

ГЕНЕРАТОРИ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИГНАЛІВ НА С-НЕГАТРОНАХ

¹Вінницький національний технічний університет

Анотація

Проведений аналіз стійкості С-негатронів, запропоновані керовані напругою генератори гармонічних і релаксаційних коливань, у яких завдяки включенню у коло від'ємної ємності розширюється діапазон частот генерованих сигналів.

Ключові слова: генератор, коливання, негатрон, від'ємна диференційна ємність

Abstract

The analysis of the stability of C-negatrons; voltage-controlled generators of harmonic and relaxation oscillations in which extends the frequency range of the generated signals due to the inclusion of the negative capacitance to the circuit.

Keywords: generator, oscillations, negatron, negative differential capacity

Вступ

Електрично керовані генератори гармонічних і релаксаційних коливань часто застосовують у вимірювальних та передавальних приладах, для живлення певних пристроїв і т. д. Оскільки діапазон частот деяких схем генераторів, при наявності переваг перед іншими схемами, суттєво обмежений, постає питання його розширення.

Завдання роботи: розробка електрично керованих генераторів з коефіцієнтом переналаштування, розширеним завдяки використанню С-негатронів.

Визначення негатронів

Негатрони - електронні прилади, які в певному чи кількох режимах роботи мають від'ємне значення основного диференціального параметра (активного опору, індуктивності або ємності).

R-негатроном називають елемент, який має негативний диференційний опір (або провідність). R-негатрон здатний перетворювати енергію джерела живлення, у тому числі постійного струму, завдяки чому він може служити джерелом потужності змінного струму.

В залежності від виду вольт-амперної характеристики всі R- негатрони можна розділити на прилади, керовані напругою, що мають N-подібну вольт-амперну характеристику, і які можна характеризувати негативною провідністю, і прилади, керовані струмом, що мають S-подібну вольт-амперну характеристику, і які можна характеризувати негативним опором.

Оскільки вольт-амперні характеристики R-негатронів, керованих напругою, зображені в координатах (I; U), і R-негатронів, керованих струмом, зображені в координатах (U; I), мають подібний вигляд, між ними існує так звана дуальна аналогія, внаслідок чого ці негатрони називають дуальними. Вищерозглянуті поняття відносяться до двополюсних R-негатронів. У чотириполюсних приладів дуальними є вольт-амперні характеристики вхідного і вихідного кола. Негативний опір і негативна провідність як елементи електричного кола мають різні властивості, що зумовлює розбіжності в способах їхнього застосування і у способах включення в схеми, а при аналізі схем – використання різних систем параметрів.

С-негатрони - клас ємнісних елементів і їх схемотехнічних аналогів, у яких на певній ділянці кулон-вольтної характеристики $C \sim < 0$, тобто, вони мають "негативну диференціальну ємність".

Ці прилади можуть мати кулон-вольтну характеристику N- і S-типу, як і вольт-амперна характеристика R-негатронів.

Класифікація негатронів

Негатрони, що розроблені на даний час, можна класифікувати за такими ознаками, як принцип одержання від'ємного опору, основна характеристика і її вигляд, частотний діапазон, кількість виводів і т. д. Узагальнена класифікація негатронів наведена на рис. 1.1.

У статичних негатронів на основній характеристиці (вольт-амперна для R-негатронів, кулон-вольтна для C-негатронів, вебер-амперна для L-негатронів) є ділянка, де значення основного диференціального параметра від'ємне. За формою цієї характеристики вони поділяються на негатрони N- та S-типів. Динамічні негатрони мають від'ємне значення основного диференціального параметра в певному діапазоні частот.

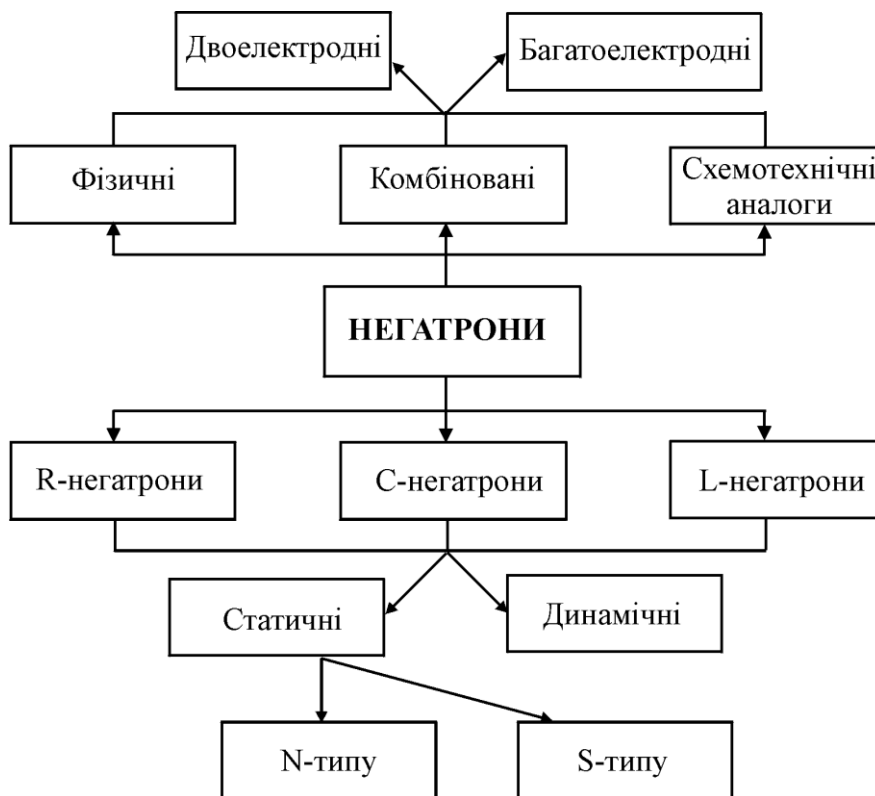


Рисунок 1.1 – Узагальнена класифікація негатронів

У фізичних негатронах зворотний зв'язок внутрішній, тобто забезпечується фізичними процесами, що мають місце всередині приладу, а не за рахунок передачі сигналу з виходу на вхід за допомогою зовнішнього кола. Наявність внутрішнього зворотного зв'язку робить ці прилади функціональними елементами.

Створення схемотехнічних аналогів негатронів на базі різних комбінацій активних приладів дозволяє в значній мірі зменшити недоліки, властиві фізичним негатронам.

Клас схемотехнічних аналогів негатронів, виконаних на транзисторах, можна умовно поділити на декілька груп (рис. 1.2) [1, 2].



Рисунок 1.2 - Узагальнена класифікація схемотехнічних аналогів негатронів

Умови стійкості електричних кіл із С-негатронами

Задача визначення умов стійкості електронних схем на основі С-негатронів обґрунтована наявністю у схемах від'ємної ємності. При цьому має сенс вивчення стійкості С-негатрона при наявності інших елементів кола, оскільки питання стійкості виникає тільки тоді, коли С-негатрон працює разом із зовнішнім колом. У цьому випадку потрібно з'ясувати, при яких опорах навантаження коло із С-негатроном залишається стійким. Аналіз стійкості кола, що містить С-негатрон, проведемо шляхом визначення коренів характеристичного рівняння кола.

Стійкість електричного кола з С-негатронами N-типу

Найпростішу еквівалентну схему С-негатрона N-типу з врахуванням навантаження представимо у вигляді, що подано на рис. 1.3.

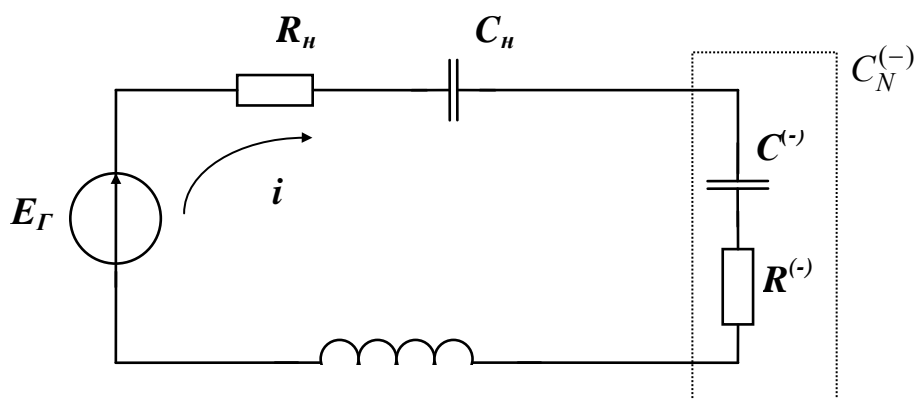


Рисунок 1.3 – Еквівалентна схема навантаженого С-негатрона N-типу. R_n – загальний активний опір навантаження і внутрішнього опору джерела живлення; C_n – ємність навантаження; L – сумарна індуктивність навантаження С-негатрона; $C^{(-)}$ – від'ємна диференційна ємність С-негатрона; $R^{(-)}$ – від'ємний диференційний активний опір С-негатрона N-типу

Схема описується такими рівняннями Кірхгофа:

$$E_{\Gamma} = iR + u_C + L \frac{di}{dt}, \quad (2.8)$$

де $R = R_n + R^{(-)}; \quad (2.9)$

$$u_C = u_{C_n} + u_{C^{(-)}};$$

$$i = C \frac{du_C}{dt}; \quad (2.10)$$

$$C = \frac{C_n \cdot C^{(-)}}{C_n + C^{(-)}}. \quad (2.11)$$

З врахуванням (2.9)–(2.11), рівняння (2.8) запишемо в такому вигляді:

$$\frac{d^2 u_C}{dt^2} + \frac{R_n + R^{(-)}}{L} \frac{du_C}{dt} + \frac{u_C}{L \frac{C_n \cdot C^{(-)}}{C_n + C^{(-)}}} = \frac{E_{\Gamma}}{L \frac{C_n \cdot C^{(-)}}{C_n + C^{(-)}}}. \quad (2.12)$$

Взявши до уваги (2.12) робимо припущення, що $C^{(-)}$ і $R^{(-)}$ є лінійними елементами, що є справедливим для малого сигналу.

