9209,  
МКИ Н03В7/00.  
Генератор електричних коливань**



**Патент на корисну модель 10400,  
МКИ Н 03 С 3/36. Оптично керований  
генератор електричних коливань**



## Квазілінійна модель ГЕК на основі ТСВО

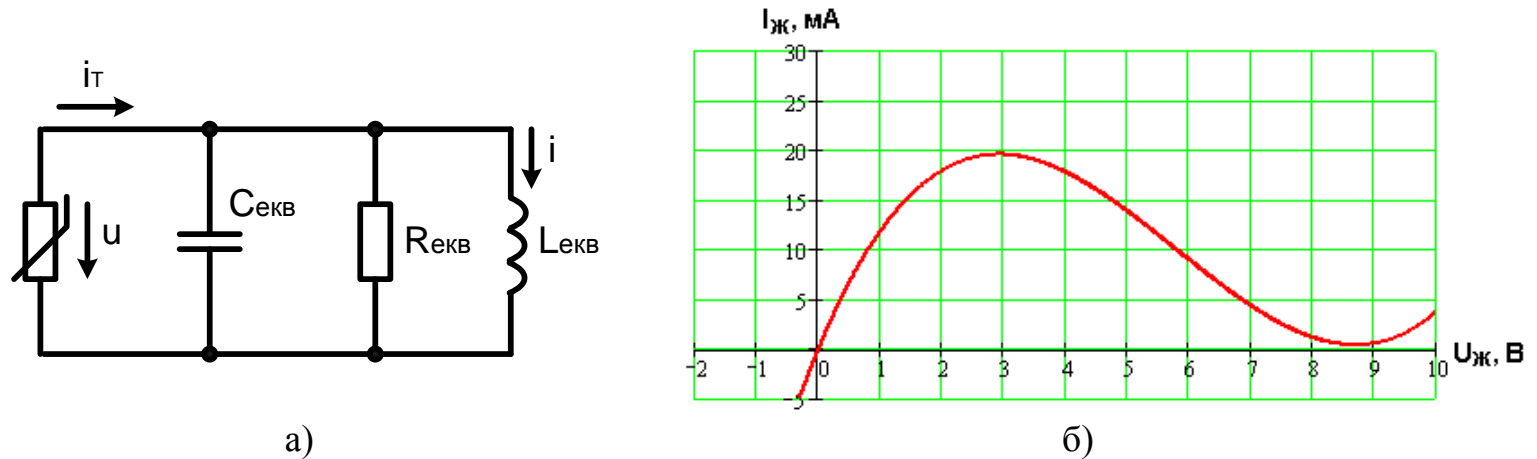


Рис.1. Еквівалентна схема ГЕК на основі ТСВО з квазігармонічним генерованим сигналом (а) і графік апроксимованої статичної ВАХ ТСВО поліномом 3-го степеня (б)

Рівняння апроксимації статичної ВАХ ТСВО поліномом 3-го степеня

$$i_T(u) = (I_S + gU_S - hU_S^3) - (g - 3hU_S^2)u - 3hU_S u^2 + hu^3. \quad (1)$$

Параметри апроксимації визначаються з рівнянь

$$U_{\text{max}} = U_S - \sqrt{\frac{g}{3h}}, \quad I_{\text{max}} = I_S + g\sqrt{\frac{g}{3h}} - h\left(\sqrt{\frac{g}{3h}}\right)^3, \quad U_{\text{min}} = U_S + \sqrt{\frac{g}{3h}}, \quad I_{\text{min}} = I_S - g\sqrt{\frac{g}{3h}} + h\left(\sqrt{\frac{g}{3h}}\right)^3.$$

Узагальнене диференціальне рівняння ГЕК на основі ТСВО з квазігармонічним генерованим сигналом

$$L_{екв} C_{екв} \frac{d^2 z}{dt_H^2} \sqrt{\frac{g - \frac{1}{R_{екв}}}{h}} + \frac{z}{\omega_0} \sqrt{\frac{g - \frac{1}{R_{екв}}}{h}} + \left[ \left( \frac{dz}{dt_H} \right)^2 \left( g - \frac{1}{R_{екв}} \right) - g + \frac{1}{R_{екв}} \right] L_{екв} \sqrt{\frac{g - \frac{1}{R_{екв}}}{h}} \frac{dz}{dt_H} = 0, \quad (2)$$

