

Лекція 12. Імпульсні пристрої. Автогенератори

У імпульсній техніці використовуються короткочасні, переривисті електричні коливання. Імпульсна техніка служить, зокрема, базою радіолокації, радіонавігації, телебачення, багатоканального зв'язку. На основі імпульсної техніки створені сучасні ЕОМ.

До імпульсних пристроїв відносять функціональні вузли, призначені для формування імпульсних сигналів необхідної форми і виконання над ними різних операцій і перетворень (інтеграції, диференціювання, затримки за часом, зміни форми, тривалості, селекції по амплітуді і т. п.).

Імпульсними сигналами прийнято називати електричні коливання, які існують в межах кінцевого відрізка часу. Електронні вузли (пристрої) функціонують в імпульсному режимі, при якому короткочасна робота пристрою чергується з паузою.

Велику групу імпульсних пристроїв складають генератори прямокутних сигналів, для позначення яких згідно використовують букви ГГ, наприклад, К218ГГ1 серії 218, генератори сигналів, які лінійно змінюються, позначаються ГЛ, а генератори змішаної форми – ГФ.

Група імпульсних пристроїв, які працюють з одиночними прямокутними імпульсами, виділилася в самостійний клас цифрових пристроїв.

Відзначимо переваги пристроїв, які працюють в імпульсному режимі, в порівнянні з пристроями безперервної дії:

- у імпульсному режимі досягається велика потужність в імпульсі при малому значенні споживаної середньої потужності пристрою;
- менший вплив розкиду параметрів напівпровідникових елементів і температури, оскільки вони працюють в ключовому режимі (включення – виключення);
- велика пропускна спроможність передачі інформації і краща перешкодостійкість (менше спотворення інформації);
- зручність розробки складних пристроїв на основі декількох однотипних елементів, що отримуються методами інтегральної технології.

12.1 Параметри імпульсів і імпульсних пристроїв

У імпульсних пристроях використовуються наступні види електричних сигналів:

- імпульси;
- перепади напруги (струму).

Електричний імпульс – це відхилення напруги (струму) від первинного значення протягом короткого проміжку часу, порівнюючи з тривалістю перехідних процесів в імпульсному пристрої. При цьому передбачається автоповернення у вихідний стан.

Перепад напруги (струму) – це перехід на інший рівень. Повернення у вихідний стан відбувається лише після подачі додаткового сигналу.

Розглянемо декілька прикладів.

Ідеальний імпульс прямокутної форми (рис. 12.1) має наступні ділянки: ab – фронт (наростання) імпульсу; cd – зріз імпульсу; bc – вершина; ad – підстава імпульсу.

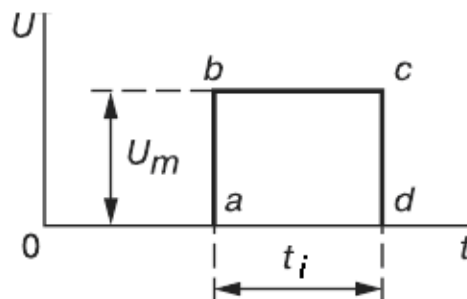


Рисунок 12.1 - Ідеальний імпульс прямокутної форми

Параметри імпульсу: U_m – амплітуда; t_i – тривалість імпульсу; $t_\phi = 0$ – тривалість фронту; $t_z = 0$ – тривалість зрізу імпульсу.

Ідеальний імпульс трапецеїдальної форми (рис. 12.2) має $t_\phi \neq 0$ і $t_z \neq 0$. Тривалість імпульсу t_i вимірюють або на рівні $0,1U_m$ від підстави, або на рівні $0,5U_m$.

Параметри реального імпульсу (рис. 12.3) визначають таким чином: час фронту t_ϕ дорівнює часу наростання імпульсу від рівня, рівного $0,1U_m$, до моменту, коли рівень досягне значення $0,9U_m$, а час зрізу t_z дорівнює часу спаду імпульсу від рівня $0,9U_m$ до рівня $0,1U_m$.

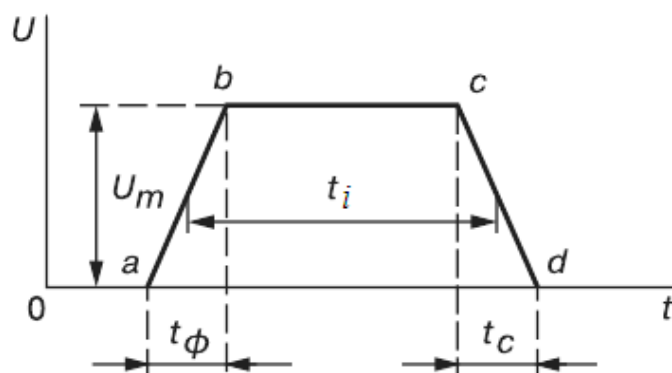


Рисунок 12.2 - Ідеальний імпульс трапецеїдальної форми

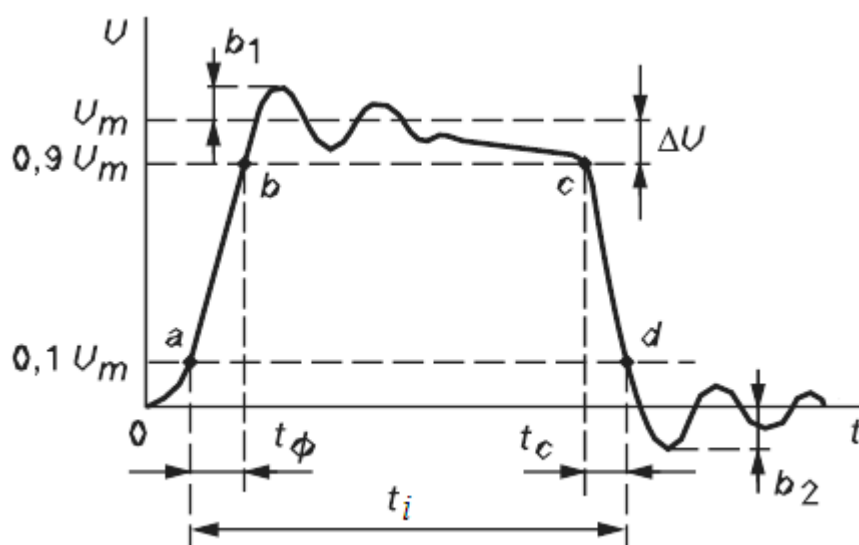


Рисунок 12.3 - Параметри реального імпульсу

На вершині bc імпульсу спостерігається викид b_1 і завал ΔU вершини, а на підставі – викид b_2 після виключення пристрою. Тривалість імпульсу t_i вимірюють між значеннями $0,1 U_m$ його наростання і спаду.