У цьому випадку характеристичне рівняння для (2.12) має вигляд

$$\lambda^2 + \sigma\lambda + p = 0, \quad (2.13)$$

де $\sigma = \frac{R_n + R^{(-)}}{L}, \quad (2.14)$

$$p = \frac{C_n + C^{(-)}}{LC_n C^{(-)}}, \quad (2.15)$$

$$\lambda_{1,2} = -\frac{\sigma}{2} \pm \sqrt{\frac{\sigma^2}{4} - p}, \quad (2.16)$$

$\lambda_{1,2}$ – корені характеристичного рівняння.

Розв'язок неоднорідного диференціального рівняння (2.12) буде мати вигляд

$$u_C = Ae^{\lambda_1 t} + Be^{\lambda_2 t} + E_{\Gamma}. \quad (2.17)$$

Напруга на від'ємній ємності $C^{(-)}$

$$u_{C^{(-)}} = \frac{u_C C_n}{C^{(-)} + C_n}.$$

Для аналізу стійкості схеми, зображеної на рис. 2.4, потрібно визначити стани рівноваги і їх стійкість. У стані рівноваги фазові швидкості струму і напруги дорівнюють нулю, тобто

$$\frac{di}{dt} = 0 \text{ і } \frac{du}{dt} = 0. \quad (2.18)$$

Підставивши в (2.8) вираз (2.18) отримуємо

$$E_{\Gamma} = u_C \text{ або } u_{C^{(-)}} = E_{\Gamma} - u_{C_n}.$$

Оскільки $u_{C_n} = \frac{q_{C_n}}{C_n}$ і при послідовному з'єднанні конденсаторів їхні заряди рівні, тобто

$q_{C^{(-)}} = q_{C_n}$, то рівняння навантажувальної прямої запишеться у вигляді

$$q(u) = (E_r - u)C_n.$$

Таким чином, стани рівноваги є точками перетину кулон-вольтної характеристики С-негатрона N-типу з прямою навантаження. Таких точок перетину може бути або одна, або три (рис. 2.5). У випадку, якщо $|C^{(-)}| > C_n$, навантажувальна пряма (рис. 1.4а) перетинає кулон-вольтну характеристику в трьох точках (три стани рівноваги). Якщо $|C^{(-)}| < C_n$, то існує тільки один стан рівноваги (рис. 1.4б).

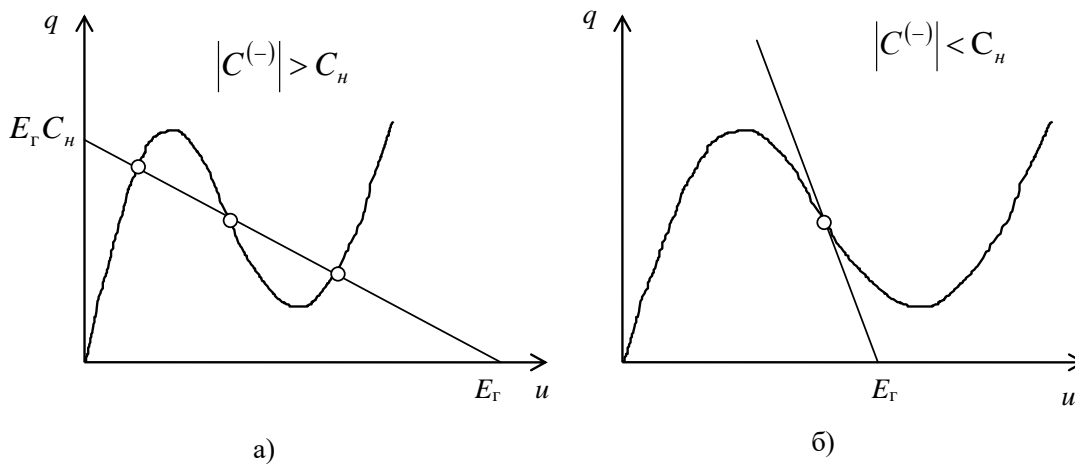


Рисунок 1.4 – Можливі стани рівноваги С-негатронів N-типу

Про стійкість у цих точках можна судити за коренями характеристичного рівняння λ_1 і λ_2 . Якщо λ_1 і λ_2 дійсні, то з (2.17) видно, що при $\lambda_{1,2} < 0$ будь-яке початкове відхилення в системі згасає за експоненціальним законом, а при $\lambda_{1,2} > 0$ – зростає. Якщо корені характеристичного рівняння – комплексні величини ($\lambda_{1,2} = a + jb$), то в системі можливі синусоїдальні коливання, причому при $a > 0$ коливання, що виникли, будуть наростати, а при $a < 0$ – згасати.

Отже, стан системи буде стійким, якщо дійсні частини коренів характеристичного рівняння (2.13) будуть від’ємними. Для цього за теоремою Рауса–Гурвіца для систем другого порядку досить, щоб виконувалися одночасно дві умови:

$$\sigma > 0; \quad p > 0. \quad (2.19)$$

Коефіцієнти σ і p залежать від параметрів схеми. З (2.14) і (2.15) видно, що для постійного L виконання чи невиконання умов (2.15) залежить від R_n , C_n , $R^{(-)}$ і $C^{(-)}$. Диференційна від’ємна ємність $C^{(-)}$ і активний від’ємний опір $R^{(-)}$ С-негатрона змінюються зі зміною напруги зміщення. Тому при зміні опорів і ємності навантаження або напруги зміщення С-негатрона N-типу змінюється режим роботи схеми. Ми розглядатимемо тільки інтервал напруг зміщення, у якому диференційна ємність і активний опір С-негатрона від’ємні ($C^{(-)} < 0$, $R^{(-)} < 0$), тобто тільки стани рівноваги на ділянці від’ємної ємності кулон-вольтної характеристики С-негатрона N-типу.

Розглянемо стани рівноваги схеми при різних співвідношеннях σ і p , тобто залежно від співвідношення величин C_n , R_n , $C^{(-)}$, $R^{(-)}$. З виразів (2.13)–(2.15) видно, що можна записати чотири граничних умови, при яких рівняння, що складаються, (2.15) і підкореневий вираз в (2.16) перетворюються в нуль:

$$1) \quad p = \frac{C_n + C^{(-)}}{LC_n C^{(-)}} = 0, \quad (2.20)$$

якщо $C_n = -C^{(-)}$.

$$2) \quad \sigma = \frac{R_n + R^{(-)}}{L}, \quad (2.21)$$

якщо $R_n = -R^{(-)}$.

$$3) \quad \frac{\sigma^2}{4} - p = 0, \quad (2.22)$$

$$\text{якщо} \quad C_n = \frac{4L}{(R_n + R^{(-)})^2 - 4L/C^{(-)}}.$$

$$4) \quad \frac{\sigma^2}{4} - p = 0, \quad (2.23)$$

$$\text{якщо} \quad R_{n,2} = -R^{(-)} \pm 2\sqrt{\frac{L(C_n + C^{(-)})}{C_n C^{(-)}}}. \quad (2.24)$$

Для граничних умов (2.22) і (2.23) існує розв'язок тільки для випадку, коли $p \geq 0$.

Оскільки виконання чи невиконання умов стійкості (2.19) залежить від співвідношення двох пар параметрів: $C_n, C^{(-)}$ і $R_n, R^{(-)}$, то діаграми стійкості будуть відображені також на двох площинах параметрів.

На графіку з осями координат C_n і $C^{(-)}$, рівнянню (2.20) відповідає пряма, що виходить з початку координат під кутом 45° , рівнянню (2.22) – гіпербола, що проходить через початок координат (рис. 1.5а).

На графіках з осями координат R_n і $R^{(-)}$ рівнянню (2.21) відповідає пряма, що виходить з початку координат під кутом 45° (рис. 1.5б, в), рівнянню (2.23) – дві прямі, що виходять під кутом 45° із точок

$$(0; 2\sqrt{\frac{L(C_n + C^{(-)})}{C_n C^{(-)}}}) \text{ і } (-2\sqrt{\frac{L(C_n + C^{(-)})}{C_n C^{(-)}}}; 0) \text{ (рис. 1.5в)}.$$

Для співвідношення величин R_n і $R^{(-)}$ можливі два випадки:

1) При $p < 0$, що дійсно при $|C^{(-)}| < C_n$, підкореневий вираз в (2.16) $\left(\frac{\sigma^2}{4} - p\right)$ завжди

більший нуля, при цьому гранична умова (2.23) розв'язку не має. Цей випадок зображено на рис. 1.5б.

2) При $p > 0$, що справедливо при $|C^{(-)}| > C_n$, гранична умова (2.23) має розв'язок (2.24). Цей

випадок подано на рис. 1.5в.

Області I на площині параметрів $C^{(-)} C_n$ відповідають дві області на площині параметрів $R^{(-)} R_n$ – Ia і Ib. Області II на площині параметрів $C^{(-)} C_n$ відповідають дві області (IIa і IIб) на площині параметрів $R^{(-)} R_n$. Області III на площині параметрів $C^{(-)} C_n$ відповідають дві області (IIIa і IIIб) на площині параметрів $R^{(-)} R_n$.

Таким чином, на діаграмі стійкості C-негатрона N-типу (рис. 2.6) існує шість різних областей (Ia, Ib, IIa, IIб, IIIa, IIIб), що визначають режим роботи C-негатрона.

