

Київський національний університет імені Тараса Шевченка
факультет радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем
кафедра радіотехніки та радіоелектронних систем

Розрахунок та моделювання схем LC-генераторів

Курсова робота з навчальної дисципліни
«радіоелектроніка»
студента II курсу
напряму підготовки «прикладна фізика»
факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем

Апанасенка Владислава Петровича

Науковий керівник
професор кафедри математики
та теоретичної радіофізики,
доктор фізико-математичних наук
Обуховський Вячеслав Володимирович

Київ 2023

ЗМІСТ

ВАРІАНТ.....	3
ВСТУП	4
Розділ 1.LC-ГЕНЕРАТОР ІЗ НЕЗАЛЕЖНИМ ЗБУДЖЕННЯМ.....	5
1.1 Теоретичні відомості	5
1.2 Схема та розрахунок елементів LC-генератора.....	7
1.3 Комп'ютерне моделювання роботи схеми	11
Розділ 2.LC-АВТОГЕНЕРАТОР.....	13
2.1 Теоретичні відомості	13
2.2 Схема та розрахунок елементів LC-автогенератора	16
2.3 Комп'ютерне моделювання роботи схеми	18
ВИСНОВКИ.....	21
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	22

ВАРІАНТ

Завдання 1. Навести опис принципу дії і розрахунок схеми LC-генератора з незалежним збудженням. Провести комп'ютерна моделювання роботи схеми в програмному пакеті NI Multisim.

Завдання 2. Навести опис принципу дії і розрахунок схеми LC-автогенератора. Провести комп'ютерна моделювання роботи схеми в програмному пакеті NI Multisim.

Позначення вхідних даних:

f – робоча частота;

P_H – потужність на навантажувальному контурі

f_H – гранична частота

h_{21e} – коефіцієнт підсилення за струмом

U_{kmax} – максимально допустима напруга на колекторі

I_{kmax} – максимально допустимий струм колектора

P_{kmax} – максимально допустима потужність на колекторі

S – крутість у робочому режимі

S_K – крутість у режимі насичення

U_{BE0} – напруга від джерела зміщення на базі

Q_0 – добротність ненавантаженого контуру

η_k – к.п.д контуру

R_H – опір навантаження

Вхідні дані для 5 варіанту:

$f = 0,84$ МГц, $P_H = 42$ мВт, $h_{21e} = 20$, $f_H = 14$ МГц, $U_{kmax} = 16$ В,

$I_{kmax} = 14$ мА, $P_{kmax} = 110$ мВт, $S_K = 2 \frac{\text{мА}}{\text{В}}$, $S = 9 \frac{\text{мА}}{\text{В}}$, $U_{BE0} = 0,44$ В,

$R_H = 5,6$ Ом, $\eta_k = 0,69$, $\theta = 69^\circ$

Для розрахунку була використана модель транзистора BC847B, який має такі характеристики:

ВСТУП

На практиці дуже часто виникає необхідність отримати високочастотні коливання певної частоти та певної потужності. У цьому випадку доцільно застосовувати LC-генератори з незалежним збудженням (резонансний підсилювач потужності). Резонансні підсилювачі є досить простими у збиранні та налагодженні та недорогими. Як підсилювальний компонент можна використовувати транзистор. Їх можна збирати на досить великій кількості моделей транзисторів, що дає свободу у виборі комплектуючих.

У всіх радіоелектронних пристроях мають бути самостійні блоки, для генерування електричних коливань без дій ззовні. Для цих цілей використовують генератори сигналів, які є обов'язковим компонентом будь-якого радіоелектронного приладу. Генератор – це підсилювач із позитивним зворотнім зв'язком та який містить у собі коливальний контур. Найпростішим способом отримання гармонічних коливань є компенсація затухання сигналу у коливальному контурі за допомогою підсилювача.

Розділ 1

ЛС-ГЕНЕРАТОР ІЗ НЕЗАЛЕЖНИМ ЗБУДЖЕННЯМ

1.1 Теоретичні відомості

ЛС-генератор із незалежним збудженням ще називають резонансним підсилювачем потужності високої частоти.

Резонансний підсилювач потужності – підсилювач електричних коливань, який містить резонансний коливальний контур, внаслідок чого має великий коефіцієнт підсилення в достатньо вузькій полосі частот, яка знаходиться біля резонансної частоти, що дозволяє йому не тільки підсилювати сигнали, а й генерувати коливання із необхідними частотами.[3] Резонансний підсилювач дуже широко застосовується в радіотехніці, головним чином в якості малощумних вибіркового підсилювачів на вході радіоприймачів і потужних підсилювачів на виході радіопередавальних пристроїв. У якості навантаження у резонансному підсилювачі використовується коливальний контур. В схемі резонансного підсилювача зі спільним емітером в якості навантаження колектора використовують паралельний коливальний контур.

У підсилювачах електричних сигналів в основному застосовуються два варіанти включення підсилювального компонента (у нашому випадку біполярного транзистора): зі спільною базою та зі спільним емітером.

Підсилювачі зі спільним емітером в діапазоні метрових та хвиль із більшою довжиною хвилі дозволяють отримати найбільше підсилення потужності сигналу.

Підсилювачі зі спільною базою мають більшу стійкість до самозбудження, що не підходить для нашого завдання, тому у нашому випадку ми використаємо включення транзистора зі спільним емітером.

Резонансним підсилювачем електричних сигналів будемо називати підсилювач в якому в якості опору навантаження транзистора

використовується паралельний коливальний контур, налаштований в резонанс із частотою підсилюваних коливань.