На рисунку 12.4 представлені перепади імпульсів: позитивний (рис. 12.4, а) і негативний (рис. 12.4, б), де U_m – різниця рівнів.

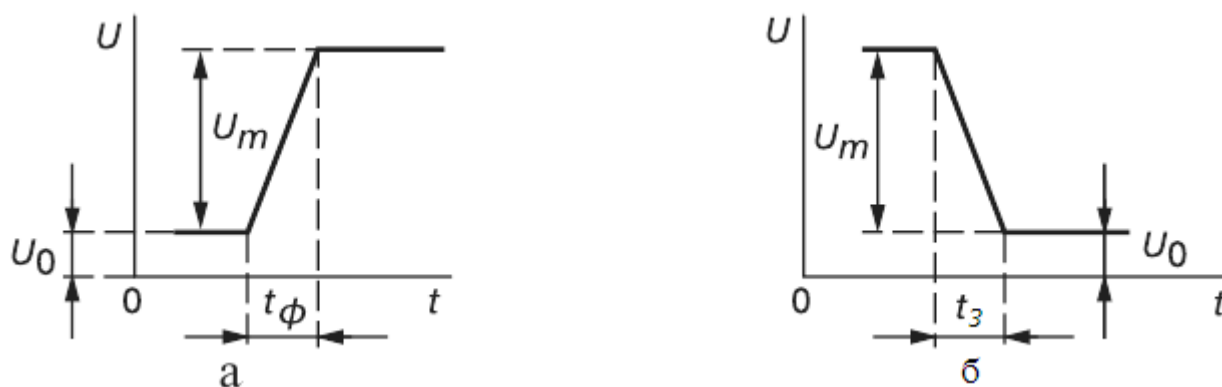


Рисунок 12.4 - Перепади імпульсів

У періодичних послідовностях прямокутних імпульсів (рис. 12.5 а) імпульси повторюються через рівні проміжки часу, звані періодом T , а різниця $t_n = T - t_i$ – паузою. Відношення періоду T до тривалості імпульсу t_i (рис. 12.5 а), тобто $N = T / t_i$, називають шпаруватістю імпульсів, а відношення t_i до періоду T , тобто $\gamma = t_i / T$ – коефіцієнтом заповнення.

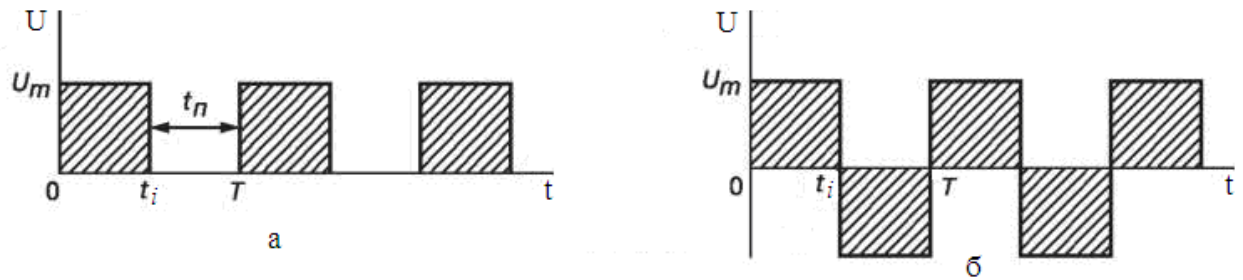


Рисунок 12.5 – Періодична послідовність прямокутних імпульсів

У меандрі (рис. 12.5 б) позитивні прямокутні імпульси чергуються з негативними імпульсами.

12.2 Прості формувачі імпульсів

Простими формувачами імпульсів можуть служити RL і RC кола (рис. 12.6 а і рис. 12.6 б). У елементах L і C енергія не може змінюватися стрибком, тому при додатку до входу RC кола, наприклад, прямокутного імпульсу (рис. 12.6 в і рис. 12.6 г) мають місце перехідні процеси зміни накопиченій або нагромаджуваній енергії, а форма вихідної напруги $U_{\text{вих}}$ на елементах R і C кола залежить як від постійної часу $\tau = RC$ кола (рис. 12.6 д, е і рис. 12.7 ж, з), так і від тривалості t_i імпульсу.