Область Ia

$$\sigma > 0 \text{ або } R_n > |R^{(-)}|,$$

$$p < 0 \text{ або } C_n > |C^{(-)}|,$$

$$\sqrt{\frac{\sigma^2}{4} - p} > \frac{\sigma}{2}.$$

Корені характеристичного рівняння λ_1 і λ_2 – дійсні числа, причому $\lambda_1 > 0$, а $\lambda_2 < 0$. Отже, перший член рівняння (2.17) буде зростати за експоненціальним законом, а другий – зменшуватися. Оскільки в цій області $C_n > |C^{(-)}|$, то можливий тільки один стан рівноваги (див. рис. 2.5). Оскільки один з коренів характеристичного рівняння додатний, то єдиний стан рівноваги буде нестійким. Схема буде працювати в режимі генерації релаксаційних коливань.

Область Іб

$$\sigma < 0 \text{ або } R_n < |R^{(-)}|,$$

$$p < 0 \text{ або } C_n > |C^{(-)}|,$$

$$\frac{\sigma^2}{4} - p > 0.$$

Корені характеристичного рівняння λ_1 і λ_2 – дійсні числа, причому $\lambda_1 > 0$, а $\lambda_2 < 0$. Отже, перший член рівняння (2.17) буде зростати за експоненціальним законом, а другий – зменшуватися. Оскільки в цій області $C_n > |C^{(-)}|$, то можливий тільки один стан рівноваги. Враховуючи те, що один з коренів характеристичного рівняння додатний, то єдиний стан рівноваги буде нестійким. Схема буде працювати в режимі генерації релаксаційних коливань.

Область Па

$$\sigma > 0 \text{ або } R_n > |R^{(-)}|,$$

$$p > 0 \text{ або } C_n < |C^{(-)}|,$$

$$\frac{\sigma^2}{4} - p > 0.$$

Корені характеристичного рівняння λ_1 і λ_2 – дійсні і від’ємні числа. Обидва експонентних члени рівняння (2.17) зменшуються з часом. Оскільки $C_n < |C^{(-)}|$, то можливі три стани рівноваги, причому на ділянці від’ємної ємності стан рівноваги стійкий. Схема може працювати як нелінійний елемент (детектор, перетворювач, змішувач, обмежувач) з підсиленням.

Область Пб

$$\sigma < 0 \text{ або } C_n < |C^{(-)}|,$$

$$p > 0 \text{ або } C_n < |C^{(-)}|,$$

$$\frac{\sigma^2}{4} - p > 0.$$

Корені λ_1 і λ_2 – дійсні додатні числа. Два перших члени рівняння (2.17) зростають з часом за експоненціальним законом. Оскільки $C_n < |C^{(-)}|$, то можливі три стани рівноваги, причому стан рівноваги на ділянці від’ємної ємності є нестійким. Два інших стани рівноваги будуть стійкими, тому що в них $C^{(-)} > 0$ і обидва коефіцієнти σ і p додатні. Таким чином, в області Пб схема працюватиме в режимі перемикання.

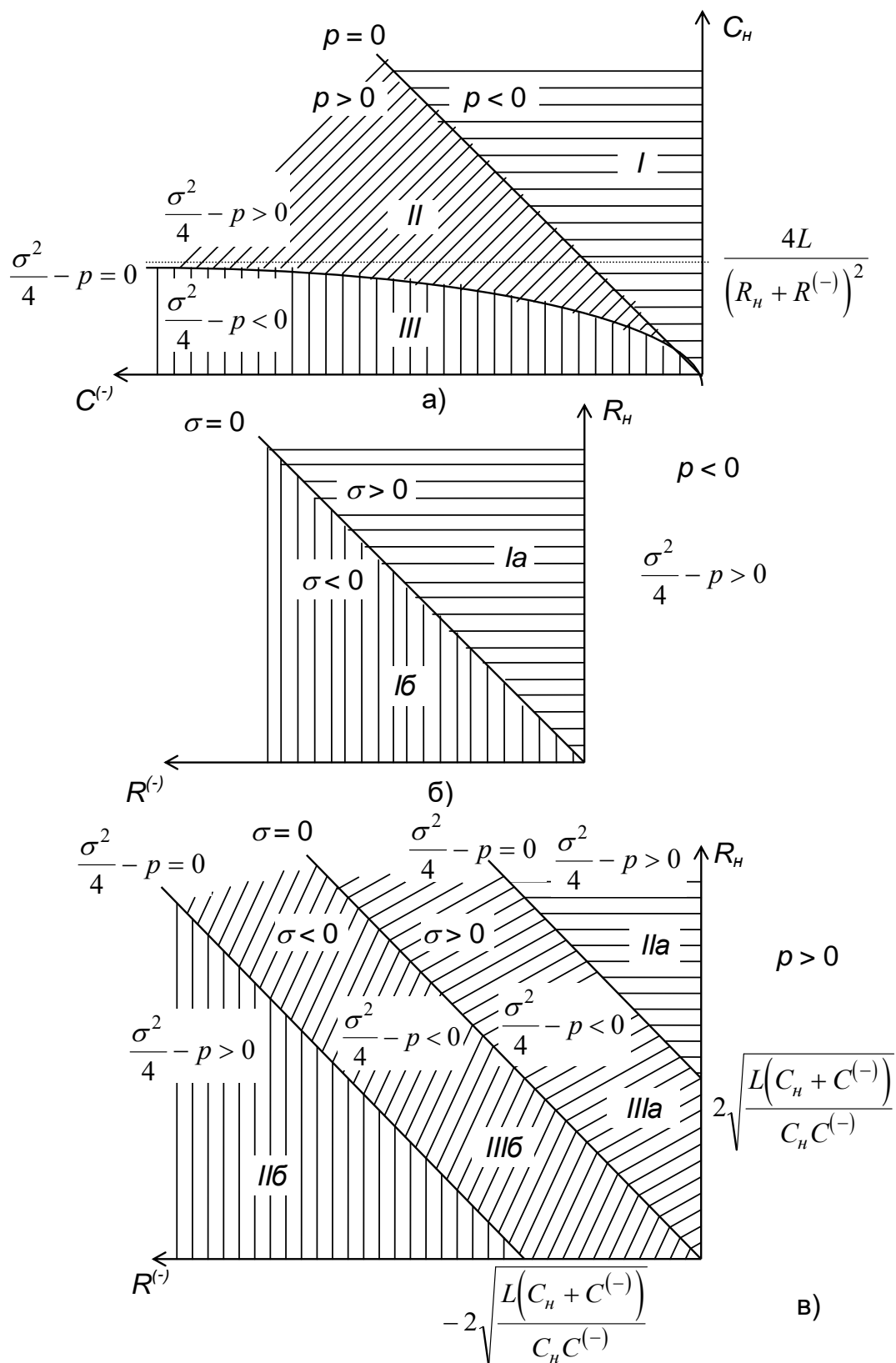


Рисунок 1.5 – Діаграми стійкості, що визначають режим роботи C-негатрона N-типу

Область Ша

$$\begin{aligned}\sigma > 0 \text{ або } R_n > |R^{(-)}|, \\ p > 0 \text{ або } C_n < |C^{(-)}|, \\ \frac{\sigma^2}{4} - p < 0.\end{aligned}$$

Корені λ_1 і λ_2 – комплексні числа з від’ємною дійсною частиною. Отже, відповідно до (2.17), у системі матиме місце коливальний процес, що згасає за експоненційним законом. Оскільки $C_n < |C^{(-)}|$, то можливі три стани рівноваги, причому стан рівноваги на ділянці від’ємної ємності нестійкий. Схема працюватиме в режимі підсилення.

Область ШБ

$$\begin{aligned}\sigma < 0 \text{ або } R_n < |R^{(-)}|, \\ p > 0 \text{ або } C_n < |C^{(-)}|, \\ \frac{\sigma^2}{4} - p < 0.\end{aligned}$$

Корені λ_1 і λ_2 – комплексні числа з додатною дійсною частиною. Отже, два перших члени в рівнянні (2.17) описують періодичний процес, амплітуда якого зростає за експоненційним законом. Оскільки $C_n < |C^{(-)}|$, то можливі три стани рівноваги, причому стан рівноваги на ділянці від’ємної ємності є нестійким. Схема працюватиме в режимі перемикавання.

Таким чином, режим роботи схеми з С-негатроном N-типу залежить від ємності й активного опору навантаження, величини від’ємної ємності і від’ємного активного опору негатрона. Вибираючи відповідним чином ємність і активний опір навантаження і напругу зміщення, що визначає величину $C^{(-)}$ і $R^{(-)}$, можна отримати такі режими роботи:

- а) генерація релаксаційних коливань – області Іа і Іб;
- б) детектування (змішування, обмеження) з підсиленням – область Іа;
- в) перемикавання – області Іб і ІБ;
- г) підсилення – область Іа.

З наведеного вище аналізу стійкості випливає, що схема буде абсолютно стійкою при одночасному виконанні умов

$$C_n < |C^{(-)}|, \quad (2.25)$$

$$R_n > |R^{(-)}|. \quad (2.26)$$

При невиконанні умови (2.25), незалежно від того, виконується чи не виконується умова (2.26), схема працюватиме в режимі генерації релаксаційних коливань.

При виконанні умови (2.25) і невиконанні умови (2.26), схема буде працювати в режимі перемикавання.

У схемі можуть виникнути синусоїдальні коливання тільки на резонансній частоті навантаженого С-негатрона N-типу, якщо при цьому дійсна частина повного опору буде меншою або дорівнюватиме нулю.

