

Магістерська кваліфікаційна робота на тему:

“Дослідження індуктивних властивостей  
низькочастотних транзисторів та створення на їх  
основі радіотехнічних пристроїв”

Виконав: ст. гр. РТ-16 м

Юрець Б.Ю.

Керівник: д.т.н., професор

Осадчук В.С.

Вінниця 2018

# “Дослідження індуктивних властивостей низькочастотних транзисторів та створення на їх основі радіотехнічних пристроїв”

**Метою роботи** є дослідження реактивних властивостей високочастотних транзисторів та практичне використання реактивних властивостей транзисторів у діапазоні надвисоких частот, які є технологічно сумісними з мікроелектронною елементною базою.

**Об'єктом дослідження** - процеси перетворення електричних сигналів у пристроях на основі реактивних властивостей транзисторів у діапазоні низьких частот.

## **Розв'язуються такі задачі:**

- 1) проаналізувати існуючі методи та засоби дослідження реактивних властивостей низькочастотних транзисторів та обґрунтувати переваги індуктивностей на основі реактивних властивостей транзисторів у діапазоні низьких частот по відношенню до існуючих;
- 2) удосконалити математичні моделі реактивних властивостей низькочастотних транзисторів на основі аналізу процесів у базовій та колекторній областях та здійснити їх аналіз;
- 3) дослідити параметри та характеристики індуктивності нелінійної моделі транзистора;
- 3) дослідити практичне використання реактивних властивостей транзисторів у діапазоні низьких частот.

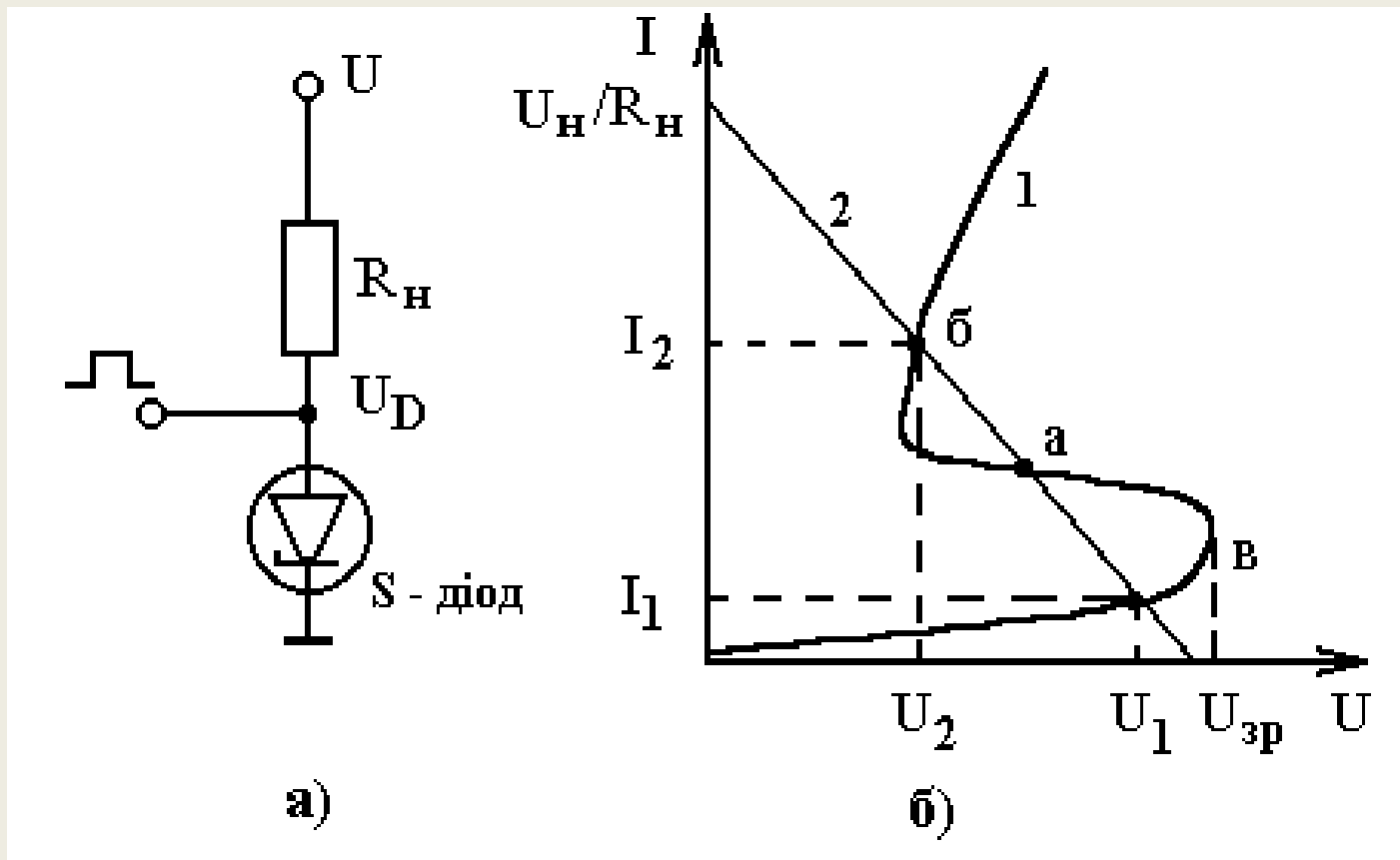


Рисунок Б1 - Перемикач на S-діоді (а) та його вольт-амперна характеристика (1) пряма навантаження (2)