При малій постійній часу $\tau \ll t_i$ (рис. 12.6 г) кола вихідний сигнал наближається до прямокутної форми, а при $\tau \gg t_i$ отримують практично лінійно наростаючу напругу $U_{\text{вих}} = Ut / \tau$ в інтервалі від 0 до t_i . Після закінчення часу імпульсу напруга повільно спадає до нуля згідно із законом

$$U_{\text{вих}} = Ue^{-t/\tau} (t > t_i).$$

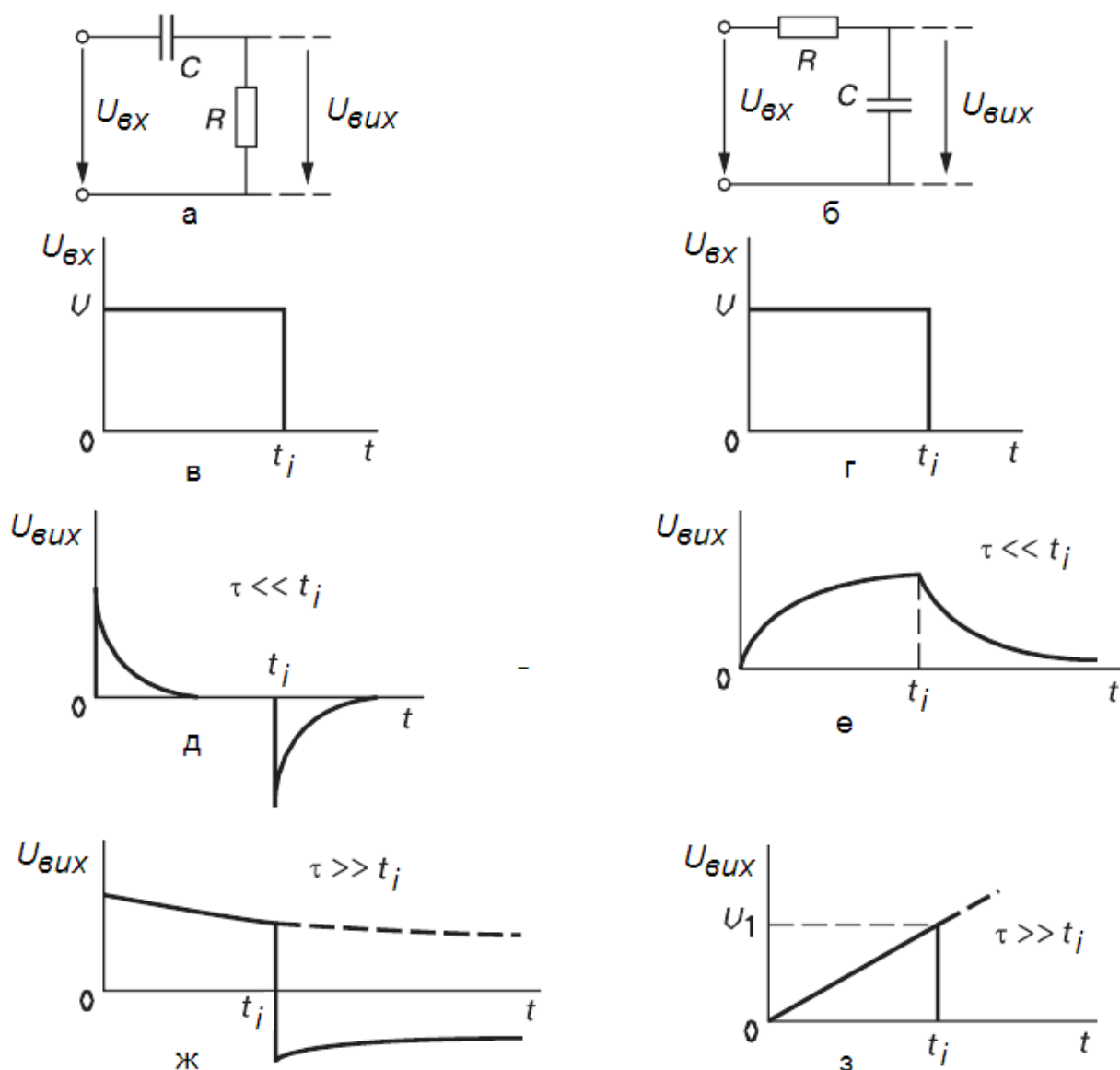


Рисунок 12.6 – Прості формувачі імпульсів та перехідні процеси

12.3 Обмежувачі рівня

Обмежувачі рівня змінюють амплітуду вхідної $U_{вх}$ напруги до порогового рівня, на якому $U_{вих}$ практично не змінюється. На рисунку 12.7 а, в представлені прості двосторонні обмежувачі рівнів синусоїдальної напруги $U_{вх}$, виконані на діодах $VD1$ і $VD2$ і джерелах постійного струму з ЕРС E_1 і E_2 (рис. 12.7, а), або на стабілітронах $VC1$ і $VC2$ (рис. 4.8 в). При цьому ЕРС джерел E_1 і E_2 можуть бути однаковими або різними, як і напруга стабілітронів $U_{ст1}$ і $U_{ст2}$ для здобуття різних рівнів напруги $U_{вих}$ в напівперіодах.