Повний опір схеми, зображеної на рис. 1.3, дорівнює:

$$Z = R_n + R^{(-)} + j\omega L - j \frac{1}{\omega \frac{C_n C^{(-)}}{C_n + C^{(-)}}}.$$

При

$$\omega L - \frac{C_n + C^{(-)}}{\omega C_n C^{(-)}} = 0 \quad (2.27)$$

у схемі настає резонанс.

Виконання умови (2.27) можливе тільки, якщо $C_n < |C^{(-)}|$. При цьому резонансна частота дорівнює

$$\omega_p = \sqrt{\frac{C_n + C^{(-)}}{L C_n C^{(-)}}}.$$

На цій частоті в схемі виникнуть синусоїдальні коливання, якщо дійсна частина повного опору буде меншою або дорівнюватиме нулю:

$$R_n + R^{(-)} \leq 0 \text{ або } R_n \leq |R^{(-)}|.$$

Зважаючи на те, що при цьому існує три стани рівноваги ($C_n < |C^{(-)}|$), і при $R_n < |R^{(-)}|$ стан рівноваги на ділянці від'ємної ємності нестійкий, схема буде працювати в режимі перемикачів (області Пб і ПІб). При $R_n = |R^{(-)}|$ схема знаходиться на межі стійкості, і в схемі можуть існувати незатухаючі гармонічні коливання. При $R_n > |R^{(-)}|$ ці коливання будуть згасати (область Па).

Стійкість електричного кола з С-негатронами S-типу

У випадку використання С-негатрона S-типу, його найпростішу еквівалентну схему з врахуванням навантаження представимо у вигляді, що подано на рис. 1.6.

Схема на рис. 1.6 описується таким характеристичним рівнянням, знайденим операторним методом:

$$\frac{1}{\frac{1}{pC_n} + pL + R_n} + \frac{1}{\frac{1}{pC^{(-)}} + R} = 0. \quad (2.28)$$

При виведенні (2.28) зроблено припущення, що $C^{(-)}$ і R є лінійними елементами, що справджується для малого сигналу.

Після перетворення (2.28) маємо:

$$p^2 + p \frac{R_n + R}{L} + \frac{C_n + C^{(-)}}{C_n C^{(-)} L} = 0.$$

Запишемо це характеристичне рівняння у формі

$$\lambda^2 + \sigma\lambda + p = 0, \quad (2.29)$$

де

$$\sigma = \frac{R_n + R}{L}, \quad (2.30)$$

$$p = \frac{C_n + C^{(-)}}{LC_n C^{(-)}}, \quad (2.31)$$

$$\lambda_{1,2} = -\frac{\sigma}{2} \pm \sqrt{\frac{\sigma^2}{4} - p} \quad (2.32)$$

$\lambda_{1,2}$ – корені характеристичного рівняння.

Розв'язок (2.29) будемо шукати у вигляді

$$i_{C^{(-)}} = Ae^{\lambda_1 t} + Be^{\lambda_2 t}. \quad (2.33)$$

Для аналізу стійкості схеми потрібно визначити стани рівноваги і їхню стійкість. У стані рівноваги фазові швидкості дорівнюють нулю, тобто

$$\frac{di}{dt} = 0 \quad \text{і} \quad \frac{du}{dt} = 0. \quad (2.34)$$

Схема описується такими рівняннями Кірхгофа:

$$u_{C_n} + i_1 R_n + L \frac{di_1}{dt} = u_{C^{(-)}} + i_2 R; \quad (2.35)$$

$$i_1 + i_2 = i_C,$$

де

$$i_1 = C_n \frac{du_{C_n}}{dt}; \quad i_2 = C^{(-)} \frac{du_{C^{(-)}}}{dt}.$$

Підставивши в (2.35) умови рівноваги (2.34), маємо

$$u_{C_n} = u_{C^{(-)}}.$$

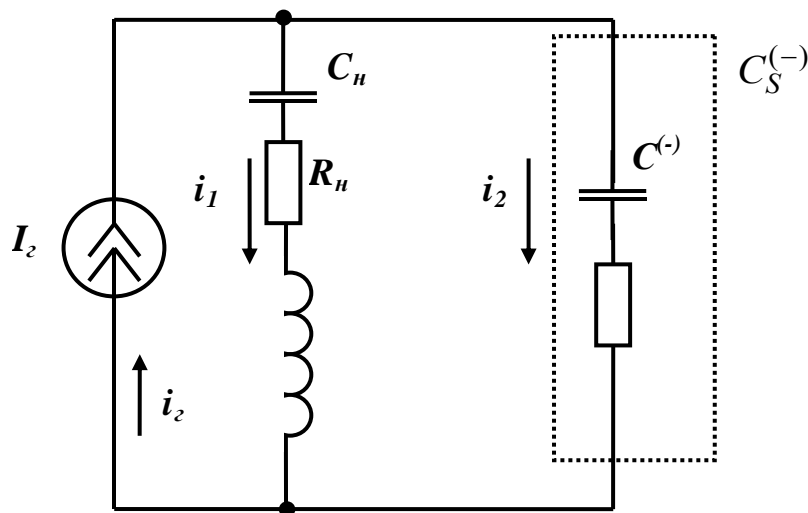


Рисунок 1.6 – Еквівалентна схема навантаженого С-негатрона S-типу. C_n – ємність навантаження; R_n – загальний активний опір навантаження з врахуванням внутрішнього опору джерела живлення; L – сумарна індуктивність навантаження і С-негатрона; $C^{(-)}$ – від’ємна диференційна ємність С-негатрона; R – активний диференційний опір С-негатрона S-типу

З врахуванням того, що $u_{C^{(-)}} = \frac{q_{C_n}}{C_n}$, де q_{C_n} – заряд ємності навантаження, отримаємо рівняння навантажувальної прямої:

$$u_{C^{(-)}}(q_{C^{(-)}}) = \frac{Q_\Gamma - q_{C^{(-)}}}{C_n},$$

де $q_{C^{(-)}}$ – заряд С-негатрона; $Q_\Gamma = q_{C_n} + q_{C^{(-)}}$ – сумарний заряд ємності навантаження і С-негатрона (заряд, що створюється джерелом живлення).

Відповідно до кулон-вольтної характеристики, С-негатрон S-типу керується зарядом. Оскільки заряд є функцією струму і часу ($q = \int_0^t idt$), то для керування С-негатроном S-типу можна

використовувати джерело струму, при цьому $Q_\Gamma = \int_0^t I_\Gamma dt$.

Таким чином, станами рівноваги є точки перетину кулон-вольтної характеристики С-негатрона S-типу з навантажувальною прямою. Таких точок може бути або одна, або три (рис. 1.7).

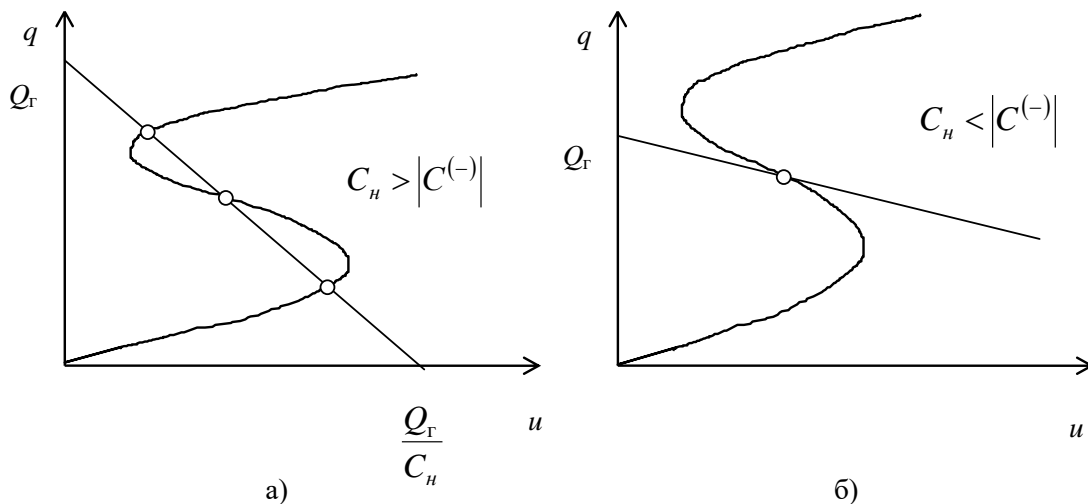


Рисунок 1.7 – Можливі стани рівноваги С-негатрона S-типу

У випадку, якщо $C_n > |C^{(-)}|$ (рис. 1.7а), пряма навантаження перетинає кулон-вольтну характеристику в трьох точках та існує три стани рівноваги. Якщо $C_n < |C^{(-)}|$, існує тільки один стан рівноваги (рис. 1.7).

Стан рівноваги буде стійким, якщо дійсні частини коренів характеристичного рівняння (2.29) будуть від'ємними. Для цього за теоремою Рауса–Гурвіца для систем другого порядку необхідно і достатньо, щоб виконувалися одночасно дві умови:

$$\sigma > 0; \quad p > 0. \quad (2.36)$$

Коефіцієнти σ і p залежать від параметрів схеми. З (2.30) і (2.31) видно, що для постійного L виконання або невиконання умов (2.36) залежить від ємності навантаження C_n і диференційної від'ємної ємності С-негатрона S-типу $C^{(-)}$. Коефіцієнт σ , як видно з (2.30), завжди більший нуля ($\sigma > 0$), тому що активний диференційний опір С-негатрона $R > 0$.

Диференційна від'ємна ємність $C^{(-)}$ С-негатрона змінюється зі зміною заряду зміщення. Тому при зміні ємності навантаження або заряду зміщення змінюється режим роботи схеми.

Виберемо тільки інтервал напруг зміщення, у якому диференційна ємність має від'ємне значення ($C^{(-)} < 0$), тобто тільки стани рівноваги на ділянці від'ємної ємності кулон-вольтної характеристики С-негатрона S-типу.