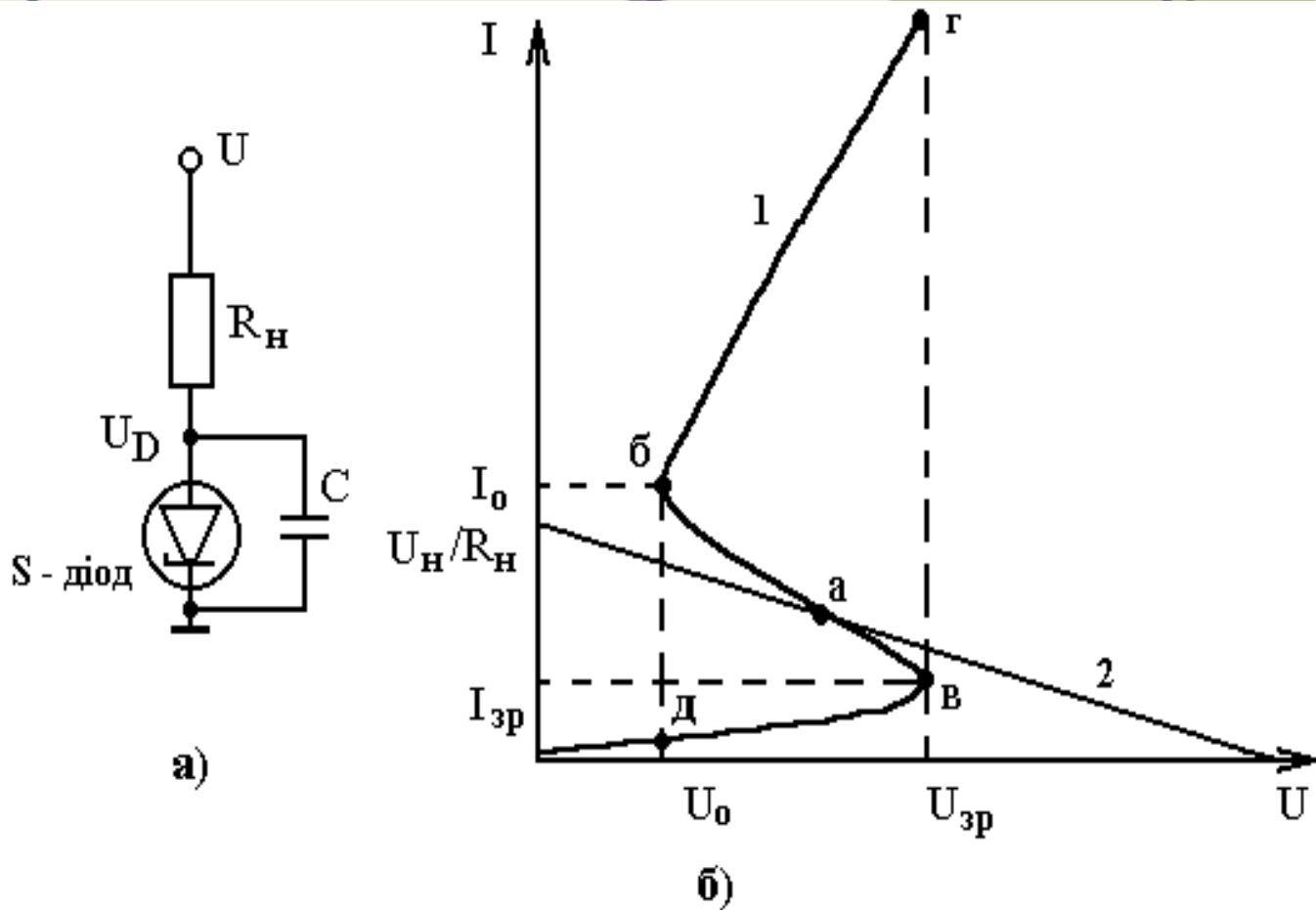


Рисунок Б2 - Релаксаційний генератор на S-діоді (а) та його вольт-амперна характеристика (б),  $R_H$  – обмежувальний резистор

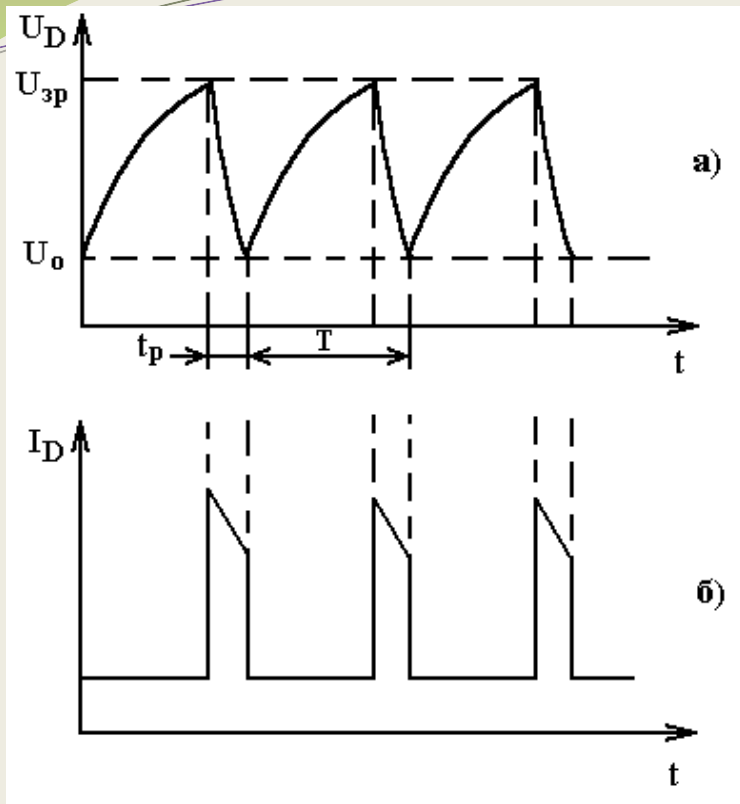


Рисунок Б3 - Коливання напруги (а) та струму (б) в релаксаційному генераторі на основі S-діода