де  $t_H = \omega_0 t$ , (3)  $z = \omega_0 (I_S + i) \sqrt{\frac{h}{g - \frac{1}{R_{екв}}}}$ . (4)

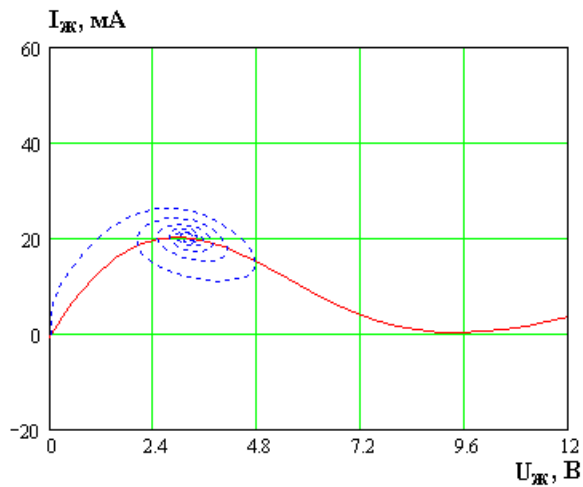
Умова м'якого режиму самозбудження ГЕК на основі ТСВО (5), рівняння амплітуди (6) і частоти (7) стаціонарних коливань

$$(g - 3hU_S^2) > \frac{1}{Q\rho \cos \varphi_\beta}, \quad (5) \quad U_{CT} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{g - 3hU_S^2}{h} + \frac{1}{hQ\rho \cos \varphi_\beta}}, \quad (6)$$

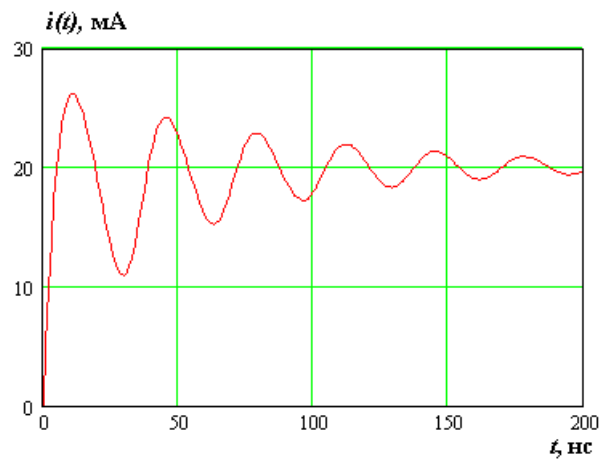
$$\omega_{CT} = \omega_0 \left( 1 - \frac{1}{2Q} tg \varphi_\beta \right). \quad (7)$$

Дисперсійні значення флуктуацій амплітуди (8) і фази (9) генерованого сигналу в реальному часі

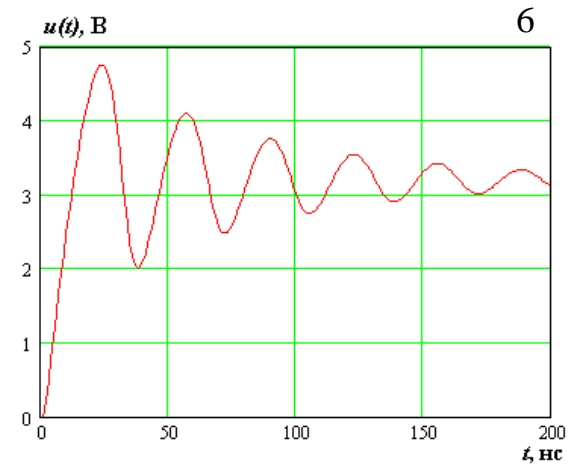
$$\sigma_{\ddot{u}}^2 = \frac{1}{4} \frac{S(\omega_0) \cdot \omega_0^2}{U_{CT}^2 (3hU_{CT}^2 - g)}, \quad (8) \quad \sigma_{\dot{\varphi}}^2 = \frac{1}{2} \frac{S(\omega_0) \cdot \omega_0^2}{U_{CT}^2} t. \quad (9)$$



а)