Розглянемо стани рівноваги схеми при різних співвідношеннях σ і p , тобто залежно від співвідношення величин C_n , R_n , $C^{(-)}$, R . З виразів (2.30), (2.31) видно, що можна записати три граничних умови, при яких p і підкореневий вираз в (2.32) перетворюється в нуль:

$$1) \quad p = \frac{C_n + C^{(-)}}{LC_n C^{(-)}} = 0, \quad (2.37)$$

якщо $C_n = -C^{(-)}$.

$$2) \quad \frac{\sigma^2}{4} - p = 0, \quad (2.38)$$

$$\text{якщо } C_n = \frac{4L}{(R_n + R^{(-)})^2 - 4L/C^{(-)}}.$$

$$3) \quad \frac{\sigma^2}{4} - p = 0, \quad (2.39)$$

$$\text{якщо } R_{n1,2} = -R^{(-)} \pm 2\sqrt{\frac{L(C_n + C^{(-)})}{C_n C^{(-)}}}.$$

Для граничних умов (2.38) і (2.39) існує розв'язок тільки у випадку, коли $p \geq 0$.

На графіку з осями координат C_n і $C^{(-)}$, рівнянню (2.37) відповідає пряма, що виходить з початку координат під кутом 45° , рівнянню (2.38) – гіпербола, що проходить через початок координат. На графіку з осями координат R_n і $R^{(-)}$ рівнянню (2.39) відповідає пряма, що виходить під кутом 45° із

$$\text{точок } (0; 2\sqrt{\frac{L(C_n + C^{(-)})}{C_n C^{(-)}}}) \text{ (рис. 1.8в).}$$

Області I на площині параметрів $C^{(-)}C_n$ відповідає вся площина параметрів RR_n (рис. 1.8б). Області II на площині $C^{(-)}C_n$ відповідає область II на площині $R^{(-)}R_n$ (рис. 1.8в). Області III на площині $C^{(-)}C_n$ відповідає область III на площині RR_n .

Таким чином, на діаграмі стійкості С-негатрона S-типу (рис. 1.8) є три різних області (I, II, III), що визначають режим роботи С-негатрона.

Область I

$$\sigma > 0, \\ p < 0 \text{ або } C_n > |C^{(-)}|,$$

$$\sqrt{\frac{\sigma^2}{4} - p} > \frac{\sigma}{2}.$$

Корені характеристичного рівняння (2.29) λ_1 і λ_2 – дійсні числа, причому $\lambda_1 > 0$, а $\lambda_2 < 0$. Отже, перший член рівняння (2.33) зростатиме за експоненційним законом, а другий – буде зменшуватися.

Оскільки в цій області $C_n > |C^{(-)}|$, то можливі три стани рівноваги, причому на ділянці від'ємної ємності стан рівноваги буде нестійким. Два інших стани рівноваги будуть стійкими, тому що в них $C > 0$ і обидва коефіцієнти σ і p додатні. Таким чином, в області I схема працюватиме в режимі перемикавання.

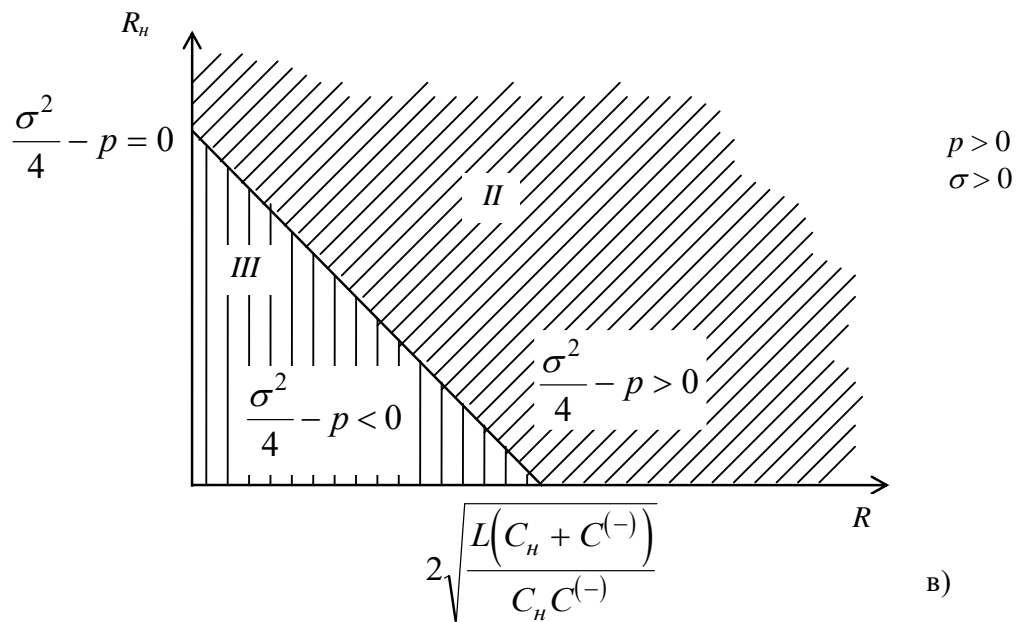
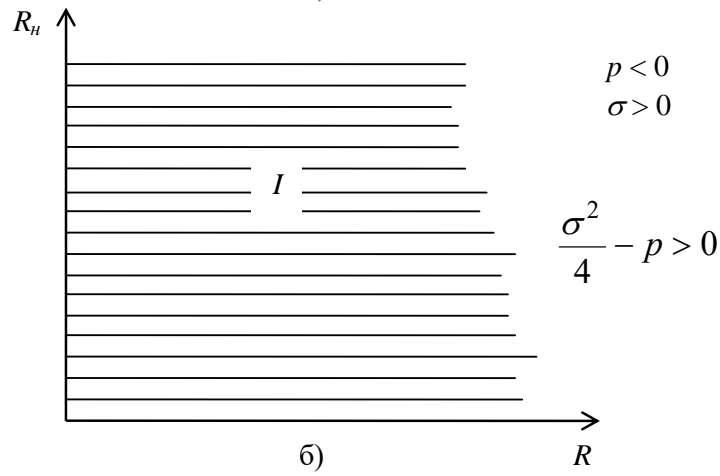
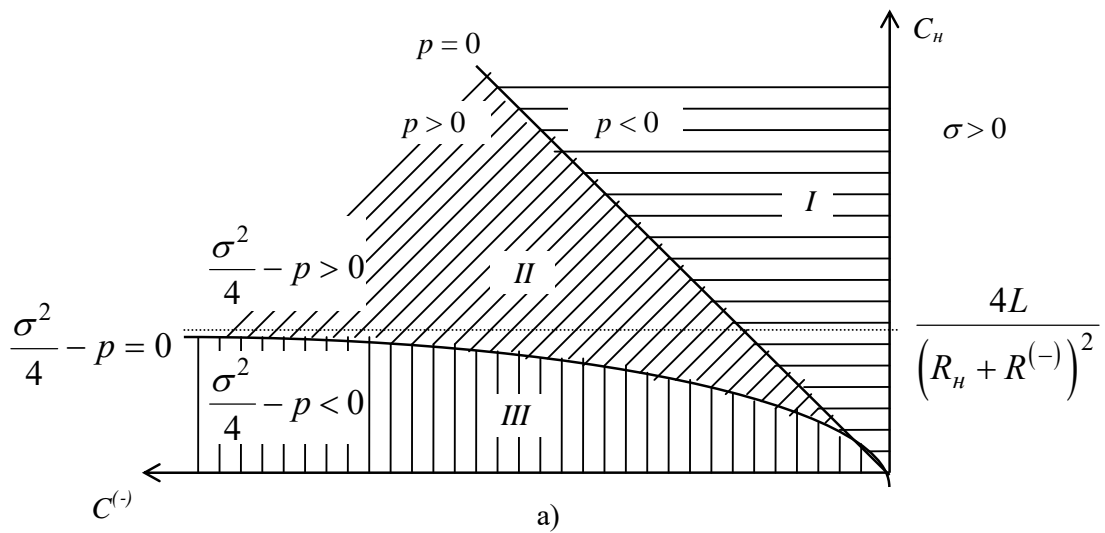


Рисунок 1.8 – Діаграми стійкості, що визначають режим роботи S-негатрона S-типу

Область II

$$\begin{aligned} \sigma &> 0, \\ p &> 0 \text{ або } C_n < |C^{(-)}|, \\ \frac{\sigma^2}{4} - p &> 0. \end{aligned}$$

Корені λ_1 і λ_2 – дійсні і від’ємні числа. Обидва експонентних члени рівняння (2.33) зменшуються з часом. Єдиний стан рівноваги ($C_n < |C^{(-)}|$) є стійким. Схема може працювати як нелінійний елемент (детектор, перетворювач, змішувач, обмежувач).

Область III

$$\begin{aligned} \sigma &> 0, \\ p &> 0 \text{ або } C_n < |C^{(-)}|, \\ \frac{\sigma^2}{4} - p &< 0. \end{aligned}$$

Корені λ_1 і λ_2 – комплексні числа з від’ємною дійсною частиною. Отже, відповідно до (2.33), у системі матиме місце коливальний процес, що згасає за експоненційним законом. Єдиний стан рівноваги ($C_n < |C^{(-)}|$) є стійким. Схема працюватиме як нелінійний елемент.

Таким чином, режим роботи схеми з С-негатроном S-типу залежить від ємності й активного опору навантаження, величини від’ємної ємності й активного опору С-негатрона. Вибираючи відповідним чином ємність і активний опір навантаження та заряд зміщення, що визначає величину $C^{(-)}$ і R, можна отримати один з режимів роботи:

- а) перемикання – область I;
- б) робота як нелінійного елемента (детектор, перетворювач, змішувач, обмежувач) – області II, III [3].