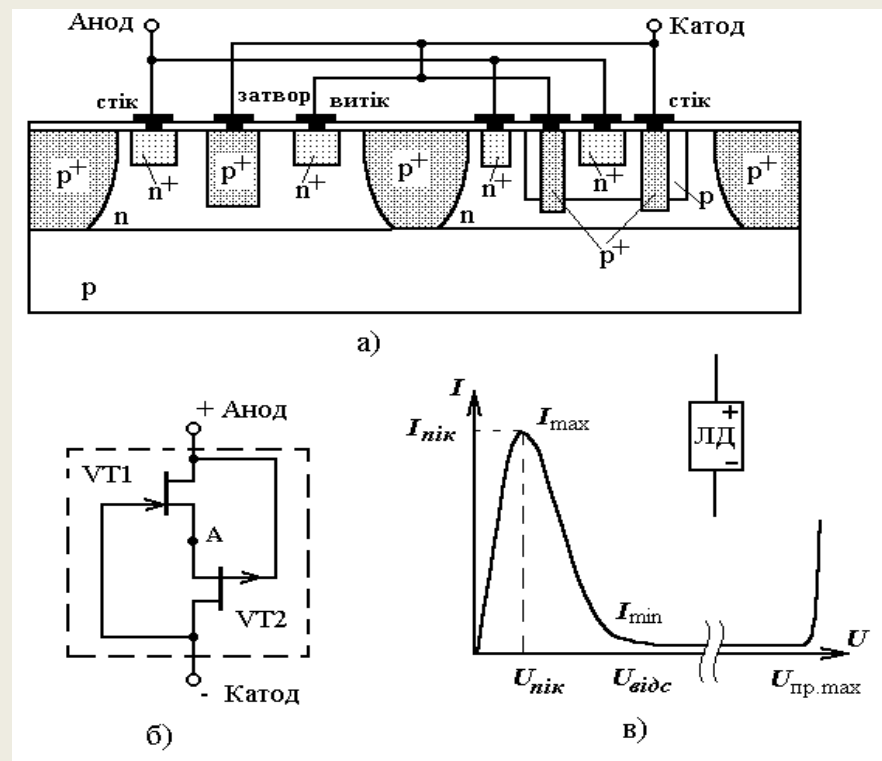


Рисунок Б4 - Лямбда-діод на інтегральних польових транзисторах  
а – технологічна структура; б – електрична схема з'єднань обох польових транзисторів;  
в – типова вольт-амперна характеристика приладу і його умовне графічне зображення [20]

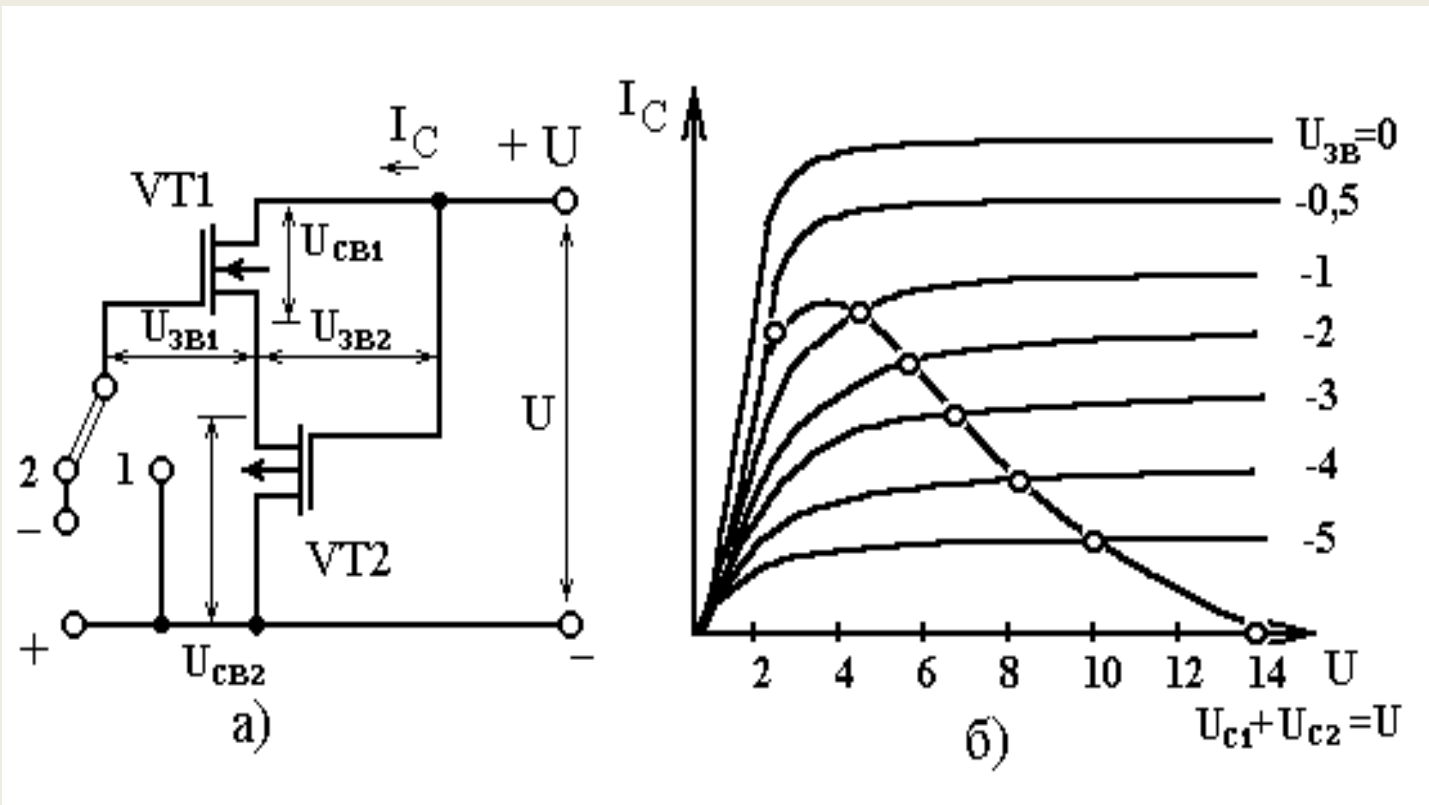


Рисунок Б5 - Складовий лямбда-транзистор: а – схема включення польових транзисторів і джерела керувальної напруги; б – графічний метод побудови ВАХ