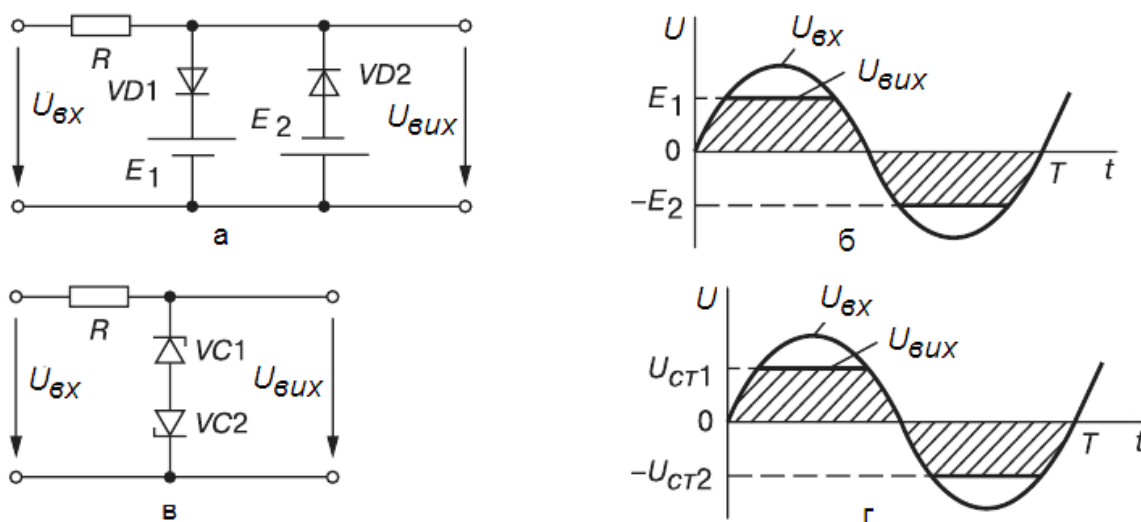


Рисунок 12.7 – Двосторонні обмежувачі рівнів синусоїдальної напруги

12.4 Транзисторный ключ

Ключовой пристрій (ключ) служить для перемикавання ланцюгів навантаження під впливом зовнішніх сигналів, що управляють, і працює в двох режимах: включеному або вимкненому. Як ключі можуть використовуватися механічні вимикачі, електромагнітні реле і електронні, виконані на транзисторі, діодах і інших електронних пристроях.

Якщо механічний вимикач S (рис. 12.8 а) замкнутий, то його опір $R_S = 0$ і напруга $U_{вих} = 0$ (рис. 12.8 б). Якщо ключ S розімкнений (протягом інтервалу часу $t_1 - t_2$), то його опір $R_S = \infty$, а вихідна напруга дорівнює напрузі живлення, тобто $U_{вих} = U_{ж}$.

У транзисторному ключі (рис. 12.8 в) за відсутності сигналу на вході $U_{вх}$ транзистор VT має бути закритий (повинен знаходитися в режимі відсічення, точка b на пересіченні лінії навантаження ($I_{K,max} = U_{жс} / R_K$, $U_{жс}$ на рисунку 12.8 д) з вихідною характеристикою $I_K(U_K)$ транзистора VT при $I_B = 0$). При цьому напруга на колекторі $U_{вих} = U_{жс} - U_{пор} \approx U_{жс}$, де $U_{пор}$ – порогова напруга відмикання транзистора (рис. 12.8 г). Рівень вхідного сигналу $U_{вх1}$ має бути таким, аби струм бази $I_B = U_{вх1} / R_B$ забезпечив повне відкриття транзистора VT (точка a на рисунку 12.8 д), тобто транзистор повинен працювати в режимі насичення.

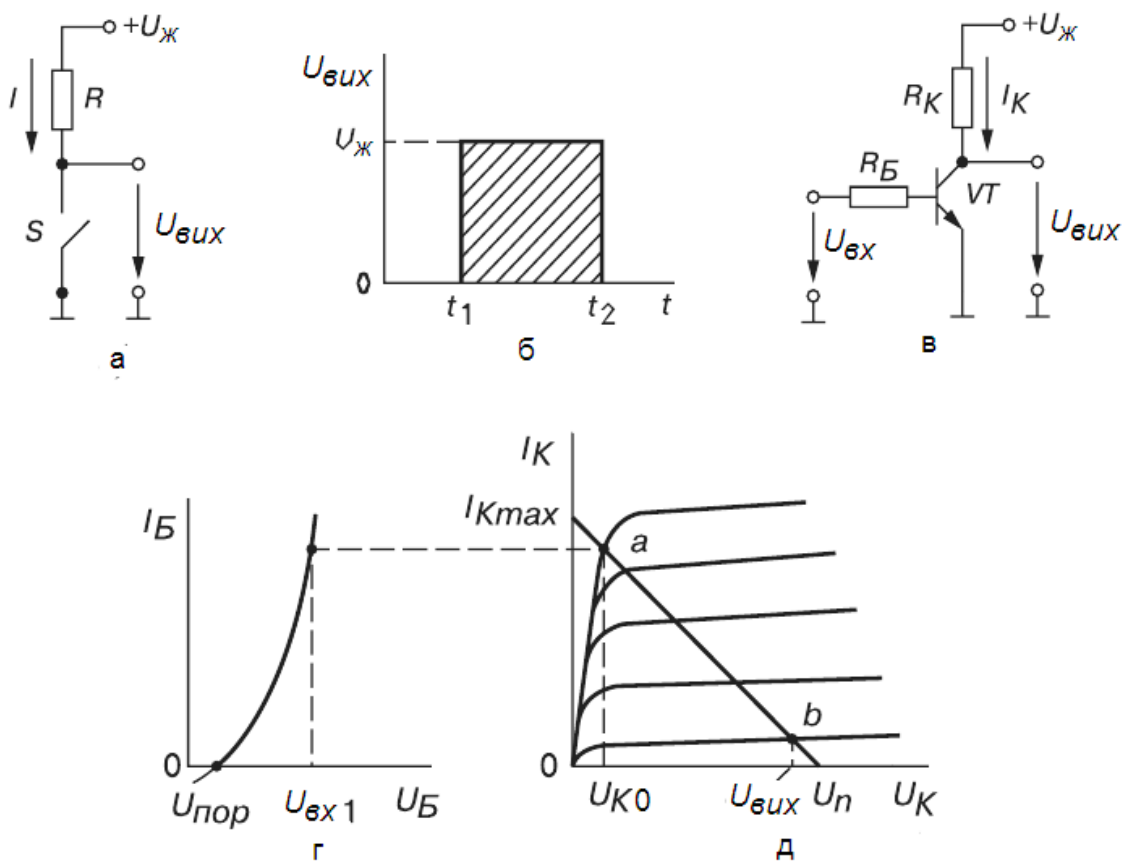


Рисунок 12.8 – Ключові пристрої

Тоді напруга $U_{вих} \approx U_{жс} - R_K I_K = U_{K0} \approx 0$, оскільки опір колектор-емітер в режимі насичення невеликий.

На рисунку 12.9 приведені спрощені часові діаграми вхідної $U_{вх}$ і вихідної $U_{вих}$ напруги при одиночному імпульсі на вході (рис. 12.9 а) і при подачі послідовності прямокутних імпульсів (рис. 12.9 б). При $U_{вх} < U_{пор}$ транзистор VT закритий ($U_{вих} \approx U_{жс}$), а при $U_{вх} > U_{вх1}$, $U_{вих} = U_{K0}$, де U_{K0} – напруга на відкритому транзисторі (рис. 12.8 д).