Класифікація генераторів

Генератори гармонічних коливань призначені для перетворення енергії джерела постійного струму в енергію незатухаючих синусоїдальних коливань. Такі генератори побудовані за кільцевою схемою, в якій використовується додатний зворотний зв’язок активного елемента. В якості активних елементів використовують транзистори, операційні підсилювачі, діоди з ділянкою з від’ємним диференціальним опором.

В якості частотно-залежних використовують резонансні LC-контури, кварцові резонатори, RC, RL-кола.

За типом частотно-залежних ланок генератори поділяють на LC, RC, RL-генератори.

В залежності від генерованих частот генератори поділяють на:

- надвисокочастотні (300 МГц – 300 ГГц);
- високочастотні (300 кГц – 300 МГц);
- низькочастотні (20 кГц – 300 кГц);
- ультранизькочастотні (20 кГц і нижче).

За вихідної потужності генератора ділять на:

- малопотужні (менше 1 Вт);
- середньої потужності (нижче 100 Вт);
- потужні (понад 100 Вт).

По типу активних елементів генератори ділять на:

- лампові;
- транзисторні;
- генератори на операційних підсилювачах;

- генератори на тунельних діодах.

Для генерації високочастотних сигналів в основному застосовують LC-генератори. Для низькочастотних – RC-генератори. При ультранизьких частотах більш ефективні RL-генератори.

Частоту, що генерується RC-генератором, називають квазірезонансною, оскільки RC-елементи не мають резонансних властивостей, як, наприклад, LC-контур.

В залежності від наявності елементів плавного переналаштування частоти генератори поділяють на діапазонні генератори і генератори фіксованої частоти.

Генератори фіксованої частоти застосовують переважно для генерування низькочастотних коливань. Вони мають частотно-залежні ланки на R- і C-елементах, і, в залежності від створюваного ними фазового зсуву на частоті квазірезонансу, інвертуючі або неінвертуючі підсилювачі.

Внутрішньою класифікаційною ознакою генераторів являється принцип управління режимом їх роботи. По ньому розрізняють генератори з незалежним збудженням (зовнішнім управлінням), режимом роботи яких управляють від зовнішнього джерела змінної напруги, і генератори з самозбудженням (внутрішнім управлінням) - автогенератори.

По формі вихідних коливань розрізняють генератори гармонічних (синусоїдальних) коливань і генератори коливань несинусоїдальної форми (прямокутної, пилкоподібної і т. д.), які називають релаксаційними (імпульсними).

Гармонічні коливання в генераторах підтримуються резонансними контурами або іншими резонуючими елементами (кварцові резонатори, об'ємні резонатори і т. п.), чи з допомогою фазуючих RC-кіл, які вмикаються в коло зворотного зв'язку підсилювачів. Генератори, які функціонують за першим принципом, називають LC-генераторами, за другим - RC-генераторами.

Малопотужні LC-генератори гармонічних коливань застосовують у вимірювальних і регулювальних пристроях, а також слугують в якості задаючих генераторів в радіопередавачах. LC-генератори середньої і великої потужності використовують для живлення технологічних установок ультразвукової обробки матеріалів і діелектриків, електронних мікроскопів і ін.

RC-генератори гармонічних коливань використовують як задаючі пристрої в системах перетворення постійного струму в змінний, а також у вимірювальних пристроях і системах.

При розгляді генераторів з незалежним збудженням припускають їх управління електричними коливаннями, що поступають від попередньої ланки схеми. Однак у них існують ланки, що перетворюють напругу джерела живлення схеми в коливання змінної напруги без керуючої дії ззовні. Такі схеми працюють в автоколивному режимі, їх називають автогенераторами. При цьому основною їх характеристикою є частота генерованих коливань.

Повна схема автогенератора з резонансним LC-контуром в колекторному колі $L_k C_k$, який є навантаженням однокаскадного підсилювача, та індукованим зв'язком між виходом і входом підсилювача, що забезпечується окремою базовою обмоткою, наведена на рис. 2.1. Така схема називається генератором з трансформаторним зв'язком і використовується переважно в області радіочастот.

Елементи R_1 , R_2 , R_c і C_c призначені для забезпечення необхідного режиму за постійним струмом та його термостабілізації. За рахунок ємності C_2 , реактивний опір якої на частоті генерації незначний, заземляється один кінець базової обмотки. Опори r_k і R_b враховують активні втрати відповідно в контурній і базовій обмотках.

Якщо кварцову пластинку стиснути або розтягнути, на її протилежних гранях появляються електричні заряди, рівні за значенням і протилежні за знаком. Це явище називають прямим п'єзоефектом.

Явище зворотнього п'єзоефекту полягає в тому, що при прикладанні електричної напруги до граней кварцової пластинки вона буде стискатися або розтягатися, в залежності від полярності прикладеної напруги.

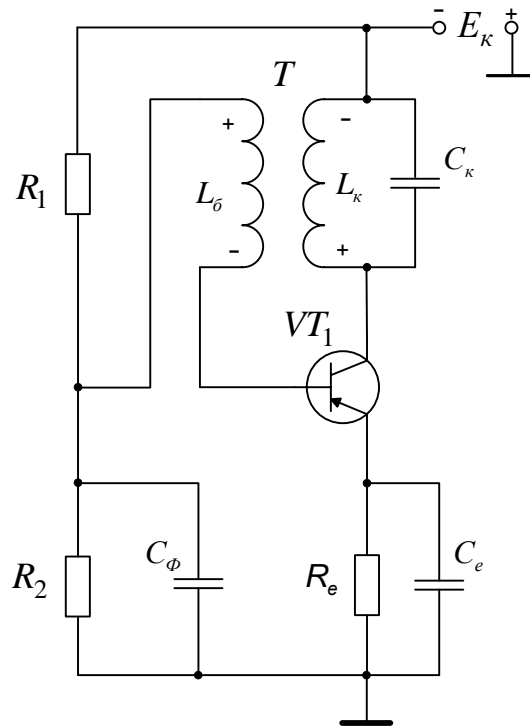


Рисунок 2.1- Схема автогенератора з трансформаторним зв'язком

При підведенні змінної напруги до кварцової пластинки, вона починає здійснювати механічні коливання, частота яких залежить її від розмірів і зрізу. Оскільки розміри пластинки незначно змінюється при зміні температури, то і частота коливань буде також відносно постійна. Механічні коливання кварцу викликають власні електричні коливання. Коли власна частота кварцового резонатора збігається з частотою електричних коливань, відбувається явище резонансу і механічні коливання досягають максимуму.

При побудові кварцового генератора використовується вмикання кварцового резонатора в коло зворотного зв'язку або в якості індуктивності коливного контура.

Генератори з кварцовою стабілізацією переважно виконують на фіксовані частот, що є недоліком. Для частот близько 10 МГц товщина пластинок мала (~0,3) мм, і вони дуже крихкі.

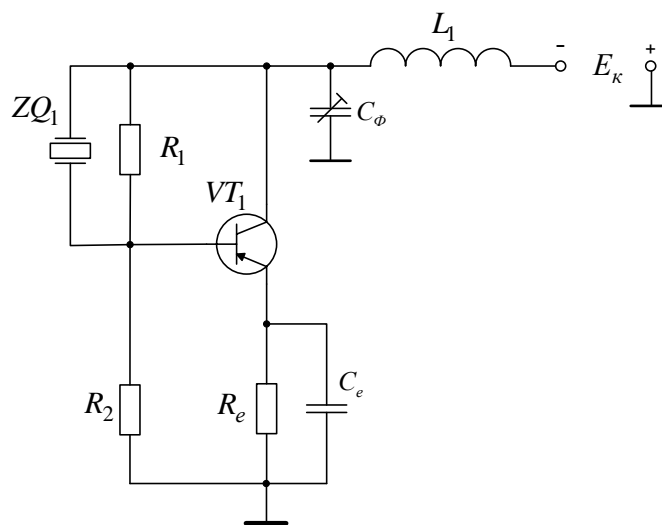


Рисунок 2.2 - Схема кварцового генератора де резонатор ввімкнений в коло зворотного зв'язку

Аналіз побудови RC-генераторів на операційних підсилювачах

Найчастіше низькочастотні RC-генератори виконуються на базі операційних підсилювачів, охоплених колами додатного і від'ємного зворотного зв'язку з використанням фазоповертаючих RC-ланок. Для забезпечення самозбудження RC-генератора необхідно на вхід підсилювача подавати частину вихідної напруги, яка рівна вхідній і збігається з нею за фазою. Для отримання гармонічних синусоїдальних коливань потрібно, щоб ці умови виконувалися на одній частоті і різко порушувалися на всіх інших частотах.

Це завдання вирішується з допомогою фазоповертаючої ланки (ФПЛ), яка складається з декількох RC-ланок, що служать для повороту фази вихідної напруги підсилювача на певний кут. Такими ланками можуть служити диференціючі або інтегруючі RC-ланки, пасивні смугові RC-фільтри, подвійні T-подібні фільтри або інтегратори на основі операційних підсилювачів.

Схема генератора з мостом Віна

Перевагою цього генератора є можливість зміни частоти генерованих коливань. Принципова електрична схема цього генератора представлена на рис. 2.3.