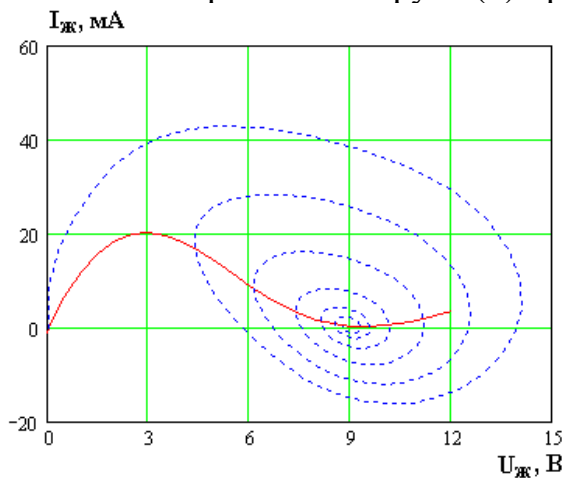


б)

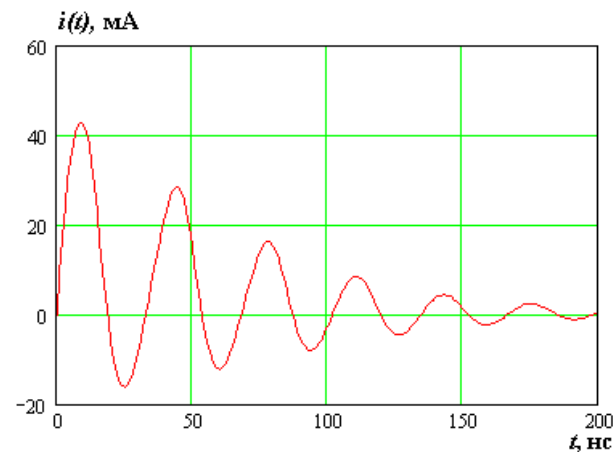


в)

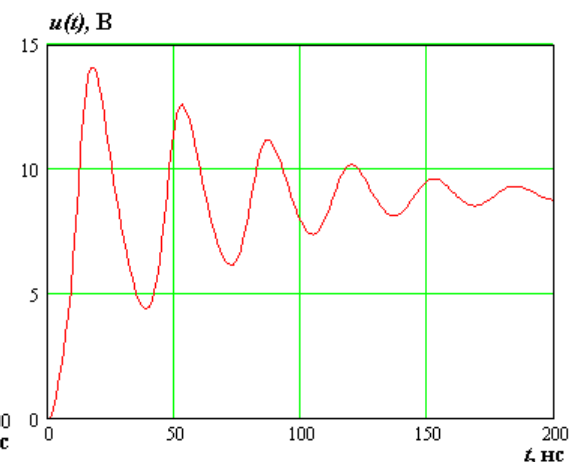
Рис.2. Суміщена ВАХ і фазовий портрет ГЕК на основі ТСВО (а), часові діаграми струму індуктивності (б) і генерованої напруги (в) при розміщенні робочої точки на початку ділянки від'ємного опору



а)



б)



в)

Рис.3. Суміщена ВАХ і фазовий портрет ГЕК на основі ТСВО (а), часові діаграми струму індуктивності (б) і генерованої напруги (в) при розміщенні робочої точки на кінці ділянки від'ємного опору