У реальному електронному ключі при відкритому і закритому станах опори мають кінцеві значення, а також спостерігається проміжок часу як при спаді, так і при наростанні напруги $U_{вих}$, що обмежує частоту $f = 1 / T$ перемикання ключа (рис. 12.9 а).

Принцип роботи транзисторного ключа полягає в його відкритті вхідним сигналом $U_{вх}$ (у переході транзистора в режим насичення) або в його закритті (у переході в режим відсічення) і у формуванні перепаду напруги U_m (від рівня напруги $U_{жс}$ до рівня U_{K0}).

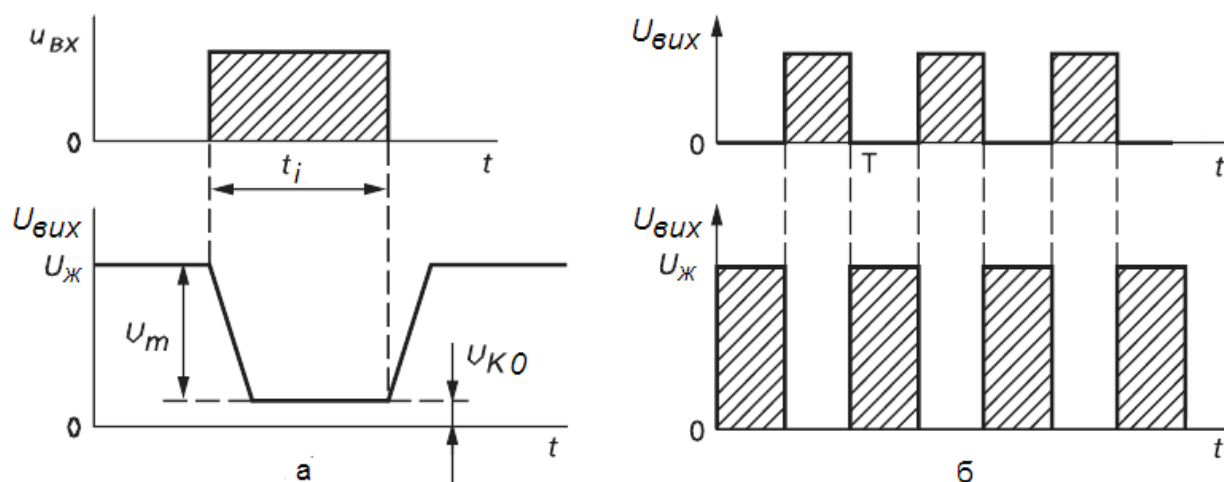


Рисунок 12.9 – Часові діаграми вхідної і вихідної напруг

Як ключі в ключових пристроях застосовують як біполярні, так і МДН-транзистори, які працюють в режимі великого вхідного сигналу.

12.5 Тригер

Тригер – електронна схема, яка має два стійкі стани. Переходи з одного стану в інший і назад здійснюються під дією спеціальних запускаючих імпульсів. Тригери широко застосовують в цифрових електронних пристроях.

Проста схема тригера на біполярних транзисторах із зовнішнім зсувом E_B приведена на рисунку 12.10 а.

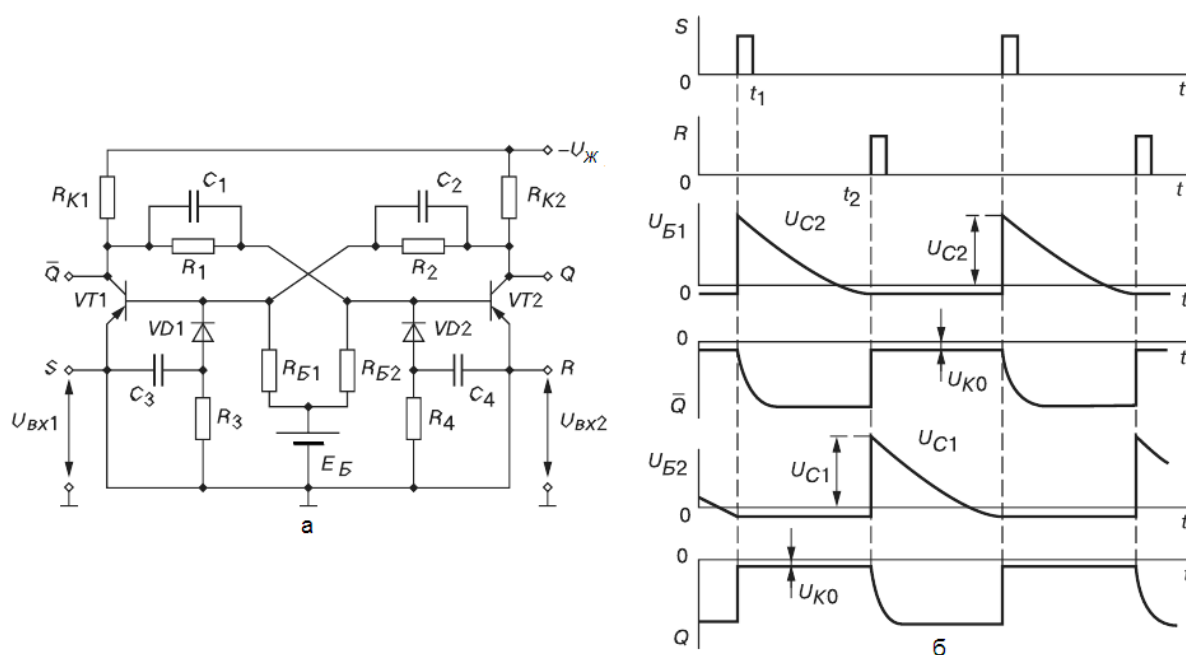


Рисунок 12.10 - Схема тригера на біполярних транзисторах

Тригер можна розглядати як двохелементний підсилювач постійного струму (з резистивним зв'язком), охоплений позитивним зворотним зв'язком ($R1C1$ і $R2C2$) по напрузі між колекторами і базами транзисторів $VT1$ і $VT2$. Обов'язкова умова роботи тригера: якщо один транзистор відкритий (знаходиться в режимі насичення), то інший в цей час має бути закритий (знаходиться в режимі відсічення). Форсуючі конденсатори $C1$ і $C2$ використовують для прискорення процесів перемикання транзисторів.