Резонансні підсилювачі мають ряд переваг у порівнянні із RC-підсилювачами:

- Вхідна і вихідна ємність компенсуються налаштуванням контура в резонанс, тому опір навантаження може бути великим і забезпечувати велике підсилення, в той час як коефіцієнт підсилення RC-підсилювача внаслідок шунтуючого впливу ємностей на високих частотах зменшується.
- На опорі навантаження нема падіння постійної напруги, тому опір навантаження можна вибирати достатньо великим.
- Резонансний підсилювач має частотну вибірковість, яка визначається АЧХ контура навантаження.

Для отримання вихідних сигналів великої амплітуди доводиться працювати у режимах, коли змінні компоненти струмів і напруг сумірні з відповідними постійними компонентами, а сам підсилювальний сигнал зазнає сильних нелінійних спотворень. Це означає, що при поданні на вхід підсилювача (на базу транзистора) гармонічного сигналу вихідний (колекторний) струм буде зазнавати певної деформації й стане вже хоча й періодичним, але не гармонічним. Це можна трактувати як появу в колекторному струмі вищих гармонік від частоти вхідного сигналу.[1]

Оскільки у колі колектора стоїть коливальний контур, який знаходиться у резонансі із вхідним сигналом вищі гармоніки не попадуть в сигнал навантаження і ми отримаємо цю частоту у чистому вигляді.

1.2 Схема та розрахунок елементів LC-генератора

Розглянемо одну із можливих схем реалізації LC-генератора, яка була рекомендована у методичних вказівках до курсової роботи. Схема зображена на рис. 1.1

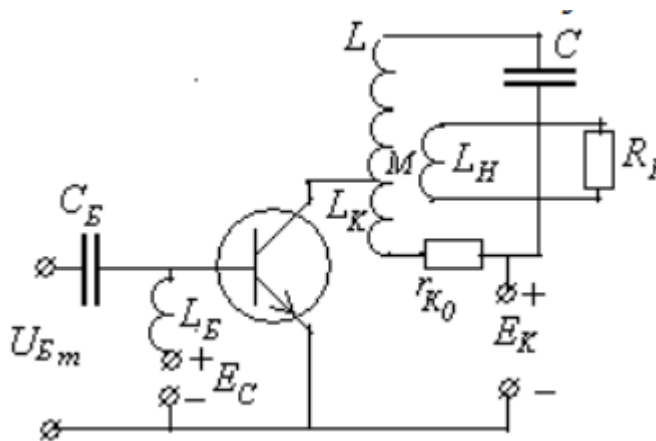


Рис. 1.1 Схема LC-генератора

У даній схемі U_{Bm} – джерело вхідного сигналу, ємність C_B виконує роль фільтра високих частот, не пропускаючи низькочастотні компоненти на базу транзистора, індуктивність L_B – виконує роль фільтра низьких частот. До колектора транзистора у ролі навантаження підключено паралельний коливальний контур. Розрахуємо параметри елементів схеми для мого варіанту:

$$f = 0,84 \text{ МГц}, P_H = 42 \text{ мВт}, h_{21e} = 20, f_H = 14 \text{ МГц}, U_{kmax} = 16 \text{ В},$$

$$I_{kmax} = 14 \text{ мА}, P_{kmax} = 110 \text{ мВт}, S_K = 2 \frac{\text{мА}}{\text{В}}, S = 9 \frac{\text{мА}}{\text{В}}, U_{BE0} = 0,44 \text{ В},$$

$$R_H = 5,6 \text{ Ом}, \eta_k = 0,69$$

1.1 Не уся генерована транзистором потужність P доходить до навантажувального контуру R_H . Частина її витрачається на власному опорі контуру r_{k0} . Тому

$$P = \frac{P_H}{\eta_k} = \frac{42 \text{ мВт}}{0,69} = 60,1 \text{ мВт}$$

1.2 Напругу живлення по колектору обираємо дещо меншою від максимально допустимої. Нехай $E_K = 14$ В

1.3 Кут відсікання $\theta = 69^\circ$ (за варіантом)

1.4 Підраховуємо коефіцієнта Берга

$$\alpha_1(\theta) = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\theta - \sin(\theta) \cos(\theta)}{1 - \cos(\theta)} = 0,431$$

$$\alpha_0(\theta) = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\sin(\theta) - \sin(\theta) \cos(\theta)}{1 - \cos(\theta)} = 0,297$$

1.5 Для того, щоб не потрапити у режим насичення транзистора, амплітуда коливань на колекторі

$$\xi_{KP} = 1 - \frac{2P}{E_K^2 \cdot S \cdot \alpha_1(\theta)} = 0,84$$

1.6 Амплітуда коливань на колекторі:

$$U_{km} = E_K \cdot \xi_{KP} = 0,84 \cdot 14 = 11,76 \text{ В}$$

1.7 Амплітуда першої гармоніки струму у колі колектора:

$$I_{K1} = \frac{2P}{U_{km}} = 10,22 \text{ мА}$$

1.8 Максимальна величина струму колектора:

$$I_{Km} = \frac{I_{K1}}{\alpha_1(\theta)} = 23,7 \text{ мА}$$

Для обраної моделі транзистора величина розрахованого струму набагато менша за максимально допустиму.