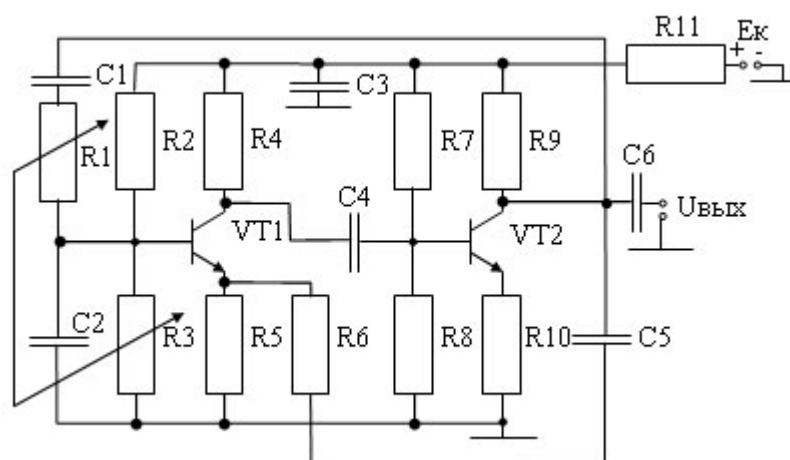


Рисунок 2.3 - Принципова електрична схема RC автогенератора з мостом Віна

У цьому генераторі підсилювач також має два підсилювальних каскади зібрані на транзисторах VT1 і VT2. Навантаженням цих каскадів є резистори R4 і R9. Напруга зсуву на резистори надходить через подільники напруги R2R3 і R7R8.

Вихідна напруга надходить на вхід підсилювача через фазобалансний ланцюг C1R1C2R3, який є одним з плечей моста Віна, друге плече утворено елементами R6R5. Друга гілка з'єднана з виходом підсилювача через конденсатор C5 великої ємності, завдяки чому ланцюг R5R6 не створює помітного зсуву фаз. Поряд з позитивним зворотним зв'язком, вводиться негативний зворотний зв'язок утворений елементами R5R10C5R6. Негативний зворотний зв'язок, знижуючи коефіцієнт підсилення, істотно знижує нелінійні спотворення генеруючих коливань. Зниження коефіцієнта підсилення не призводить до порушення балансу амплітуд, так як реальний двохкаскадний підсилювач має коефіцієнт підсилення набагато більше 3. Крім того елементи R5R10, забезпечують температурну стабілізацію робочої точки транзисторів. Регулювання частоти генерованих коливань в розглянутому генераторі здійснюється одночасним регулюванням опорів резисторів R1 і R3, однак, може здійснюватися і одночасним регулюванням ємностей конденсаторів C1 і C2.

Аналіз побудови генераторів прямокутних імпульсів

Мультивібратор – релаксаційний генератор електричних коливань прямокутного типу, це один з найпоширеніших генераторів імпульсів прямокутної форми, і являє собою двокаскадний резистивний підсилювач з додатним зворотним зв'язком. В електронній техніці використовуються різні варіанти

схем мультивібратора, які різняться між собою за типом використовуваних елементів (лампові, транзисторні, тиристорні, мікроелектронні і так далі), режиму роботи (автоколивальних, режиму очікування, синхронізації), видами зв'язку між підсилювальними елементами, способах регулювання тривалості і частоти генерованих імпульсів і так далі.

Віднесення мультивібратора до класу автогенераторів виправдане лише при автоколивальному режимі його роботи. У режимі очікування мультивібратор виробляє імпульси тільки тоді, коли на його вхід надходять спеціальні сигнали, які його запускають. Режим синхронізації відрізняється від автоколивального лише тим, що в цьому режимі за допомогою зовнішньої керуючої (синхронізуючої) напруги можна змінювати частоту генерованих коливань.

Схема мультивібратора на біполярних транзисторах наведена на рис. 2.4, може знаходитися в одному з двох нестабільних станів і періодично переходить з одного в інший. Фаза переходу дуже коротка завдяки дії позитивного зворотного зв'язку між каскадами підсилення.

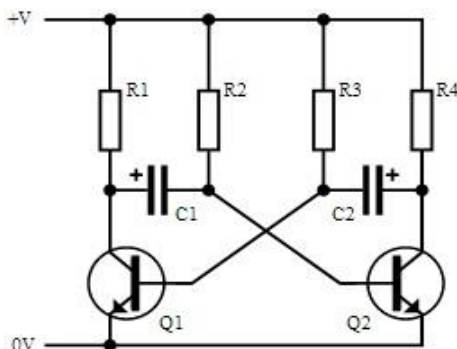


Рисунок 2.4 – Схема мультивібратора на біполярних транзисторах

При вмиканні живлення через резистори R2, R3 на бази транзисторів подається напруга, яка відкриває транзистори. При цьому напруга на колекторах починає зменшуватись і ця зміна напруги з виходу кожного з транзисторів подається на вхід іншого, протидіючи його відкриванню. Через розбіжності в параметрах деталей, один з транзисторів відкривається, а інший повністю закривається. Припустимо, що має місце:

Стан 1: Q1 закритий, Q2 відкритий і насичений, C1 заряджається струмом бази Q2 через R1 і Q2, після чого при повністю зарядженому C1 (полярність заряду вказана на схемі) через R1 струм не тече. C2, заряджений раніше в попередньому стані 2 (полярність по схемі), починає повільно розряджатися через відкритий Q2 і R3.

Стан 2: те саме, тільки в дзеркальному відображенні (Q1 відкритий і насичений, Q2 закритий).

R1 і R4 підбираються набагато менші, ніж R3 і R2, щоб зарядка конденсаторів через R1 і R4 була швидше, ніж розрядка через R3 і R2. Чим більше буде час зарядки конденсаторів, тим більш пологою виявляться фронти імпульсів. Відношення R3/R1 і R2/R4 не повинні бути більше, ніж коефіцієнти підсилення відповідних транзисторів, інакше транзистори не будуть відкриватися повністю [4].

Розробка та дослідження електрично керованого генератора синусоїдальних коливань на С-негатроні

Схема електрично керованого генератора синусоїдальних коливань на С-негатроні наведена на рис. 3.1.

На польовому транзисторі 3 зібраний генератор гармонічних коливань, які знімаються з вихідної клемі 11, їх частота визначається резонансною частотою коливального контуру, утвореного індуктивністю 18 та сумарною ємністю варикапа 12 та С-негатрона, який реалізовано на біполярних транзисторах 17 і 21. Від'ємна ємність одержується шляхом перетворення додатної ємності 19. Ємності 2, 8, 9, 10, 16 - розділові. Резистори 4, 13, 15 забезпечують робочу точку транзистора 3. Ємність 14 шунтує резистор 15 на високих частотах. Резистори 5 і 20 забезпечують робочу точку транзистора 17. Резистори 22 і 23 забезпечують робочу точку транзистора 21. Ємність 24 шунтує опір 23 на високих частотах та з'єднує базу транзистора 21 з загальною шиною 25. Напруга живлення

подається на клему 1. Напряга керування на варикап подається з клемі 6 через високоомний резистор 7.

Частота резонансу визначається за формулою:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_\Sigma}}$$

де L – індуктивність 18, C_Σ - сумарна ємність варикапа 12 і С-негатрона, який реалізовано на біполярних транзисторах 17 і 21:

$$C_\Sigma = C_V + C^{(-)},$$

де C_V – ємність варикапа 12, $C^{(-)}$ – від'ємна ємність.

Коефіцієнт переналаштування генератора:

$$K_f = \frac{f_{\max}}{f_{\min}} = \sqrt{K_C},$$

де f_{\max} – максимальна частота генерації, f_{\min} – мінімальна частота генерації, K_C – коефіцієнт перекриття ємності варикапа 12.

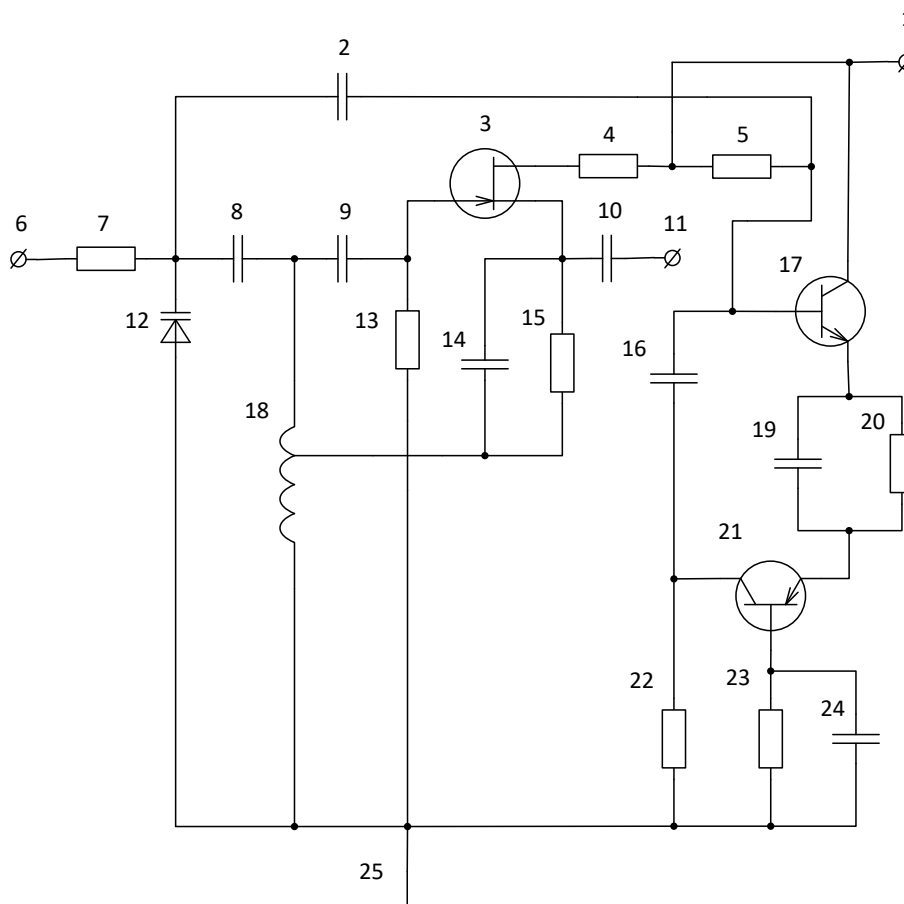


Рис. 1. Схема електрично керованого генератора синусоїдальних коливань на С-негатроні

Залежність від коефіцієнту перекриття ємності варикапа 12:

$$K_C = \frac{C_{\max}}{C_{\min}}$$

де C_{\max} – максимальна ємність варикапа 12, C_{\min} – мінімальна ємність варикапа 12.