Нехай при $t = 0$ транзистор $VT1$ відкритий, а транзистор $VT2$ закритий. При цьому напруга на базі $VT2$

$$U_{B2} = \frac{E_B R_1}{(R_1 + R_{B2})} - \frac{I_{K1} R_1 R_{B2}}{(R_1 + R_{B2})} > 0$$

для надійного його закриття має бути більше нуля (рис. 12.10 б). У цьому стані тригер знаходитиметься до подачі на вхід R імпульсу $+U_{ex2}$.

В цей час струм I_{B1} зменшується і транзистор $VT1$ виходить з режиму насичення, його колектор стає більш негативним, і на виході Q встановлюється сигнал $U_{K1} = -U_{ж}$.

Позитивний зворотний зв'язок (ПЗЗ) розвивається лавиноподібно, відкривається транзистор $VT2$, тобто тригер перемикається. На виході Q встановлюється напруга U_{K0} (рис. 12.10 б).

В процесі перемикання тригера конденсатор $C1$ заряджається, і його зарядний струм збільшує струм бази транзистора $VT2$, прискорюючи встановлення на його колекторі напруги U_{K0} .

Якщо при $t = t_2$ поданий на вхід S імпульс $+U_{ex1}$, то відбувається знов перемикання тригера. На виході \bar{Q} встановлюється напруга $U_{K1} = U_{K0}$ і так далі.

12.6 Електронні генератори

Електронний генератор – електронний пристрій, який виробляє електричні коливання певної частоти і форми, використовуючи енергію джерела постійної напруги (струму).

Розрізняють генератори з самозбудженням (автогенератори) і генератори із зовнішнім збудженням. Будь-який автогенератор містить коливальну систему і підсилювальний елемент (на біполярному або польовому транзисторі), зв'язані позитивним зворотним зв'язком.

Основними характеристиками генератора є форма, частота і потужність коливань. Формою розрізняють електронні генератори гармонійних (майже синусоїдальних) коливань і так звані релаксаційні генератори різної форми. По частоті автогенератори підрозділяються на генератори інфранизької (від доль герц до 10 Гц), низької (від 10 Гц до 100 кГц), високої (від 100 кГц до 10 МГц) і надвисокої (понад 10 МГц) частот.

Структурна схема генератора гармонійних коливань представлена на рисунку 12.11.

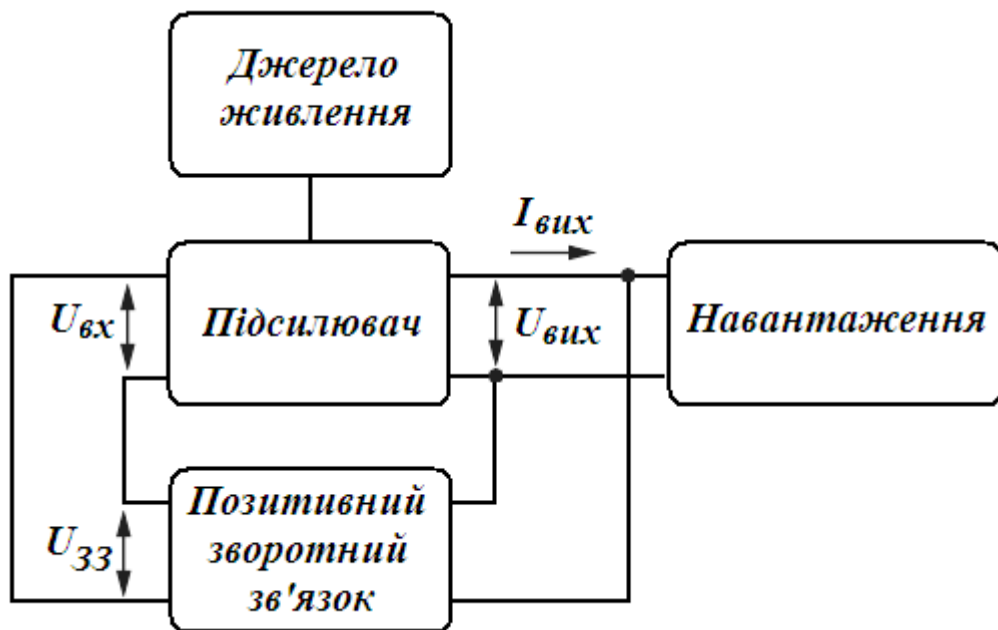


Рисунок 12.11 - Структурна схема генератора гармонійних коливань

Генератор складається з підсилювача (нелінійного елементу) з комплексним коефіцієнтом посилення по напрузі

$$K_U = \frac{U_{вих}}{U_{вх}}$$

і чотириполюсника позитивного зворотного зв'язку (лінійного елементу у вигляді LC або RC ланок) з комплексним коефіцієнтом передачі

$$\beta = \frac{U_{33}}{U_{вих}}$$

Оскільки $U_{ex} = U_{33}$, то напруга

$$U_{вих} = K_U \cdot U_{ex} = K_U \cdot \beta \cdot U_{вих}$$

Отже, сталі коливання існуватимуть в схемі за умови, що множення $K_U \cdot \beta = 1$, тобто при коефіцієнті посилення підсилювача, рівному одиниці. При $K_U \cdot \beta > 1$ амплітуда вихідної напруги $U_{вих}$ безперервно зростатиме (до насичення активних елементів).