1.9 Постійна компонента колекторного струму:

$$I_{K0} = I_{Km} \cdot \alpha_0(\theta) = 7,04 \text{ мА}$$

1.10 Потужність живлення по колектору

$$P_0 = E_K \cdot I_{K0} = 98 \text{ мВт}$$

З неї $P = 60,1$ мВт віддаються у контур. На колекторі розсіюється потужність $P_K = P_0 - P = 37,9$ мВт. Це набагато менше від P_{kmax}

1.11 Опір контуру (в точці приєднання до колектора транзистора)

$$R_K = \frac{U_{km}}{I_{K1}} = \frac{11,76 \text{ В}}{10,22 \text{ мА}} = 1,15 \text{ кОм}$$

1.12 Амплітуда напруги на базі

$$U_{Бm} = \frac{I_{Km}}{(1 - \cos(\theta)) \cdot S} = 0,41 \text{ В}$$

1.13 Напруга зміщення по базі

$$U_{БЕ0} = U_{БЕ}^* - U_{Бm} \cdot \cos(\theta) = 0,65 \text{ В}$$

1.14 Нехай ємність контуру дорівнює 500 пФ

1.15 Індуктивність контуру

$$L = \frac{1}{\omega^2 C} = 71,8 \text{ мкГн}$$

1.16 Нехай добротність ненавантаженого контуру $Q_0 = 70$

1.17 Власний опір контуру

$$r_{K0} = \frac{\omega L}{Q_0} = 5,4 \text{ Ом}$$

1.18 Опір, що вноситься у контур навантаженням

$$r_{\text{внос}} = r_{K0} \frac{\eta_k}{1 - \eta_k} = 12 \text{ Ом}$$

Таким чином, загальний опір у контурі: $r_K = 17,4 \text{ Ом}$

1.19 Еквівалентний опір та добротність навантаженого контуру

$$R_{\text{екв}} = \frac{L}{r_K C} = 8,2 \text{ кОм}$$

$$Q = \frac{\omega L}{r_K} = 21,8$$

1.20 Коефіцієнт автотрансформації для узгодження контуру з транзистором

$$m = \frac{L_K}{L} = \sqrt{\frac{r_K}{R_{\text{екв}}}} = 0,04$$

$$L_K = 2,87 \text{ мкГн}$$

1.21 Коефіцієнт взаємодукції M між контуром і навантажувальним опором

$$M = \frac{1}{\omega} \sqrt{r_{\text{внос}} \cdot R_H} = 1,56 \text{ мкГн}$$

1.22 Обираємо коефіцієнт зв'язку з навантаженням. Нехай $k_{зв} = 0,15$

1.23 Індуктивність у контурі зв'язку

$$L_H = \frac{M^2}{L \cdot k_{зв}} = 0,23 \text{ мкГн}$$

1.24 Перша гармоніка у струмі бази

$$I_{Б1} = \frac{I_{К1}}{h_{21E}} = \frac{10,22 \text{ мА}}{290} = 0,04 \text{ мА}$$

1.25 Опір базового коло по вхідному сигналу

$$R_B = \frac{U_{Бm}}{I_{Бm}} = \frac{0,41 \text{ В}}{0,04 \text{ мА}} = 10,25 \text{ кОм}$$

1.26 Ємність вхідного конденсатора

$$C_B = \frac{10}{\omega R_B} = 185 \text{ пФ}$$

1.27 Індуктивність у колі бази

$$L_B = \frac{10R_B}{\omega} = 19 \text{ мГн}$$

1.3 Комп'ютерне моделювання роботи схеми

Комп'ютерне моделювання схеми було виконано за допомогою програмного забезпечення LTSpice. У програмі схема матиме такий вигляд:

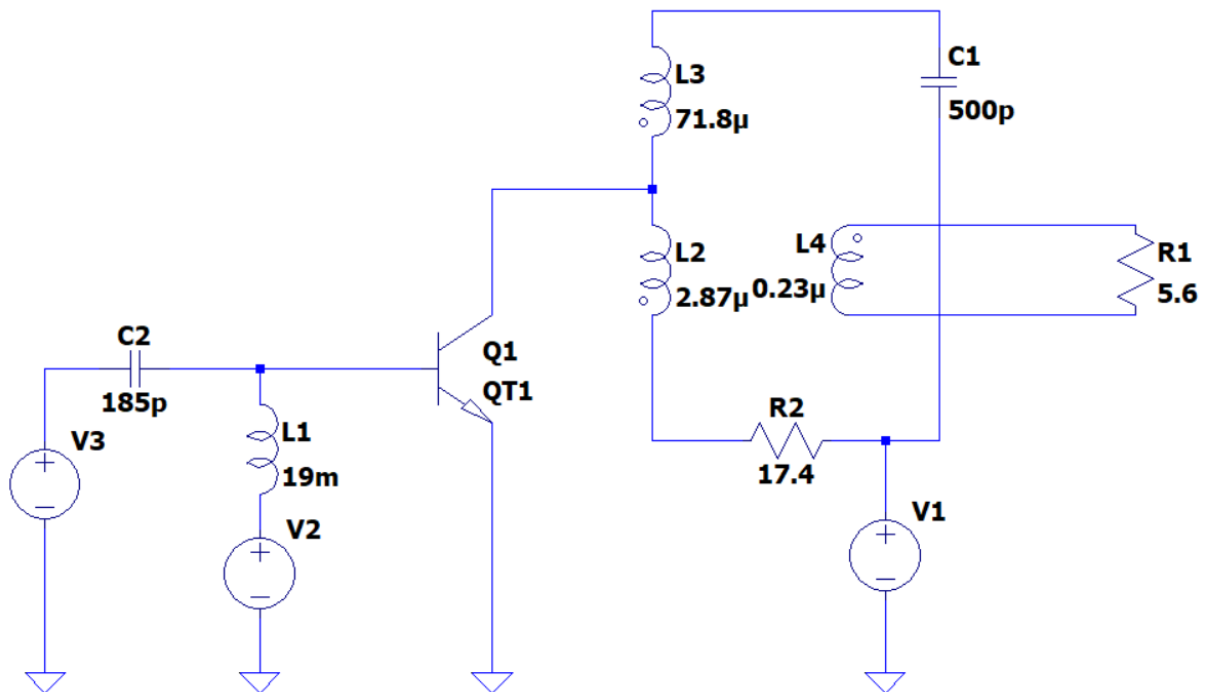


Рис. 1.2 Схема у програмі LTSpice

Проведемо аналіз роботи схеми за допомогою аналізу перехідних процесів середовища LTSpice (Transient). Побудуємо осцилограми вихідного сигналу на опорі навантаження, та порівняємо потужність, яка на ньому виділяється із заданою в варіанті.