При підключенні від'ємної ємності коефіцієнт переналаштування становить:

$$K'_C = \frac{C_{\max} + C^{(-)}}{C_{\min} + C^{(-)'}}$$

так як $C^{(-)} < 0$, то $K'_C > K_C$.

Тому коефіцієнт переналаштування генератора при підключенні від'ємної ємності також збільшиться:

$$K_f' > K_f.$$

На рис. 3.2 та рис. 3.3 зображено часові діаграми вихідних напруг при умові зміни напруги керування від 0 до 15 В при відсутності та наявності С-негатрона відповідно.

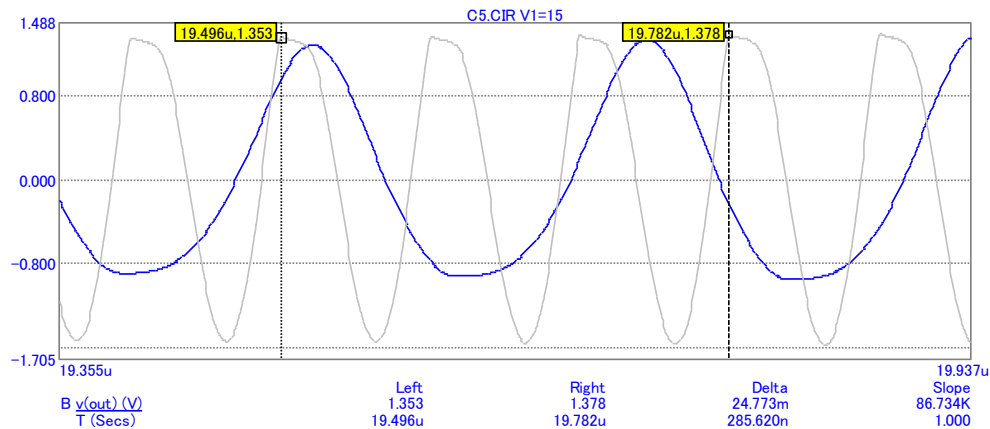


Рис. 3.2. Часова діаграма напруги на виході генератора без С-негатрона

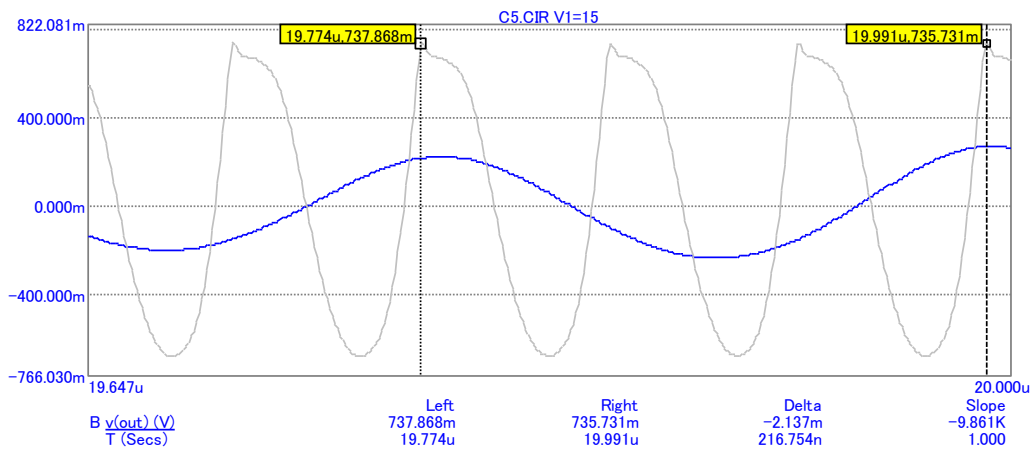


Рис. 3.3. Часова діаграма напруги на виході генератора при наявності С-негатрона

3.2 Розробка та дослідження електрично керованого генератора прямокутних імпульсів на С-негатроні

Схема електрично керованого генератора прямокутних імпульсів на С-негатроні наведена на рис. 3.4.

На тригері Шмітта 2 зібраний генератор прямокутних імпульсів, що знімаються з клем 3. Частота імпульсів визначається резистором 1 і сумарною ємністю варикапа 12 та С-негатрона, який реалізовано на інверторах 9 і 11. Рівень напруги сигналу, що поступає на вхід першого інвертора 9, підвищується за допомогою першого джерела напруги зміщення 13. Перший інвертор підсилює сигнал, рівень якого знову підвищується до потрібного за допомогою другого джерела напруги зміщення 14. Сигнал поступає на вхід другого інвертора 11, за допомогою якого підсилюється, після чого через третю ємність 5 надходить на вхід першого інвертора. Напряга керування на варикап подається з клем 6 через перший резистор 7. Ємності 4, 8, 10 – розділові. Загальна шина 15 служить заземленням. Джерела напруги зміщення 13 і 14 задають активний режим роботи інверторів 9 та 11, причому вони мають підсилення K_1 та K_2 .

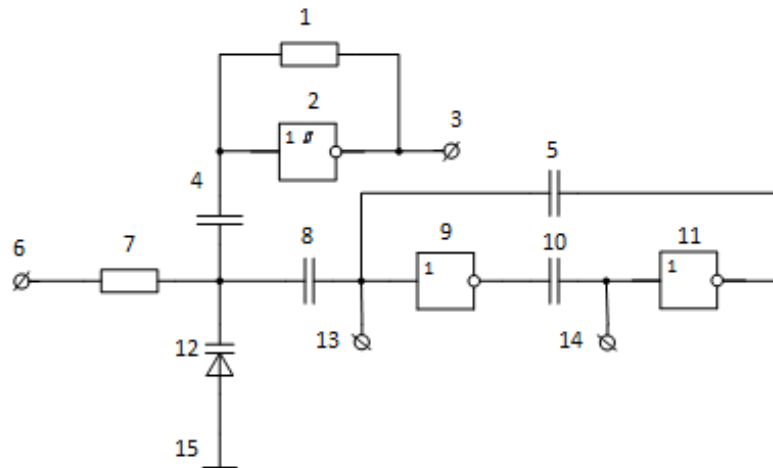


Рис. 3.4. Схема електрично керованого генератора прямокутних імпульсів на С-негатроні

Коефіцієнт підсилення схеми:

$$K = K_1 * K_2.$$

Третя ємність включена у коло зворотного зв'язку, при цьому на вході схеми одержується від'ємна ємність:

$$C_{вх} = -K * C_5,$$

де K - коефіцієнт підсилення схеми, C_5 - третя ємність 5.

Частота сигналу визначається за формулою:

$$\omega = \frac{1}{RC_{\Sigma}},$$

де R - опір резистора 1, C_{Σ} - сумарна ємність варикапа 12 і С-негатрона, який реалізовано на інверторах 9 та 11.

$$C_{\Sigma} = C_V + C^{(-)},$$

де C_V - ємність варикапа 12, $C^{(-)}$ - від'ємна ємність.

Коефіцієнт переналаштування генератора:

$$K_f = \frac{f_{max}}{f_{min}} = K_C,$$

де f_{max} - максимальна частота генерації, f_{min} - мінімальна частота генерації, K_C - коефіцієнт перекриття ємності варикапа 12.

Коефіцієнт перекриття ємності варикапа 12:

$$K_C = \frac{C_{max}}{C_{min}},$$

де C_{max} - максимальна ємність варикапа 12, C_{min} - мінімальна ємність варикапа 12.

При підключенні від'ємної ємності коефіцієнт переналаштування становить:

$$K'_C = \frac{C_{max} + C^{(-)}}{C_{min} + C^{(-)}},$$

так як $C^{(-)} < 0$, то $K'_C > K_C$.

Тому коефіцієнт переналаштування генератора збільшиться:

$$K'_f > K_f.$$

Висновок

В даній роботі було проведено дослідження властивостей С-негатронів і характеристик генераторів гармонічних та релаксаційних коливань, та вдосконалення схем електрично керованих генераторів шляхом включення у коло С-негатрона, завдяки чому у результаті моделювання було досягнуто збільшення коефіцієнтів переналаштування генератора синусоїдальних коливань та генератора прямокутних імпульсів у 2,289 рази та 2,118 рази відповідно.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Негатроника / [Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н., Филинюк Н. А. и др.] – Новосибирск : Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1995. – 315 с.
2. Физико-технологические и схемотехнические основы негатроники / [Пашаев А. М., Касимов Ф. Д., Филинюк Н. А. и др.] – Баку : Элм, 2008. – 433 с.
3. 92. Філінюк М. А. Дослідження стійкості навантажених С-негатронів / М. А. Філінюк, О. О. Лазарев // Вісник ВПІ. – 2003. – No 2.
4. Арш Э. И. Автогенераторные методы и средства измерений/ Арш Э. И. – М. : Машиностроение, 1979. – 256 с.

Олександр Олександрович Лазарев – кандидат технічних наук, доцент кафедри електроніки та наносистем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця;

Антон Ігорович Романько — студент групи МНТ-17мі, факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: anthonypalmer1341@gmail.com.

Alexander A. Lazarev - Ph.D., assistant professor of electronics and nanosystems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia;

Anton I. Roman'ko - Faculty of infocommunications, electronics and nanosystems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: anthonypalmer1341@gmail.com.