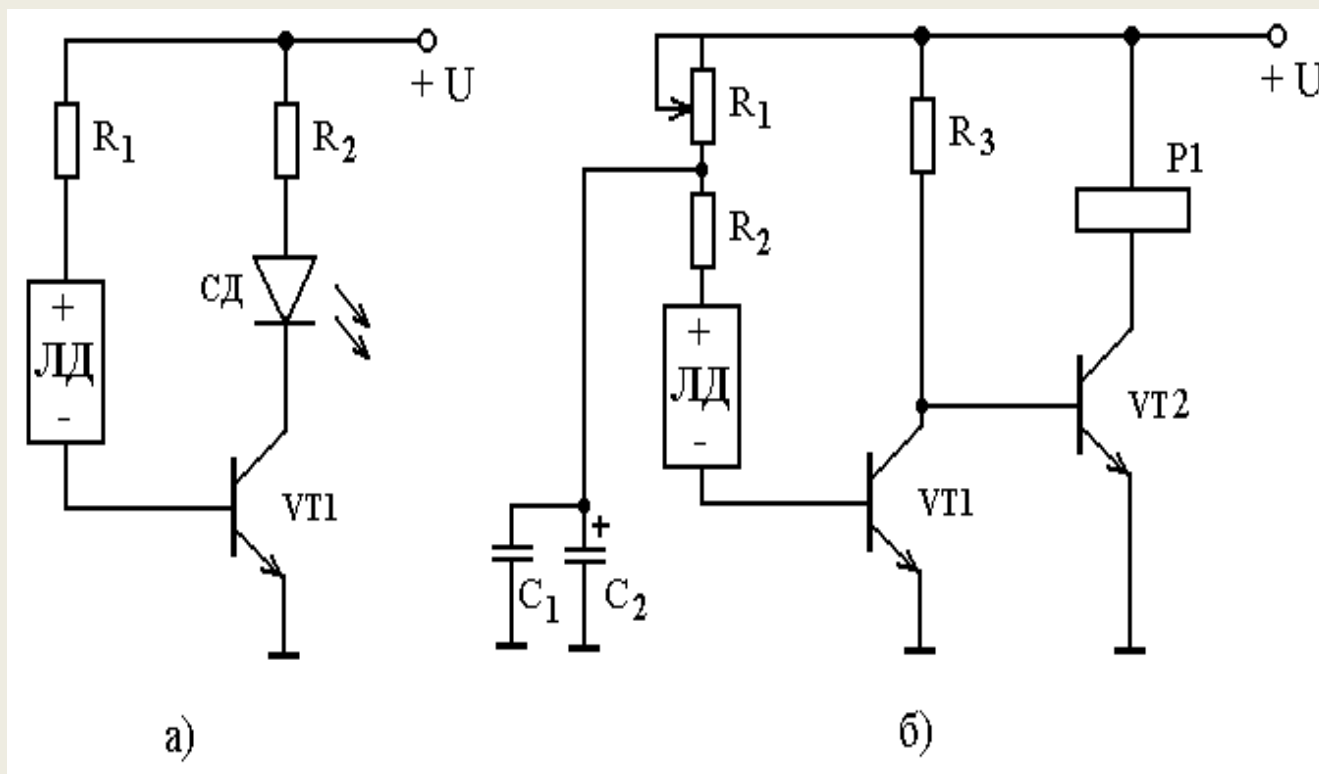


Рисунок Бб - Схеми сигналізації: а – зниження напруги живлення;  
 б – автоматичний сигналізатор для автомобіля

## Математична модель аналога індуктивності на основі транзистора

$$i_e = A_{11}(p) \left[ e^{\frac{qU_e(t)}{kT}} - 1 \right] - A_{12}(p) \left[ e^{\frac{qU_\kappa(t)}{kT}} - 1 \right] \quad (1)$$

де  $A_{11}(p) = A_{11}^{(\delta)}(p) = SD_n q \cdot n_p^o (\delta \cdot \text{cth} \delta \cdot W_o + \frac{\ln \eta}{2W_o})$

$$i_\kappa = -A_{21}(p) \left[ e^{\frac{qU_e(t)}{kT}} - 1 \right] - A_{22}(p) \left[ e^{\frac{qU_\kappa(t)}{kT}} - 1 \right] \quad (2)$$

$$A_{22}(p) = A_{22}^{(\delta)}(p) + A_{22}^{(\kappa)}(p) = SD_n q \cdot n_p^{W_o} (\delta \cdot \text{cth} \delta \cdot W_o - \frac{\ln \eta}{2W_o} + \frac{D_p p_n^{W_1}}{D_n n_p^{W_o}} \delta_1 \text{cth} \delta_1 W_\kappa)$$

$$p = \frac{d}{dt} \quad A_{21}(p) = A_{21}^{(\delta)}(p) = SD_n q \cdot n_p^o \sqrt{\eta} \cdot \delta \cdot \text{csch} \delta \cdot W_o \quad A_{12}(p) = A_{12}^{(\delta)}(p) = SD_n q \cdot n_p^{W_o} \frac{\delta}{\sqrt{\eta}} \text{csch} \delta \cdot W_o$$

$$\delta = \left[ \left( \frac{\ln \eta}{2W_o} \right)^2 + \frac{1 + p\tau_n}{L_n^2} \right] \quad \delta_1 = \frac{1}{L_p} [1 + p\tau_p]^{1/2}$$

Система рівнянь (1) і (2), що описує фізичні процеси в базовій області транзистора, дозволяє визначити величину індуктивності нелінійної моделі транзистора, на підставі залежності між напругою і струмом на затискачах ідеальної індуктивності. Таким чином, розмір індуктивності визначається виразом

$$L = \frac{1}{qSD_n n_p^o \sqrt{\eta} \cdot \delta \cdot (\text{csch} \delta \cdot W_o) \frac{q}{kT} \cdot p \cdot e^{\frac{qU_e(t)}{kT}}} \quad (3)$$