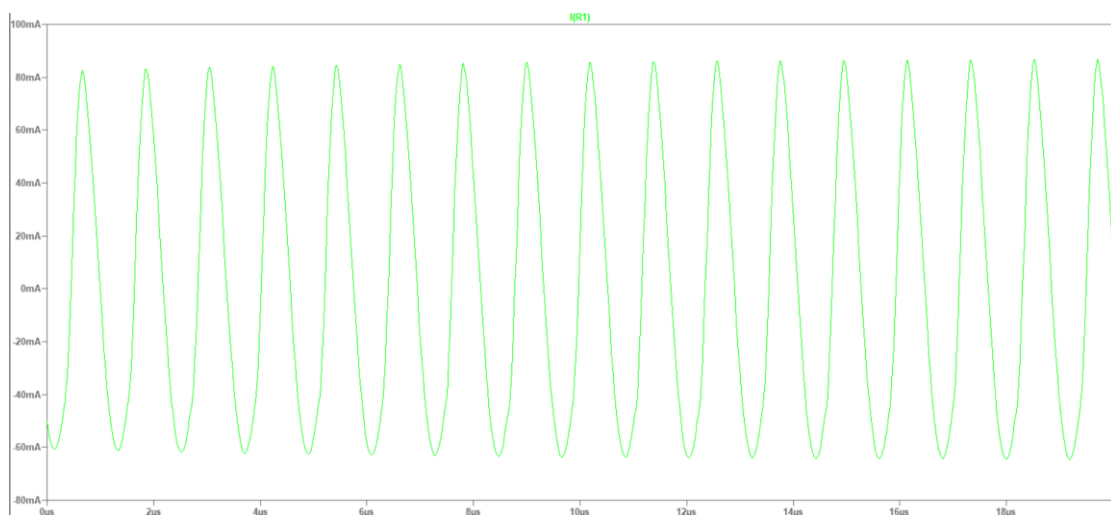


Рис. 1.3 Осцилограма на опорі навантаження

Як бачимо, на виході маємо гармонічний сигнал без впливу гармонік. Амплітуда струму має таке значення:

Значення струму на опорі навантаження $I_H = 85,4$ мА. Таким чином потужність, яка виділяється:

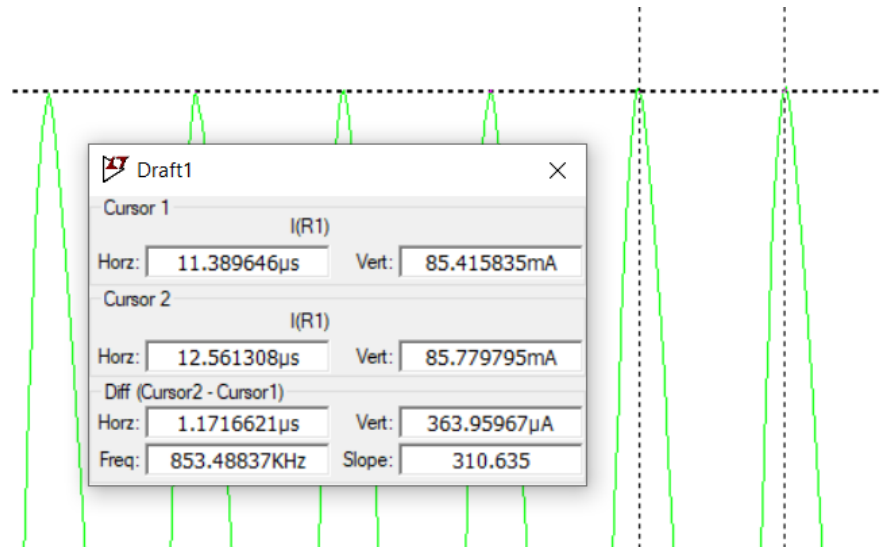


Рис. 1.4 Амплітуда та частота сигналу на виході

$$P_{\text{Нексп}} = R_H \cdot I_H^2 = 41 \text{ мВт}$$

Значення потужності збігається із завданням для варіанту. Також можна бачити, що частота сигналу співпала із частотою початкового сигналу.

Розділ 2

LC-АВТОГЕНЕРАТОР

2.1 Теоретичні відомості

Автогенератор (генератор із самозбудженням) – радіоелектронний пристрій, у якому спонтанно (без впливу ззовні) виникають і встановлюються періодичні коливання. [1]

Розглянемо принцип роботи автогенератора.

Автогенератор можна побудувати, якщо скористатися буд-яким нелінійним пристроєм (двополюсником) на вольт-амперній характеристиці якого існує ділянка з негативною диференціальною провідністю (рис 2.1). На цьому графіку видно, що в межах напруги від U_a до U_b струм I зменшується зі зростанням напруги, прикладеної до двополюсника:

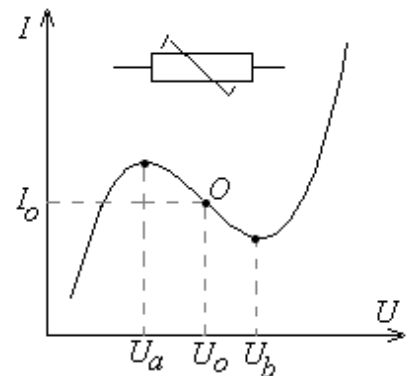


Рис. 2.1

$$\Delta I = -|G_d|\Delta U \quad U_a < U < U_b$$

$$\text{Де } G_d = \frac{dI}{dU} < 0$$

Якщо до такого двополюсника, встановленого у робочу точку «О», прикласти гармонічну напругу $U(t) = U_0 + v_m \sin(\omega t)$ (і при цьому витримати умову $v_m \ll U_0$), то змінна складова струму дорівнюватиме $i(t) = -|G_d|v_m \sin(\omega t)$ а потужність, що виділятиметься на цьому елементі, буде $P = -\frac{1}{2}|G_d|v_m^2$

Негативний характер потужності означатиме, що даний двополюсник не буде поглинати потужності, а, навпаки, буде виділяти її. Він стає не споживачем, а джерелом енергії коливань з частотою ω .