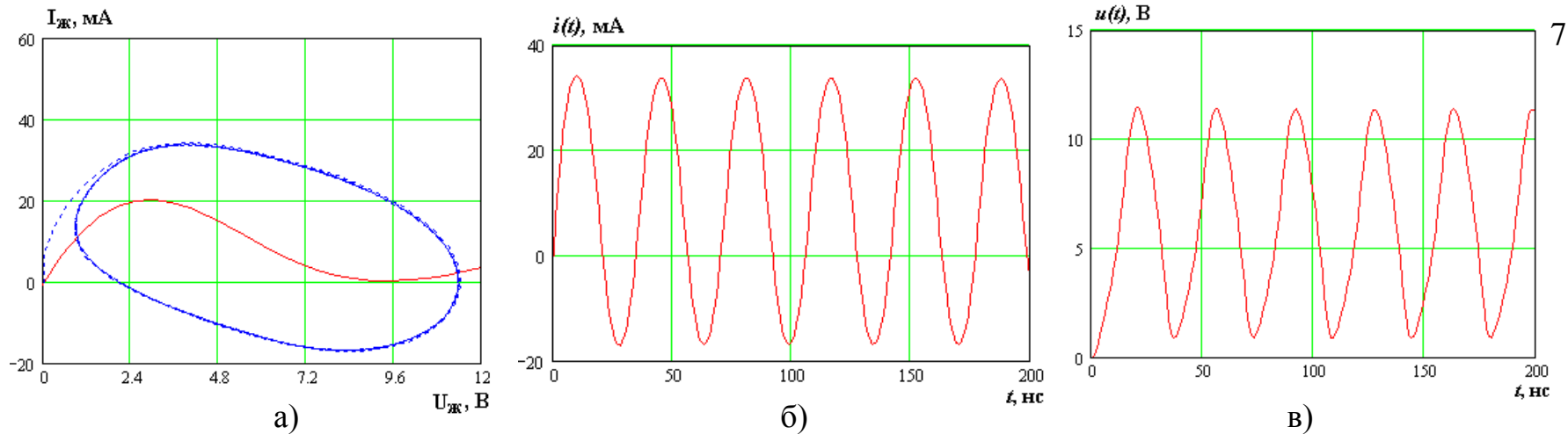


Рис.4. Суміщена ВАХ і фазовий портрет ГЕК на основі ТСВО (а), часові діаграми струму індуктивності (б) і генерованої напруги (в) при розміщенні робочої точки в середній точці ( $I_S$ ,  $U_S$ ) ділянки від'ємного опору (м'який режим самозбудження)

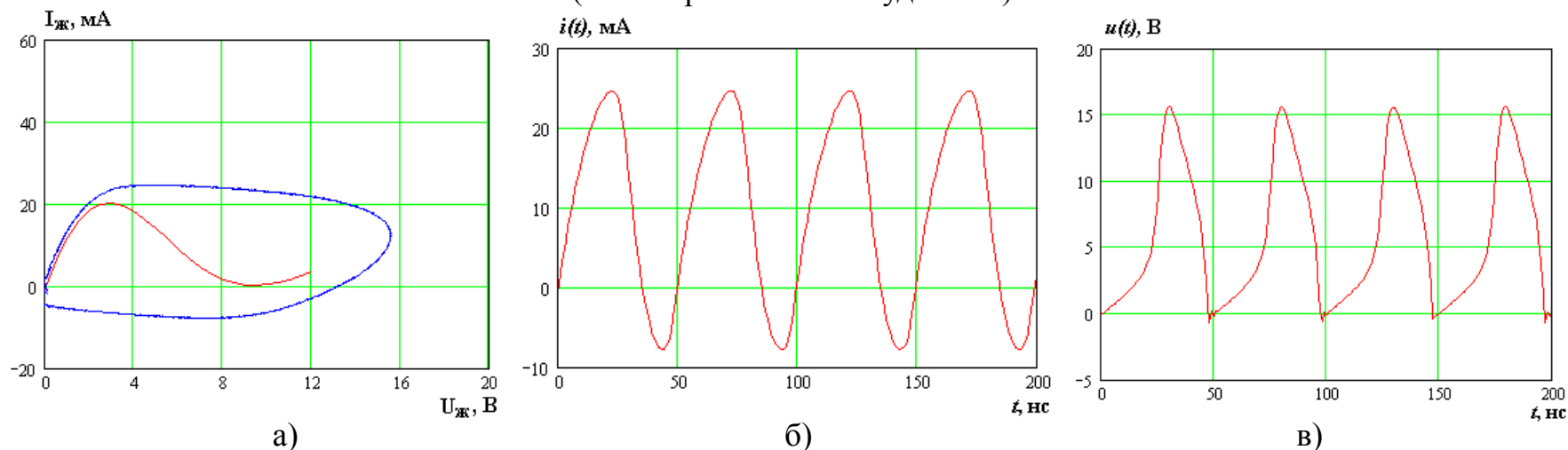
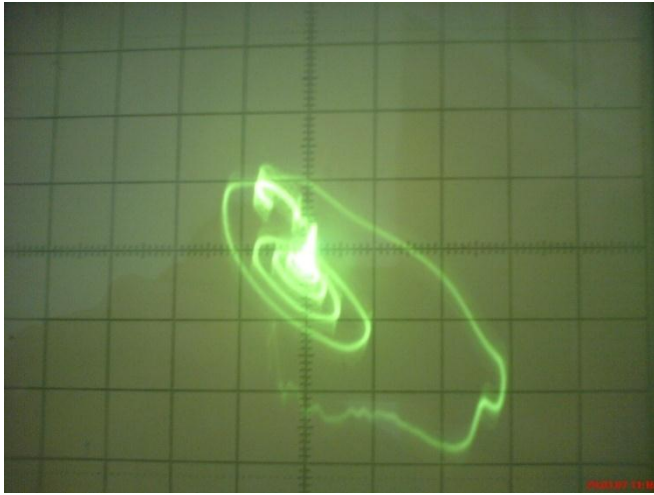
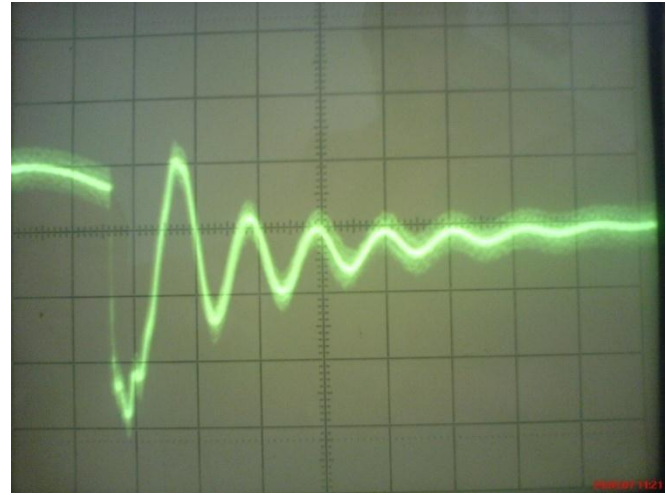