Представляючи комплексні коефіцієнти K_U і β в показовій формі, тобто

$$K_U = K_U \cdot e^{j\psi_K}, \quad \beta = \beta \cdot e^{j\psi_\beta}$$

та їх множення

$$K_U \beta = K_U \beta \cdot e^{j(\psi_K + \psi_\beta)} = 1,$$

Отримаємо умови самозбудження автоколивань

$$\psi_K + \psi_\beta = 2\pi n, \quad n = 0, 1, 2, \dots; \quad K_U \beta = 1$$

Перша умова відображає процес балансу фаз, при якому зрушення фаз в замкнутому колі автоколивальної системи повинне дорівнювати $2\pi n$ радіан, а друга умова самозбудження – баланс амплітуд – зводиться до того, що на резонансній частоті ω_0 активні втрати енергії в автогенераторі повинні заповнюватися від джерела живлення за допомогою позитивного зворотного зв'язку. Відзначимо, що баланс амплітуд зумовлює незмінну амплітуду стаціонарних коливань.

При стабільній частоті коливань умови балансу фаз і балансу амплітуд повинні виконуватися на одній частоті. Для цього автогенератор повинен мати частотно-залежне (фазозсувне) LC або RC коло, налаштоване на цю частоту.

12.7 Автогенератор типа LC

Простий автогенератор з індуктивним зв'язком (рис. 12.12 а) є однокаскадним підсилювачем на транзисторі VT, який включений за схемою із загальним емітером, з навантаженням у вигляді паралельного коливального кон-

тура $R_K C_K$ і колом зворотного зв'язку, створеного обмоткою L_B , індуктивно пов'язаною з індуктивним елементом L_K контура. Підсилювач виконаний за схемою з фіксованою напругою зсуву дільником R_{B1} і R_{B2} і термостабілізуючим колом $R_E C_E$.

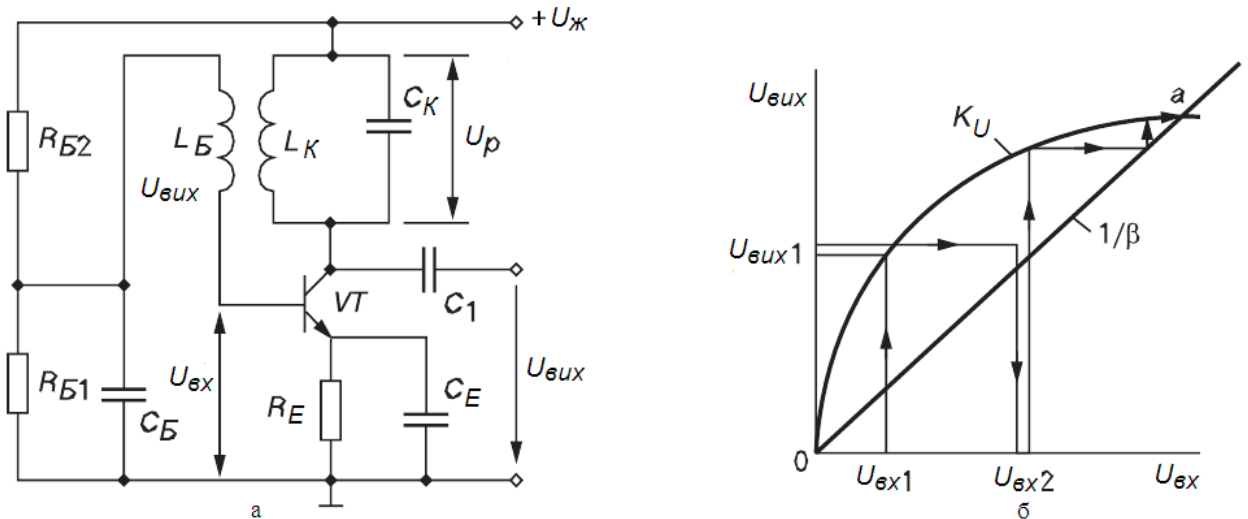


Рисунок 12.12 - Автогенератор з індуктивним зв'язком

На вхід підсилювача через конденсатор C_B , ємкісний опір якого на частоті генерації невеликий, поступає сигнал зворотного зв'язку, представлений ЕРС базової обмотки L_B . Колекторний струм, який з'явився у момент включення джерела живлення $U_{жс}$, заряджає конденсатор C_K , який потім розряджаючись на індуктивний елемент L_K , створює в контурі коливання з резонансною частотою

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_K C_K}}.$$

Ці коливання напруги за допомогою індуктивного зв'язку передаються на базу транзистора VT , викликаючи коливання напруги $U_{вх}$ на вході підсилювача і пульсації струму колектора, які, підживлюючи $L_K C_K$ контур, заповнюють активні втрати енергії в ньому. Аби коливання були незгасаючими, потрібно виконати вказані вище дві умови самозбудження.

Аналіз електричного стану підсилювача показує, що баланс фаз задовольняється, якщо амплітуда напруги на контурі $U_{m,p}$ рівна і протилежна по

фазі до амплітуди вихідної напруги $U_{m.вих}$. Це можливо, якщо обмотка L_K включена таким чином, що фаза індукованою в ній ТНС знаходиться в протифазі з напругою контура U_p , а напруга $U_{вих}$ в однокаскадному підсилювачі, як відомо, протифазна напрузі $U_{вх}$. Вочевидь, що фази $U_{вх}$ і $U_{вих}$ зрушені на $180^\circ + 180^\circ = 360^\circ$.

Друга умова самозбудження – баланс амплітуд, зводиться до того, аби коефіцієнт посилення був більший або рівний $1 / \beta$, тобто $K_U > 1 / \beta$.