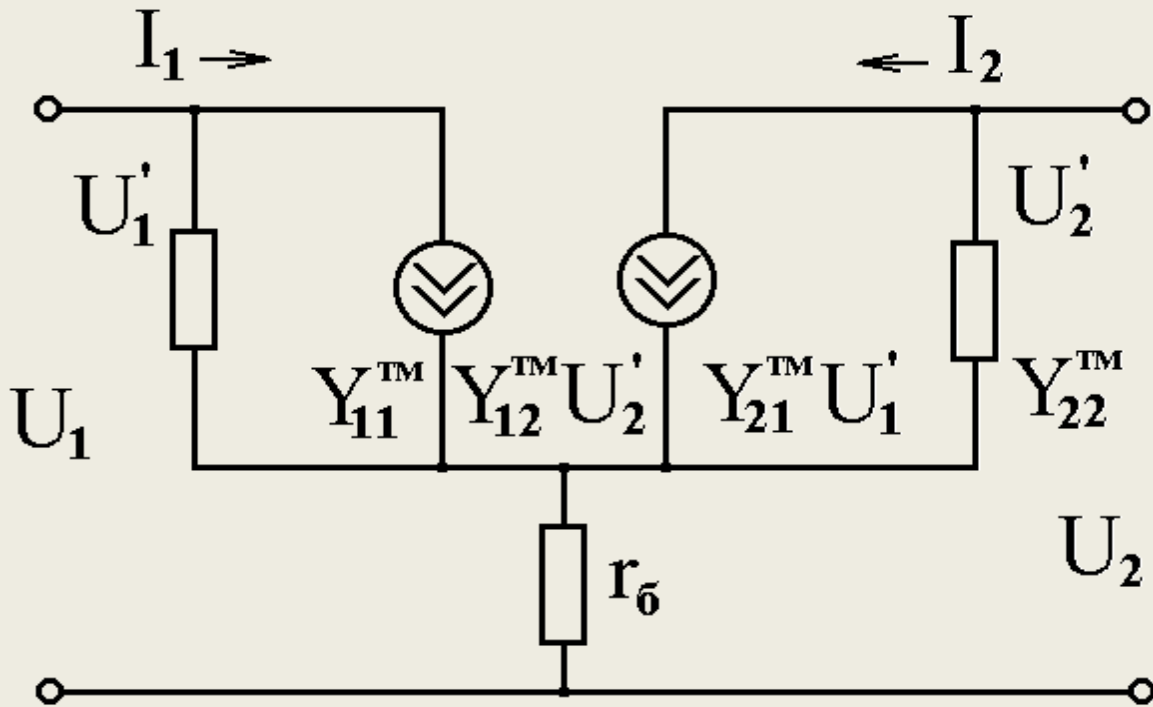


Рисунок Г1 - Еквівалентна схема транзистора

$$R = \frac{(r_e + r_{\bar{o}}(1 - \alpha_o)) \left( 1 - \frac{\omega^2 r_{\bar{o}} C_{PK} 1,04}{\omega_{\alpha}} \right) + \left( \frac{1,04\omega}{\omega_{\alpha}} \right)^2 1,19 \cdot r_{\bar{o}} \left( 1 + \frac{r_{\bar{o}} \omega_{\alpha} C_{PK}}{1,04} \right)}{\left( 1 - \frac{1,04\omega^2 r_{\bar{o}} C_{PK}}{\omega_{\alpha}} \right)^2 + \left( \frac{1,04\omega}{\omega_{\alpha}} \right)^2 \left( 1 + \frac{r_{\bar{o}} C_{PK} \omega_{\alpha}}{1,04} \right)^2} \quad (1)$$

$$X = \frac{\frac{1,04\omega}{\omega_{\alpha}} \left( 1,19 \cdot r_{\bar{o}} \left( 1 - \frac{\omega^2 r_{\bar{o}} C_{PK} 1,04}{\omega_{\alpha}} \right) - (r_e + r_{\bar{o}}(1 - \alpha_o)) \left( 1 + \frac{r_{\bar{o}} \omega_{\alpha} C_{PK}}{1,04} \right) \right)}{\left( 1 - \frac{1,04\omega^2 r_{\bar{o}} C_{PK}}{\omega_{\alpha}} \right)^2 + \left( \frac{1,04\omega}{\omega_{\alpha}} \right)^2 \left( 1 + \frac{r_{\bar{o}} C_{PK} \omega_{\alpha}}{1,04} \right)^2} \quad (2)$$

$$L = \frac{\frac{1,04}{\omega_{\alpha}} \left( 1,19 \cdot r_{\bar{o}} \left( 1 - \frac{\omega^2 r_{\bar{o}} C_{PK} 1,04}{\omega_{\alpha}} \right) - (r_e + r_{\bar{o}}(1 - \alpha_o)) \left( 1 + \frac{r_{\bar{o}} \omega_{\alpha} C_{PK}}{1,04} \right) \right)}{\left( 1 - \frac{1,04\omega^2 r_{\bar{o}} C_{PK}}{\omega_{\alpha}} \right)^2 + \left( \frac{1,04\omega}{\omega_{\alpha}} \right)^2 \left( 1 + \frac{r_{\bar{o}} C_{PK} \omega_{\alpha}}{1,04} \right)^2} \quad (3)$$

$$Q = \frac{\frac{1,04}{\omega_{\alpha}} \left( 1,19 \cdot r_{\bar{o}} \left( 1 - \frac{\omega^2 r_{\bar{o}} C_{PK} 1,04}{\omega_{\alpha}} \right) - (r_e + r_{\bar{o}}(1 - \alpha_o)) \left( 1 + \frac{r_{\bar{o}} \omega_{\alpha} C_{PK}}{1,04} \right) \right)}{(r_e + r_{\bar{o}}(1 - \alpha_o)) \left( 1 - \frac{1,04\omega^2 r_{\bar{o}} C_{PK}}{\omega_{\alpha}} \right) + \left( \frac{1,04\omega}{\omega_{\alpha}} \right)^2 \cdot 1,19 r_{\bar{o}} \cdot \left( 1 + \frac{r_{\bar{o}} C_{PK} \omega_{\alpha}}{1,04} \right)} \quad (4)$$

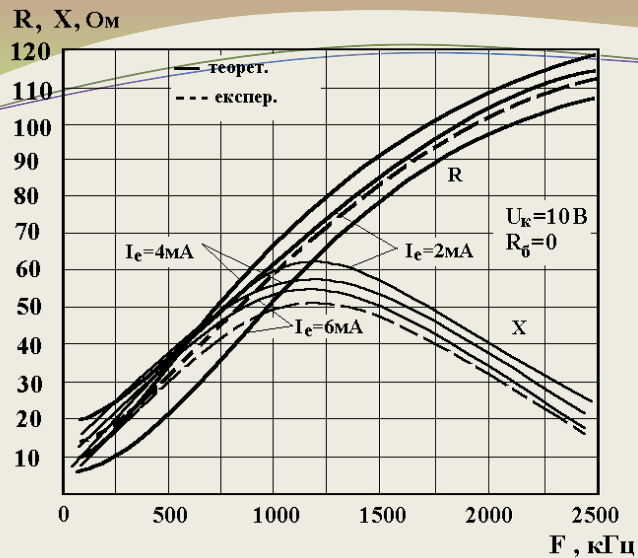


Рисунок Г2 - Експериментальна і розрахункова залежність активної та реактивної складових повного опору від частоти

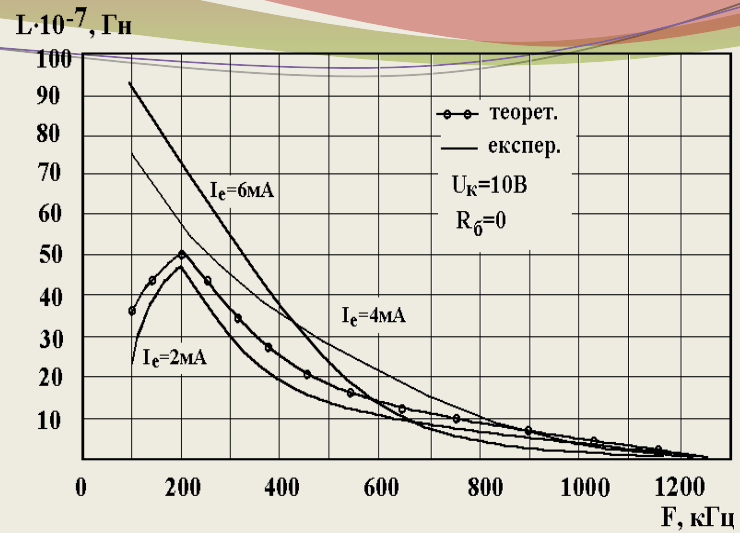


Рисунок Г3 - Експериментальна і розрахункова залежність індуктивності від частоти