Рис.5. Суміщена ВАХ і фазовий портрет ГЕК на основі ТСВО (а), часові діаграми струму індуктивності (б) і генерованої напруги (в) при розміщенні робочої точки наприкінці ділянки від'ємного опору (жорсткий режим самозбудження)





а)



б)

Рис.6. Фазовий портрет (а) і осцилограма зриву коливань генерованої напруги (б) на початку ділянки ВО

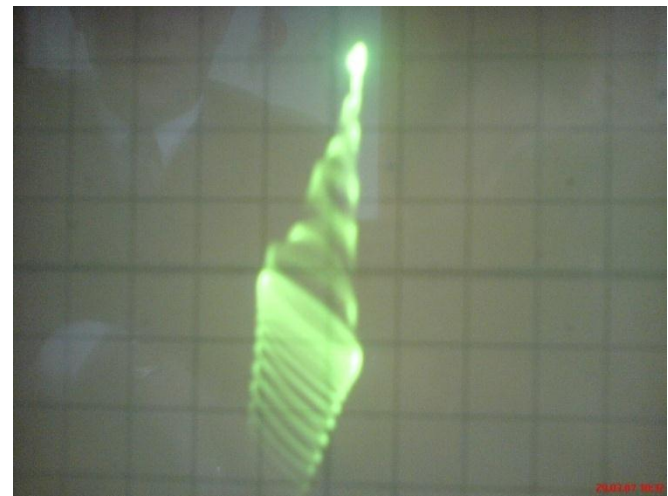
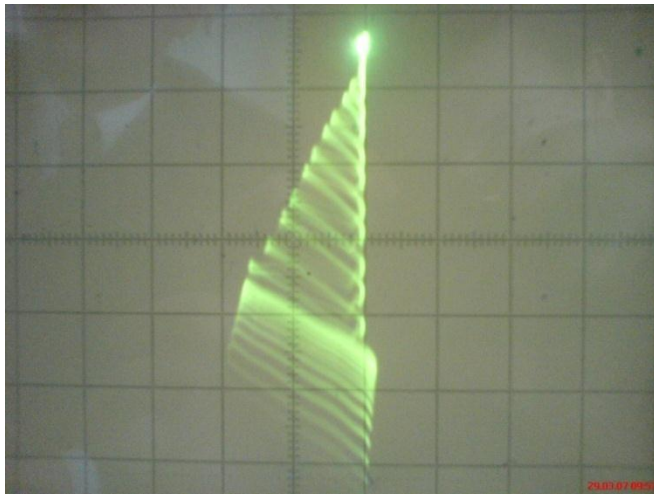
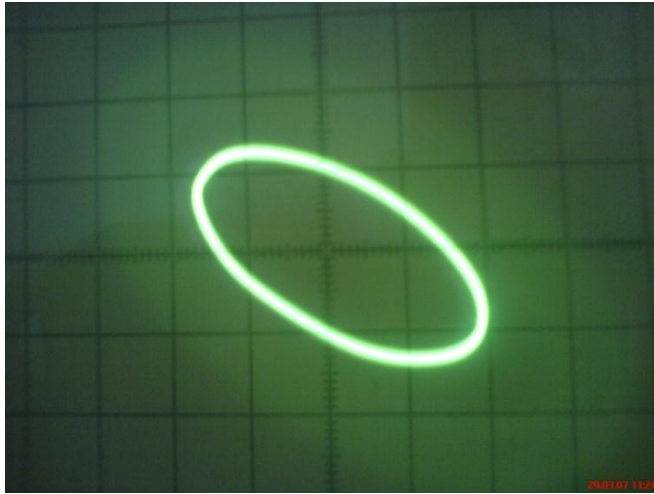
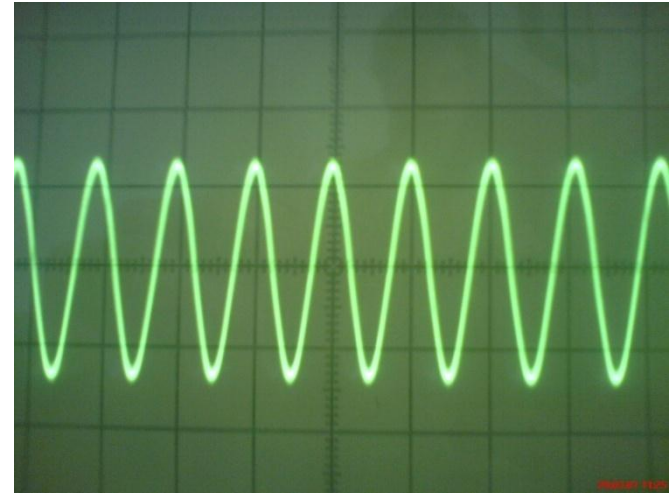