Слід однак відмітити, що стосовно до джерела живлення з напругою U_0 такий елемент являтиме собою позитивну омичну провідність $G_0 = \frac{I_0}{U_0}$ і

буде споживати потужність $P_0 = I_0 U_0 > 0$. Таким чином, подібний двополюсник буде являти собою пристрій, що перетворює енергію постійного струму у енергію електричних коливань і може вважатися джерелом (генератором) цих коливань.

Серед різних активних елементів зустрічаються такі, у яких на їх вольтамперних характеристиках існують ділянки з негативною диференціальною провідністю.

Прикладом такого елементу може бути обернено-зміщений $p-n$ перехід. При тепловому пробіі такого переходу на його вольтамперній характеристиці може виникнути ділянка з негативною диференціальною провідністю (рис. 2.2), яку можна використати для генерації високочастотних коливань.

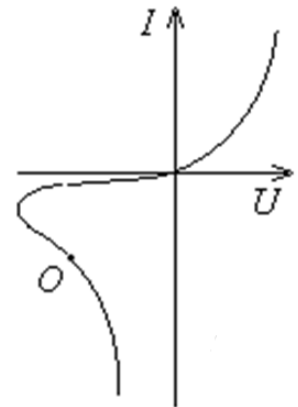


Рис. 2.2

Класичним прикладом пристрою з НДП є тунельний діод, який має вольтамперну характеристику подібну до зображеної на рис.2.2. Оскільки НДП тунельного діоду дуже велика, він звичайно підключається до коливного контуру автотрансформаторно

Але напівпровідникові діоди для створення високочастотних автогенераторів використовують досить рідко. Більш поширеними є схеми на транзисторах. Справа у тому, що інтервал існування негативною диференціальною провідності досить вузький, амплітуда генерованих коливань виходить невеликою, а коефіцієнт корисної дії – низьким.

Використовуючи схеми на транзисторах можна добитися кращих результатів створюючи негативну диференціальну провідність за допомогою активних пристроїв – транзисторів або електронних ламп, шляхом увімкнення їх у кола з позитивним зворотним зв'язком.

Розглянемо схеми, зображену на рисунку 2.3 мала місце генерація коливань, елемент з НДП, увімкнений паралельно до контуру, повинен пропускати максимальний струм в моменти, коли напруга на контурі найнижча. Навпаки, коли напруга на контурі максимальна, струм у колі має бути мінімальним.

Здійснити це можна, використовуючи як активний елемент транзистор і увімкнувши його так, щоб його колекторний струм примусово змінювався б у протифазі з прикладеною до нього

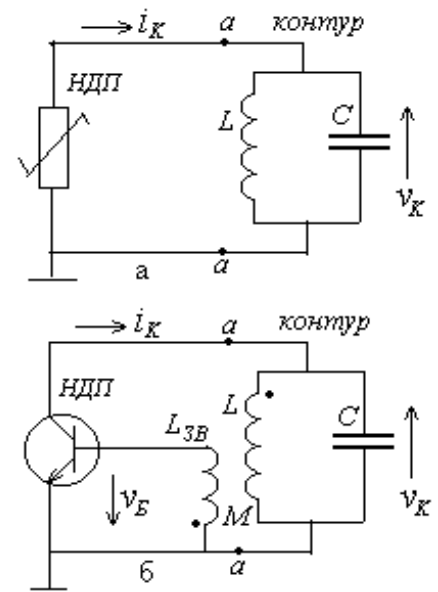


Рис. 2.3

напругою. Для керування колекторним струмом можна скористатися трансформаторною схемою (рис.2.3б), за допомогою якої на базу транзистора подається напруга пропорційна до контурної, але інвертована за фазою. Останнє можна забезпечити відповідним “оберненим” приєднанням кінців індуктивності зв’язку $L_{зв}$.

Зображена схема є не що інше як резонансний підсилювач охоплений позитивним зворотним зв’язком. Дійсно, вхідна напруга відтворюється на контурі інвертованою за фазою і підсиленою у k разів. Далі цей сигнал повертається на базу через трансформатор зазнавши поворот за фазою ще на 180° та послаблений у β разів. Цей поворот за фазою утворюється завдяки описаному вище з’єднанню кінців індуктивності $L_{зв}$, що забезпечує позитивний характер зворотного зв’язку і виконання фазової умови самозбудження. Що ж до амплітудної умови $k\beta > 1$, то вона має бути забезпеченою достатньою величиною коефіцієнта зворотного зв’язку β та коефіцієнта підсилення k .

У нашому випадку використане підключення транзистора зі спільним емітером та застосована автотрансформаторна схема.

2.2 Схема та розрахунок елементів LC-автогенератора

Була використана схема, рекомендована в методичних рекомендаціях до курсової роботи, а саме схема з трансформаторним зворотним зв'язком, транзистор включений за схемою зі спільним емітером. Схема має такий вигляд:

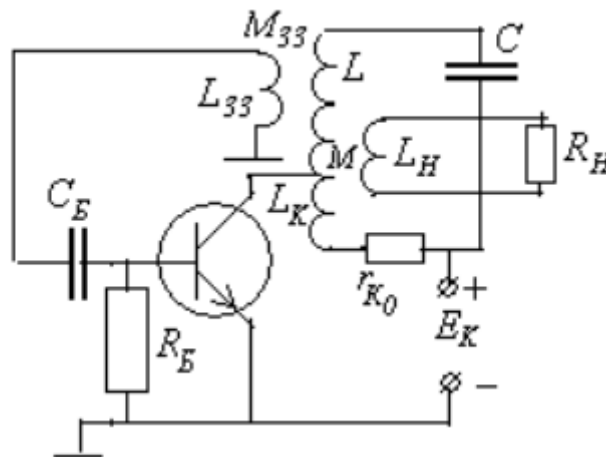


Рис. 2.4 схема LC-автогенератора

Деякі параметри ми можемо взяти із розрахунків для LC-генератора. Розрахуємо параметри зворотного зв'язку автогенератора.