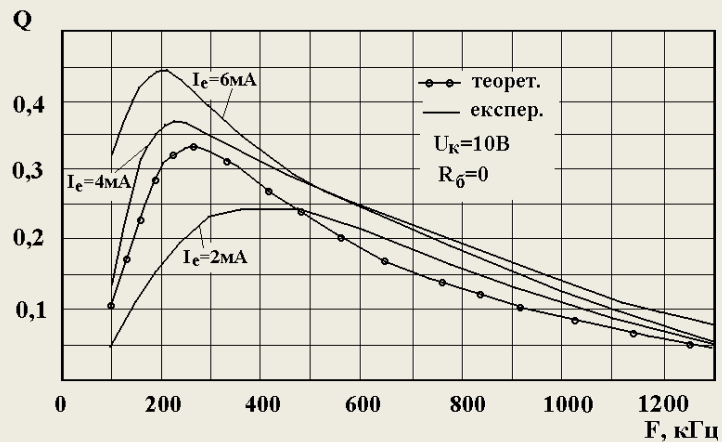


Рисунок Г4 - Експериментальна і теоретична залежність добротності від частоти

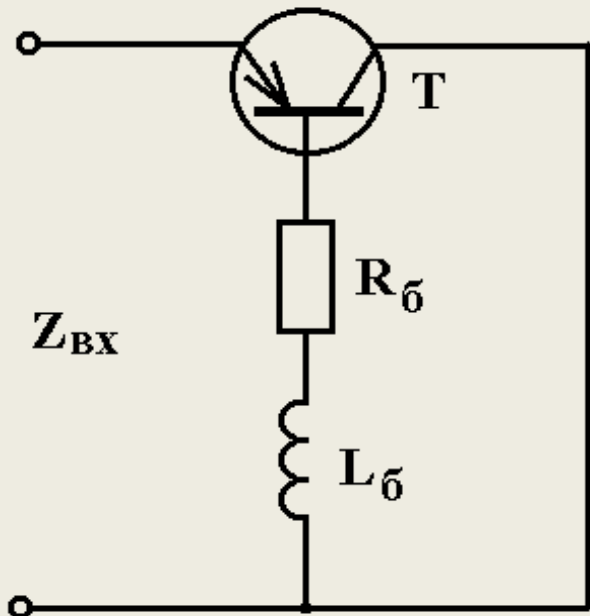


Рисунок Д1 - Електрична схема транзистора

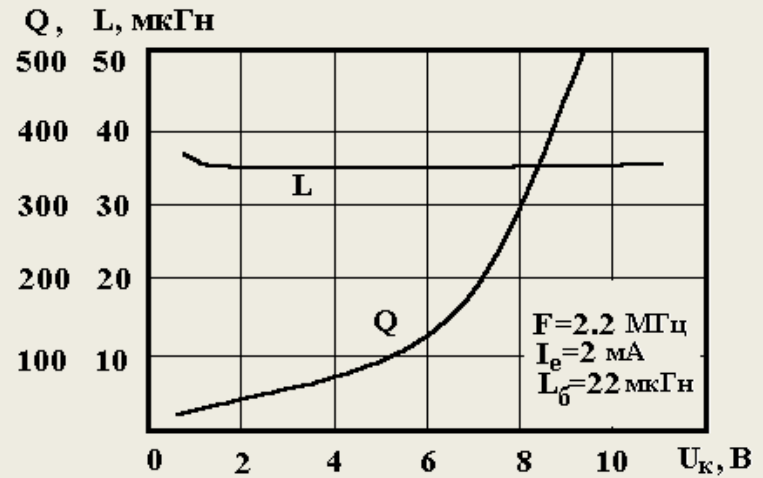
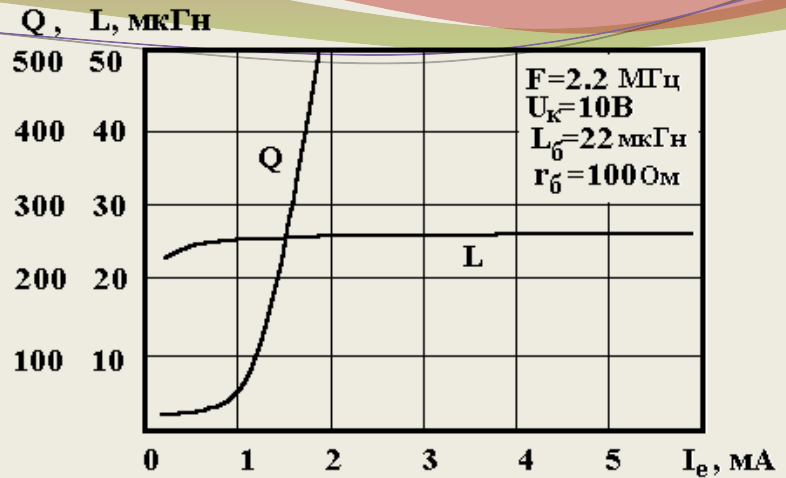


Рисунок Д2 - Залежність індуктивності і добротності від струму емітера (а) і напруги на колекторі (б)