Рис.7. Фазові портрети зриву коливань генерованої напруги на кінці ділянки ВО



а)



б)

Рис.8. Фазовий портрет (а) і осцилограма генерованих гармонічних коливань (б) в м'якому режимі ГЕК на ТСВО при розміщенні робочої точки в середній точці ( $I_S$ ,  $U_S$ ) ділянки від'ємного опору



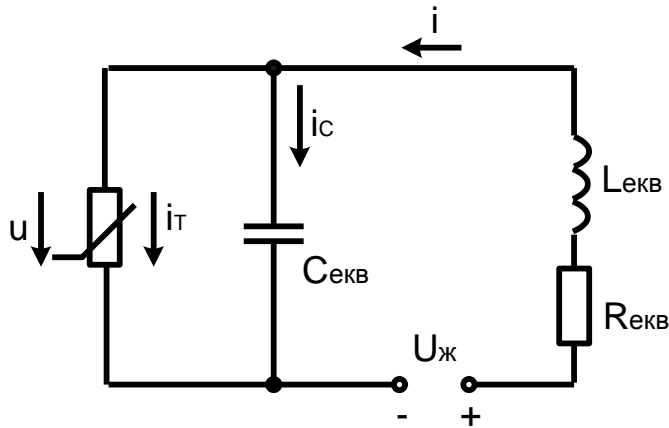
а)



б)

Рис.9. Фазовий портрет (а) і осцилограма спотворених гармонічних коливань (б) в жорсткому режимі ГЕК на ТСВО

## Нелінійна модель ГЕК на основі ТСВО



Неоднорідне диференційне рівняння

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + \left[ \frac{R_{екв}}{L_{екв}} + \frac{G(u)}{C_{екв}} \right] \frac{du}{dt} + \frac{1}{L_{екв} C_{екв}} [u + i_T(u) R_{екв}] = \frac{U_{ж}}{L_{екв} C_{екв}}, \quad (10)$$

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + \omega_0^2 u = -\omega_0 [\delta + \omega_0 L_{екв} G(u)] \frac{du}{dt} - \omega_0^2 R_{екв} i_T(u). \quad (11)$$

Рис.10. Еквівалентна схема діапазонного ГЕК на основі ТСВО

$$\frac{d^2 y}{dt_H^2} + y = - \left[ \delta + \frac{\omega_0 L_{екв} d_1}{R_g} \right] \frac{dy}{dt_H} - \frac{\omega_0 L_{екв} d_1}{R_g} \frac{dy}{dt_H} \sum_{n=1}^3 \frac{nd_n}{d_1} y^{n-1} - \frac{R_{екв} d_1}{R_g} \sum_{n=1}^3 \frac{d_n}{d_1} y^n. \quad (12)$$