2.1 Напруга зворотного зв'язку $U_{33} = U_{Бм}$ утворюється за рахунок взаємоіндукції M_{33} , яка трансформує напругу з індуктивності L у вхідне коло транзистора.

$$U_{33} = U_L \cdot \frac{M_{33}}{L} = \frac{U_{Km}}{m} \cdot \frac{M_{33}}{L}$$

$$M = \frac{U_{Бм}}{U_{Km}} mL = 0,1 \text{ мкГн}$$

2.2 Індуктивність котушки зворотно зв'язку L_{33}

$$k_{33} = \frac{M_{33}}{\sqrt{L L_{33}}}, \text{ нехай } k_{33} = 0,2$$

$$L_{33} = \frac{M_{33}^2}{k_{33}^2 L} = 700 \text{ пГн}$$

2.3 Постійна компонента струму бази

$$I_{Б0} = \frac{I_{K0}}{h_{21e}} = \frac{7,04 \text{ мА}}{20} = 0,352 \text{ мА}$$

2.4 Потрібна напруга зміщення бази U_{BE0} утворюється за рахунок протікання струму I_{B0} через опір R_B

$$R_B = \frac{U_{BE0}}{I_{B0}} = \frac{0,44 \text{ В}}{0,352 \text{ мА}} = 1,25 \text{ кОм}$$

2.5 Ємність СБ у колі бази ($X_{CB} = \frac{1}{\omega C_B} \ll R_B$, наприклад у 10 разів)

$$C_B = \frac{10}{\omega R_B} = 1500 \text{ пФ}$$

2.3 Комп'ютерне моделювання роботи схеми

У програмі LTSpice наша схема матиме такий вигляд:

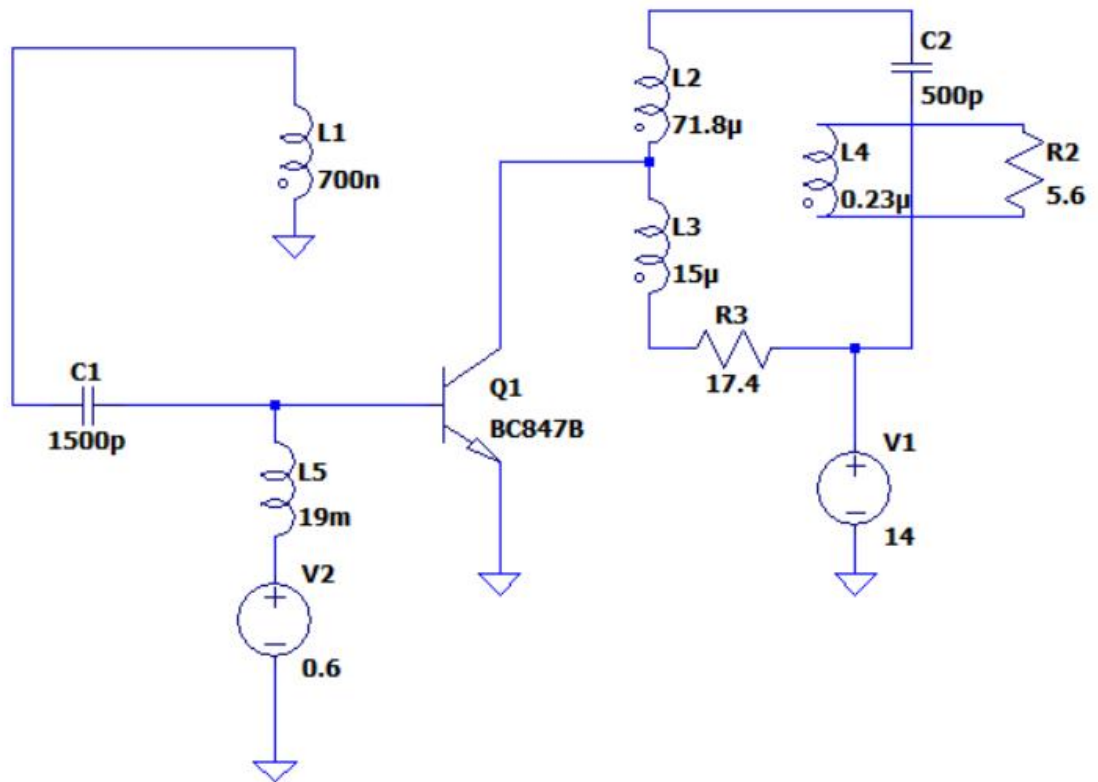


Рис. 2.5 схема LC-автогенератора в програмі LT-Spice

Номінали деяких елементів довелося змінити для стабільної роботи схеми. Розглянемо осцилограми на виході транзистора та на контурі навантаження.