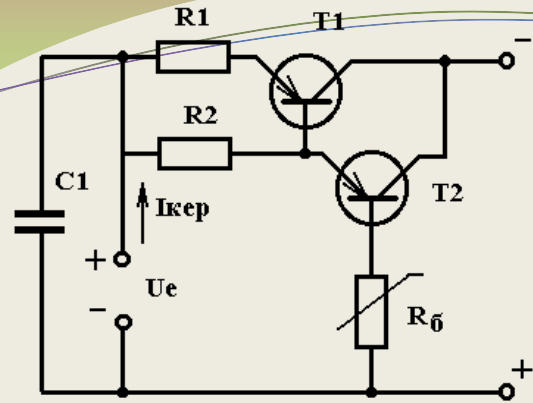


Рисунок Е1 - Схема генератора на складовому транзисторі

F, кГц

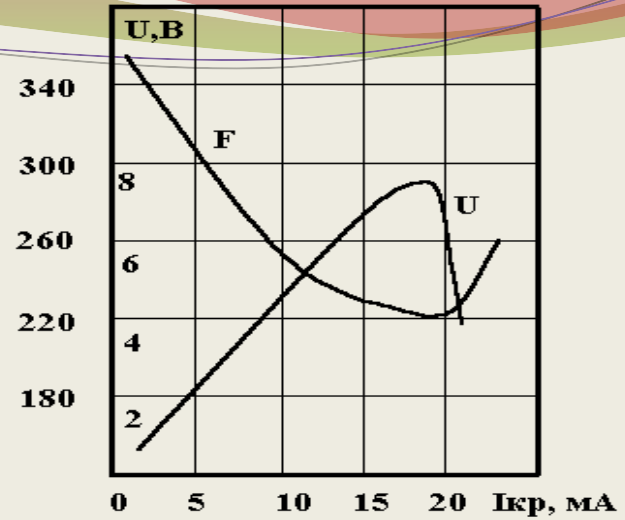


Рисунок Е2 - Залежність резонансної частоти і вихідної напруги генератора від зміни струму керування

F, кГц, U, В

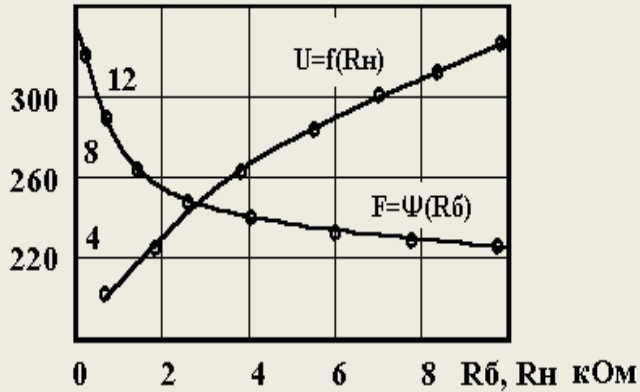
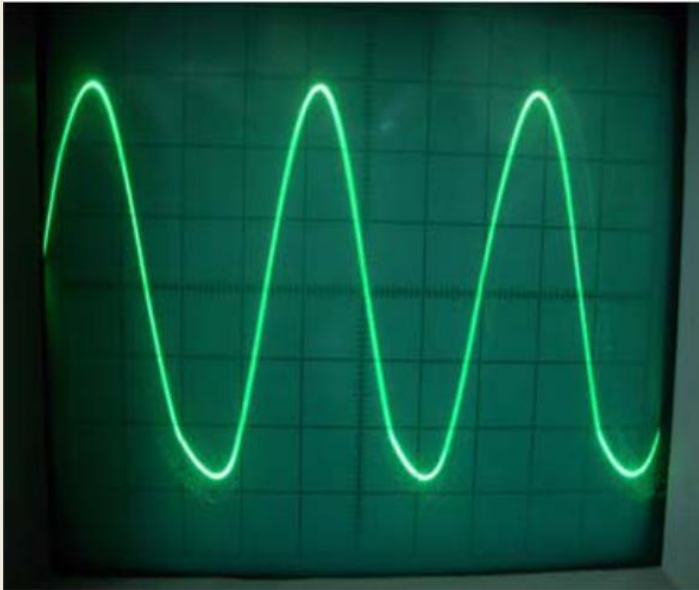
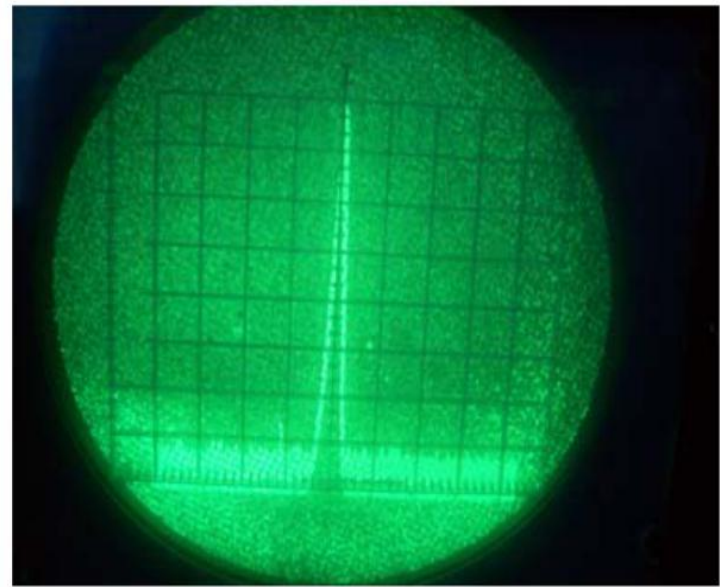


Рисунок Е3 - Залежність резонансної частоти генератора від зміни опору в ланцюзі бази і вихідної напруги від опору навантаження

## Експериментальні дослідження генератора

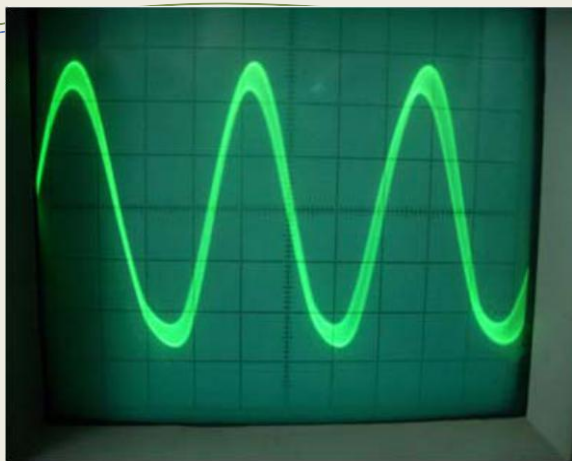


а)