Як малий параметр при розрахунку обираємо величину

$$\varepsilon = \frac{\omega_0 L_{екв} d_1}{R_g} = \frac{\rho d_1}{R_g}. \quad (13)$$

Умова м'якого режиму самозбудження ГЕК на основі ТСВО і рівняння амплітуди стаціонарних коливань

$$\frac{R_{екв} R_H}{R_{екв} + R_H} = \frac{\omega_0 L_{екв}}{\delta} > \frac{R_g \left( U_s + \sqrt{\frac{g}{2h}} \right)}{|3hU_s^2 - g|}, \quad (14) \quad V_0 = 2\sqrt{Q_g \left( \frac{g}{3h} - U_s^2 \right)} = 2\sqrt{Q_g \left( U_{\max}^2 + 2U_s \sqrt{\frac{h}{3g}} \right)}. \quad (15)$$

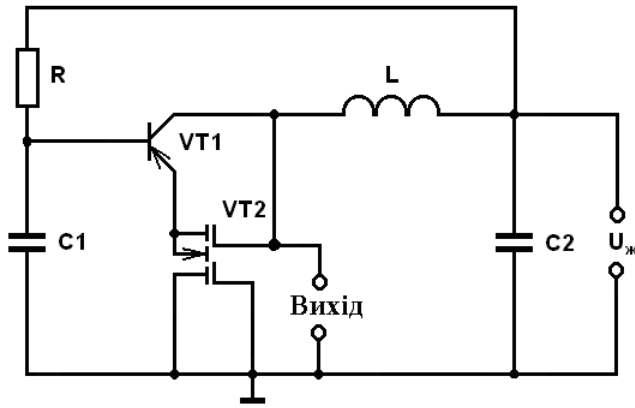
Співвідношення для визначення коефіцієнтів гармонік

$$K_{U2} = \frac{4Q_g \rho h U_s}{R_g \left( U_s + \sqrt{\frac{g}{3h}} \right)} \left( \frac{g}{3h} - U_s^2 \right), \quad (16) \quad K_{U3} = \frac{3Q_g \rho h U_s}{4R_g \left( U_s + \sqrt{\frac{g}{3h}} \right)} \left( \frac{g}{3h} - U_s^2 \right) \sqrt{Q_g \left( \frac{g}{3h} - U_s^2 \right)}, \quad (17)$$

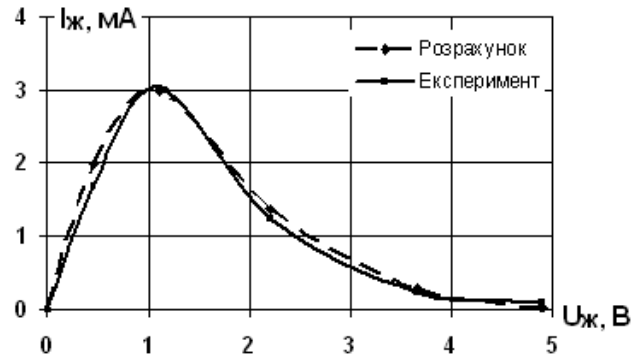
коефіцієнта нелінійних спотворень форми генерованого сигналу і нелінійного відхилення частоти

$$K_U = \sqrt{K_{U2}^2 + K_{U3}^2} = \frac{Q_g \rho h U_s}{4R_g \left( U_s + \sqrt{\frac{g}{3h}} \right)} \left( \frac{g}{3h} - U_s^2 \right) \sqrt{247U_s^2 + 3Q_g \frac{g}{h}}, \quad (18)$$

$$\Delta F = \Delta f + \frac{2\rho^2 \sqrt{Q_g \left( \frac{g}{3h} - U_s^2 \right)}}{R_g^2 \left( U_s + \sqrt{\frac{g}{3h}} \right)^2} \left[ -Q_g h U_s (3hU_s^2 - g) + \frac{2}{192} (27Q_g h (3hU_s^2 - g) - 288h^2 U_s^2) \sqrt{Q_g \left( \frac{g}{3h} - U_s^2 \right)} - \right. \\ \left. -3h^2 Q_g \left( \frac{g}{3h} - U_s^2 \right) U_s + \frac{5}{3} Q_g h (3hU_s^2 - g) Q_g \left( \frac{g}{3h} - U_s^2 \right) \sqrt{Q_g \left( \frac{g}{3h} - U_s^2 \right)} \right]. \quad (19)$$