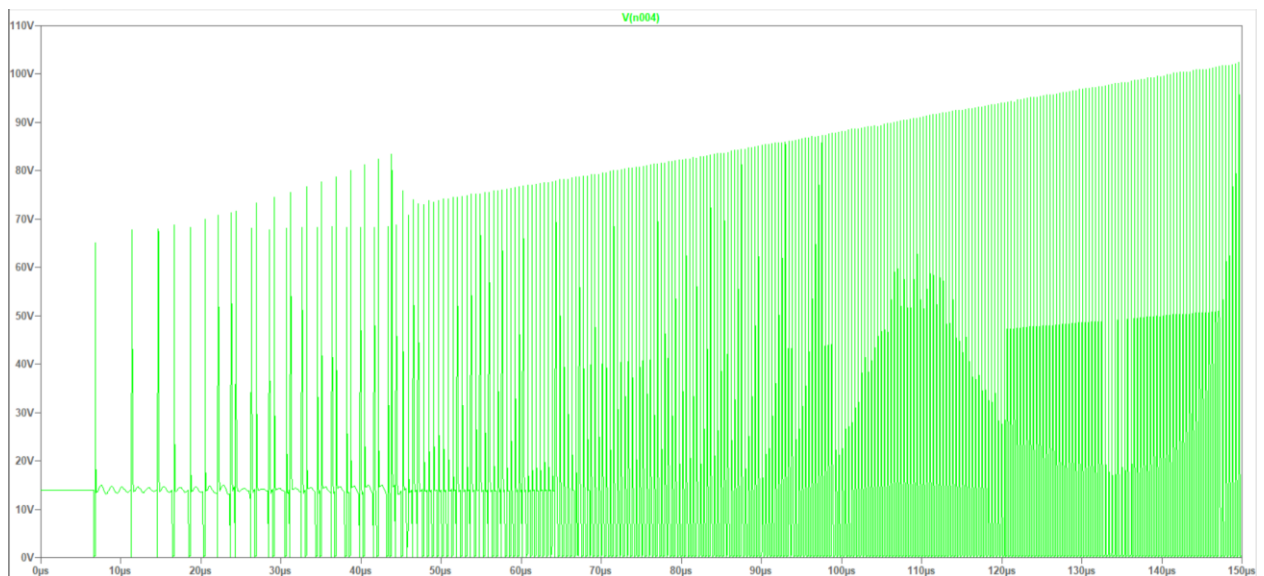


Рис. 2.6 Сигнал на колекторі транзистора

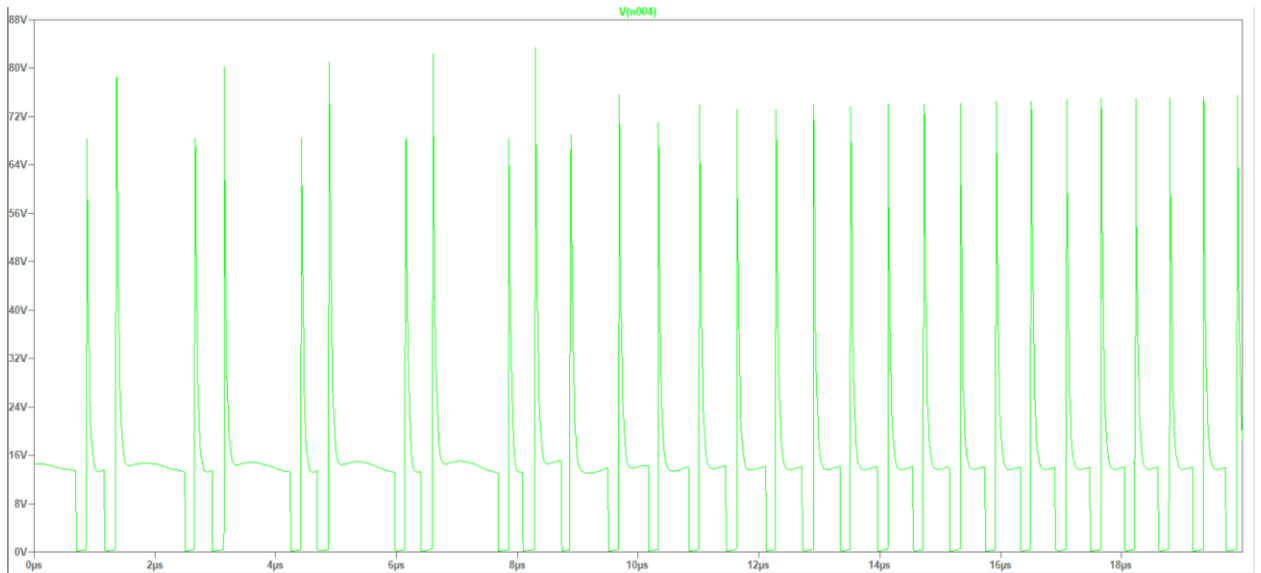


Рис. 2.7 Нелінійний характер сигналу на колекторі транзистора

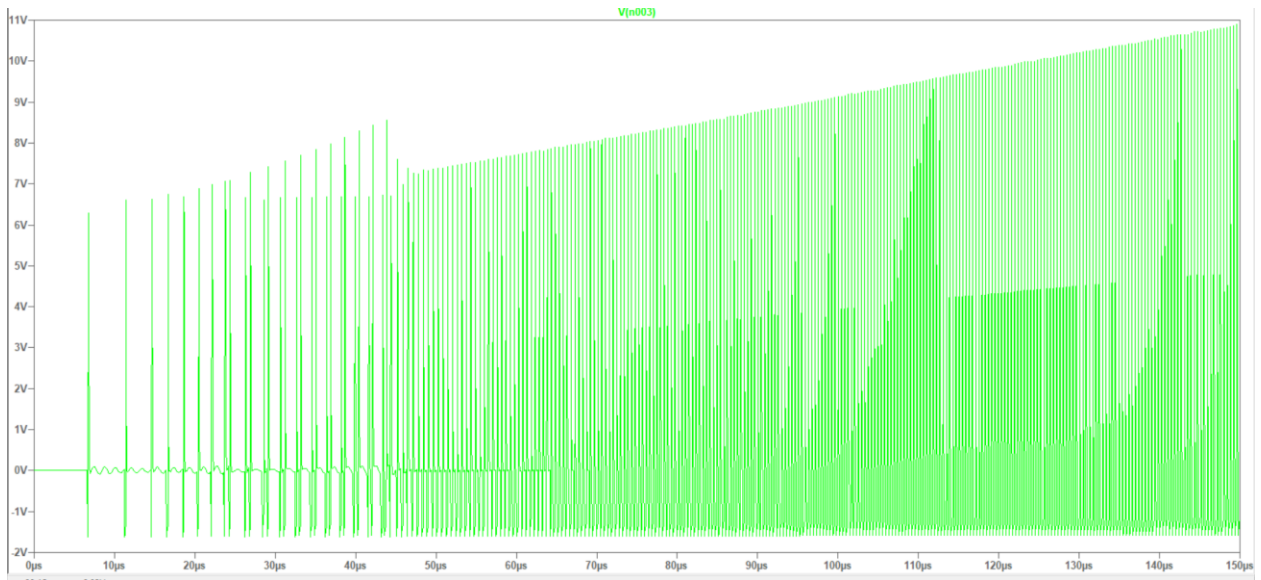


Рис 2.8 Сигнал на опорі навантаження

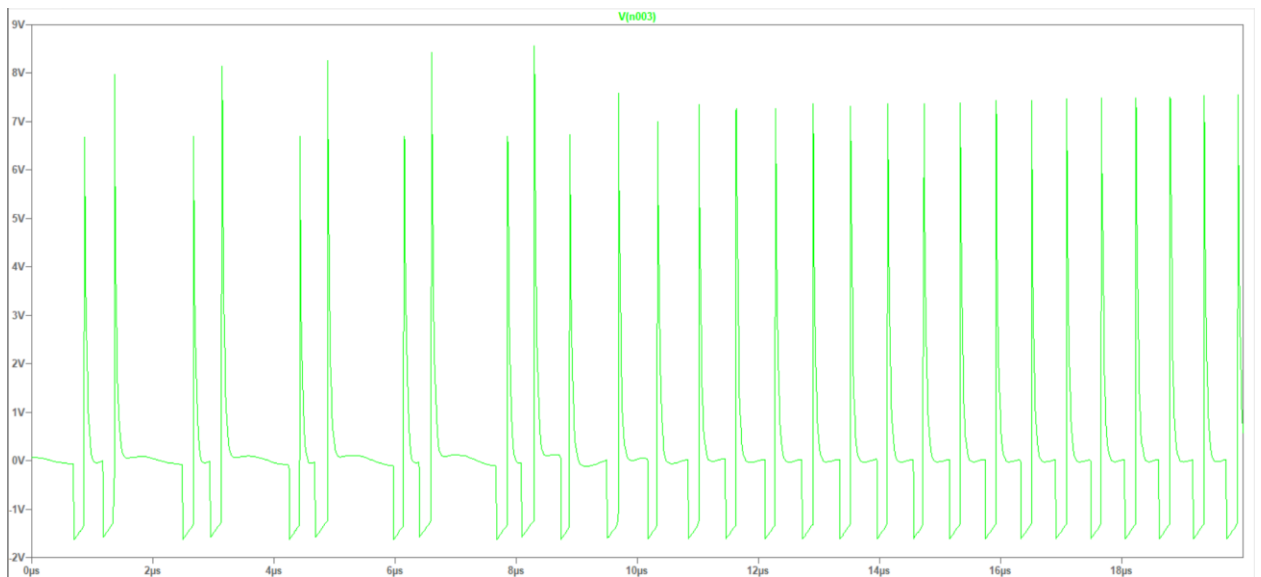


Рис 2.9 Нелінійний характер сигналу на виході

Як видно на рис. 2.6 амплітуда коливань зростає в геометричній прогресії, що є ілюстрацією амплітудної умови самозбудження автогенератора. Обмеження амплітуди пов'язане з моментами насичення транзистора – зростання коливань приводить до відкриття колекторного переходу, на якому відбувається витрачання енергії, запасеної в індуктивності, після чого частковий розряд ємності, до моменту закриття переходу, далі коливальний процес починається заново. Невизначена тривалість процесів, що відбуваються на колекторному переході має негативний вплив на стабільність частоти коливань.

ВИСНОВКИ

Метою даної курсової роботи було розрахунок та моделювання схем LC-генератора та LC-автогенератора. В результаті проведених розрахунків та комп'ютерного моделювання було отримано такі результати та зроблено такі висновки.