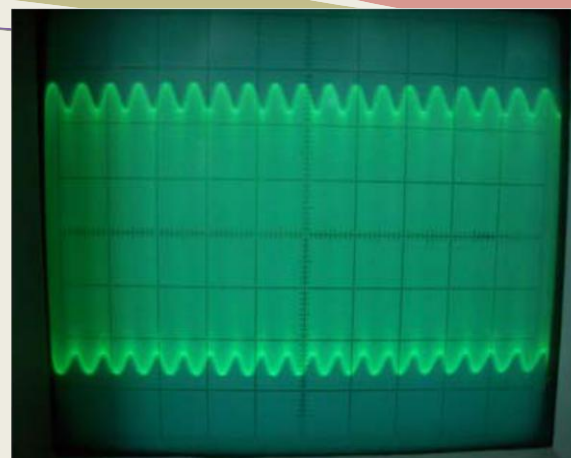


б)

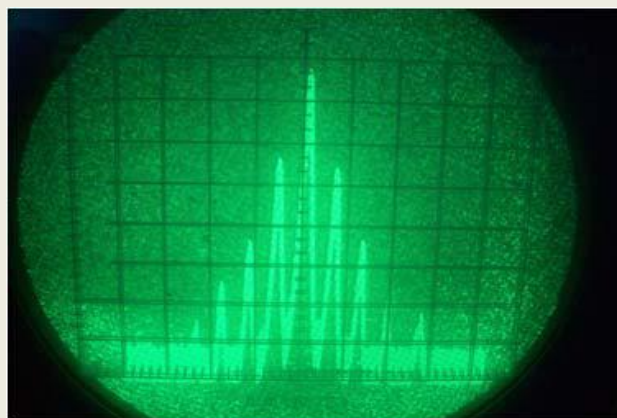
Рисунок Є1 - Осцилограма (а) і спектр (б) генерованих коливань в одно-частотному режимі



а)

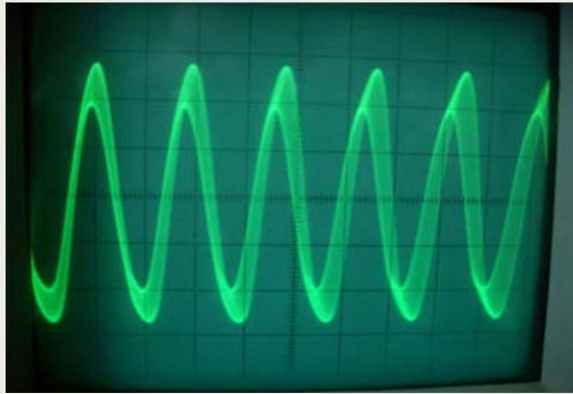


б)

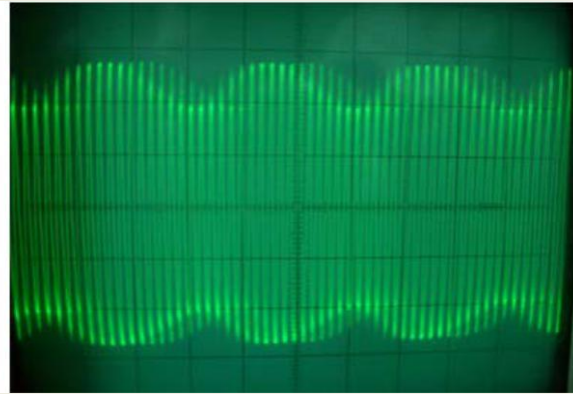


в)

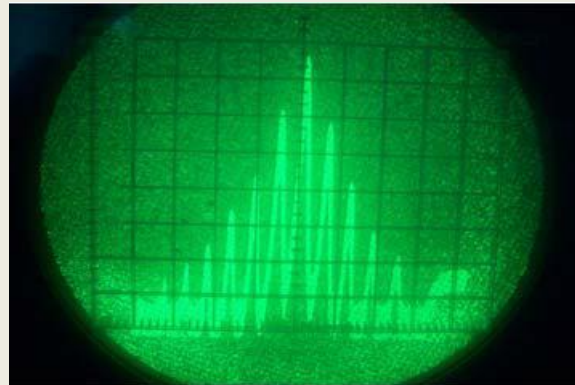
Рисунок Є2 - Осцилограми (а) і (б) та спектр (в) 3-частотного режиму



а)



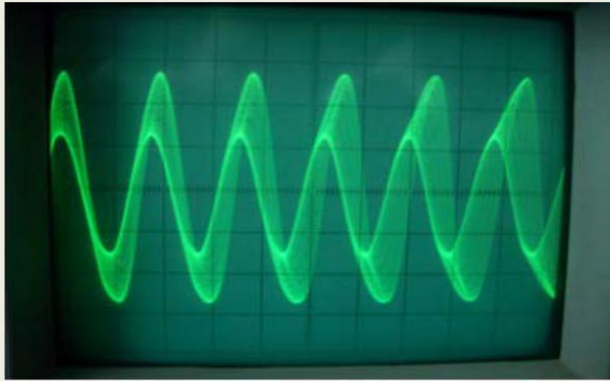
б)



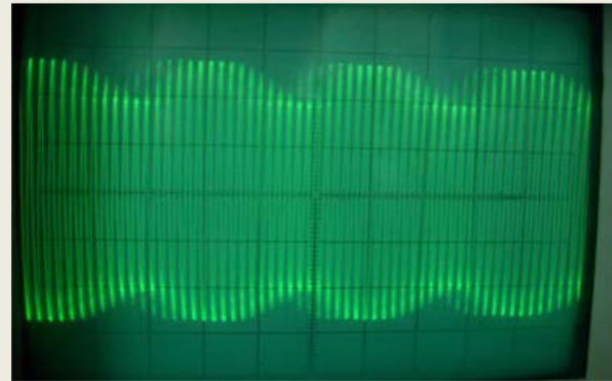
в)

Рисунок Є3 - Осцилограми (а) і (б) та спектр (в) 4-частотного режиму

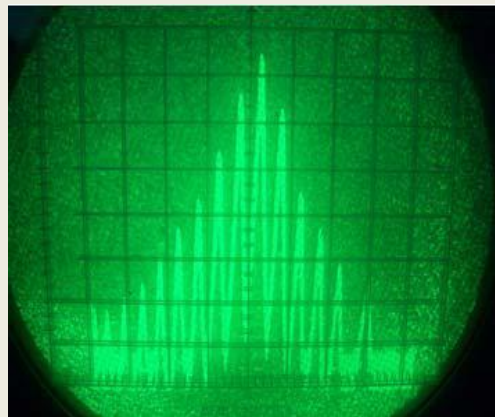




а)



б)



в)

Рисунок Є4 - Осцилограми (а) і (б) та спектр (в) 5-частотного режиму



Дякую за увагу!