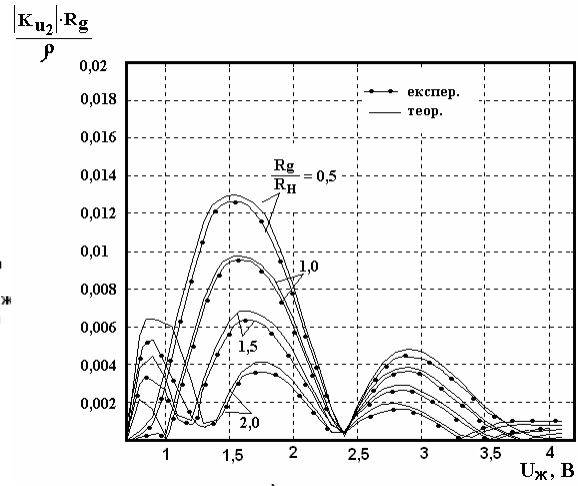


а)

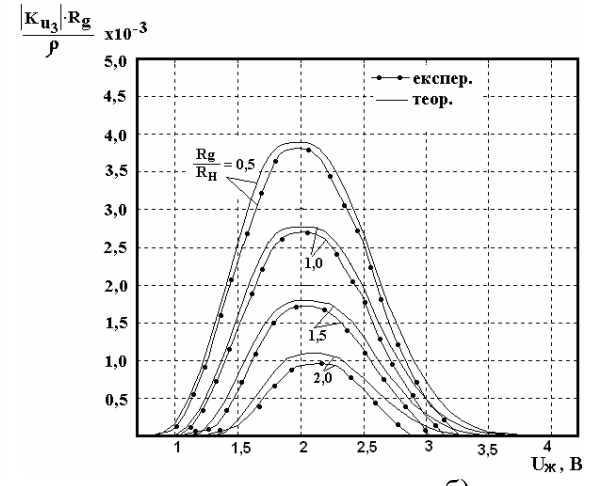


б)

Рис.11. Електрична схема генератора гармонічних коливань НВЧ діапазону (а) і графік статичної ВАХ ТСВО (б)

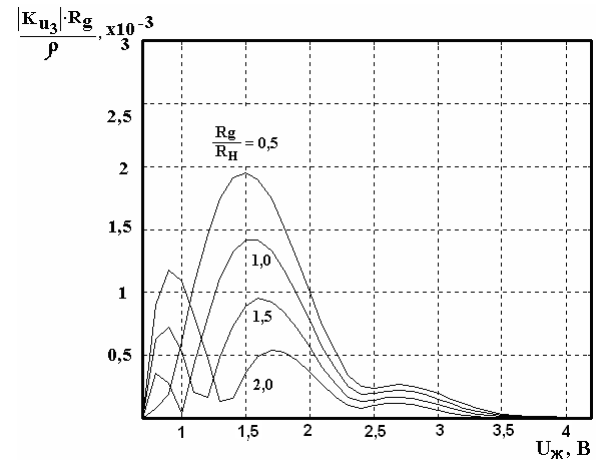


а)

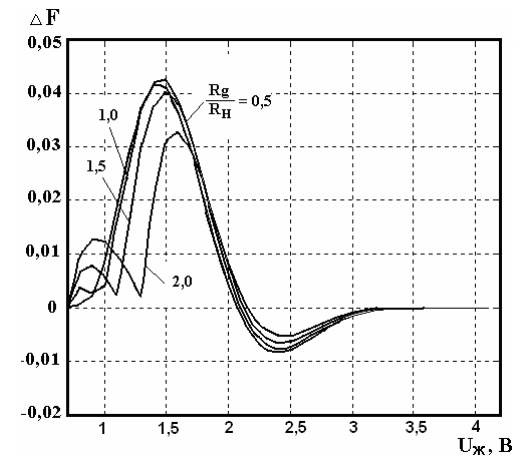


б)

Рис.12. Теоретичні та експериментальні залежності нормованого коефіцієнтів 2-ї (а) та 3-ї (б) гармонік від напруги живлення з різними опором навантаженнями



а)



б)

Рис.13. Теоретична залежність нормованого коефіцієнта нелінійних спотворень (а) і нелінійного відхилення частоти (б) від напруги живлення при різних значеннях опору навантаження

Доповідь завершено.  
Дякую за увагу.