LC-генератор є дуже зручним та простим у розробці, налагодженні та використанні. Схема на одному транзисторі здатна забезпечувати підсилення сигналу дуже високої частоти та амплітуди. Була досягнута розрахована потужність сигналу на опорі навантаження схеми. Також були отримані осцилограми на опорі навантаження, які є гармонічними сигналами без впливу гармонік високочастотного вхідного сигналу.

LC-автогенератор можна використовувати для отримання сигналів високої частоти для великого діапазону вихідних амплітуд сигналу. При використанні різних транзисторів із різним коефіцієнтом передачі по струму можна отримати сигнали дуже великої амплітуди. Проте, через необмеженість коефіцієнта підсилення нашої схеми на вихідних осцилограмах спостерігаються сильні нелінійні спотворення, що є основним недоліком даної схеми.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Левицький С.М. Основи радіоелектроніки: Підручник – К., 2007.
2. Левицький С.М. Методичні рекомендації до виконання курсової роботи – К., 2017.
3. Корольов Г. В. Електронні пристрої автоматики: Навчальний посібник.— М.: Высш. шк.— 1991.
4. LC-автогенератори: веб-сайт URL: <https://conture.by/post/242>
5. Резонансний підсилювач: веб-сайт URL: <https://intellect.icu/rezonansnyj-usilitel-skhemy-rezonansnykh-usilitelej-479>