Процес виникнення, наростання і встановлення коливального режиму зручно пояснити за допомогою графіка (рис. 12.12 б), де нанесені:

$K_U = U_{вих} / U_{вх}$ - амплітудна характеристика підсилювача;

$1 / \beta = U_{вих} / U_{вх.33}$ - пряма, яка характеризує зворотний зв'язок.

Умові $K_U > 1 / \beta$ на графіці відповідає розташування кривої K_U над прямою $1 / \beta$ на ділянці $0a$.

Нехай наявність коливання $U_{вх1}$ викликала на виході (відповідно до кривої K_U) коливання $U_{вих1}$, яке через петлю зворотного зв'язку створює на вході збільшене коливання $U_{вх2}$, що викличе подальше збільшення вихідної напруги до тих пір, поки не буде досягнута точка a (рис. 12.12 б), у якій $K_U + 1 / \beta$ або $K_U \cdot \beta = 1$. У точці a перехідний процес закінчується і встановлюється стаціонарний режим гармонійних коливань.

12.8 Автогенератори типа RC

На частотах, менших 15 ... 20 кГц, при яких обмотки резонансних контурів виходять громіздкими, доцільне вживання RC генераторів, які виконуються за структурною схемою (рис. 12.13 а).

Підсилювач (рис. 12.13 в) будується за звичайною резистивною схемою, а позитивний зворотний зв'язок здійснюється за допомогою фазовертача (RC ланок, рис. 12.13 б). Умови самозбудження таких генераторів колишні. Оскільки одна RC ланка зрушує фазу своєї вихідної напруги по відношенню до її вхідної на кут, менший 90° , то застосовують трьохланкову структуру. Кожна Т-образна ланка повинна зрушувати фазу напруги на 60° .

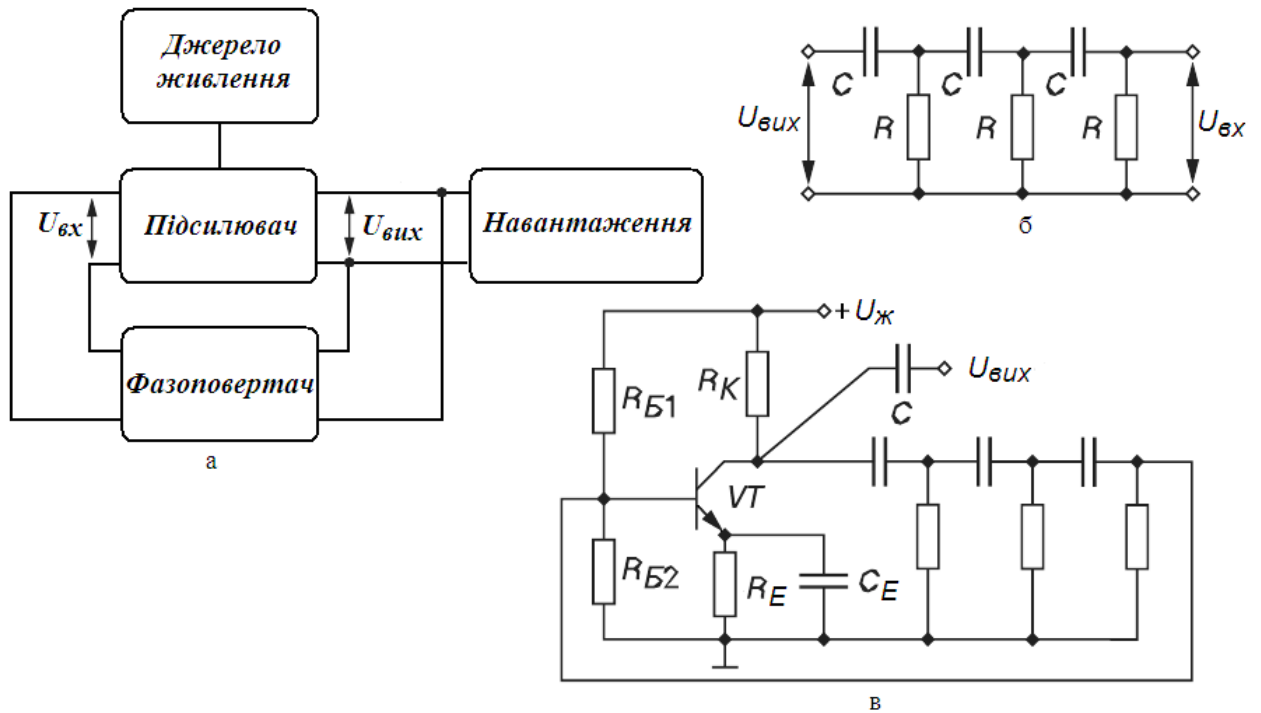


Рисунок 12.13 – RC автогенератор

Частота яка генеруються такими схемами синусоїдальних коливань за умови рівності опорів резисторів R і ємкостей C конденсаторів у всіх трьох ланках визначається формулою

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{6RC}} = \frac{1}{15,4RC} = \frac{0,065}{RC}.$$

Як показують розрахунки, із-за падінь напруги на елементах, відношення $U_{вих} / U_{вх}$ на фазовертачі (рис. 12.13 б) рівне $\beta = 29$, тому для забезпечення умови балансу амплітуд коефіцієнт посилення підсилювача повинен задовольняти умові $K_U > 29$.

12.9 Мультивібратори

Мультивібратор – релаксаційний генератор, що є двоелементним підсилювачем з ємкісним зв'язком, вихід якого сполучений з входом. При цьому утворюється замкнуте коло з позитивним зворотним зв'язком.

Розрізняють два види мультивібраторів: автоколивальні (які не володіють станом стійкої рівноваги) і чекаючі (які володіють станом стійкої рівноваги, при виході з якого спочатку переходять в інший стійкий стан, а потім

мимоволі повертаються в первинний стан).

Коливальний процес в автоколивальному мультивібраторі відбувається унаслідок почергового накопичення енергії у відповідних конденсаторах від джерела живлення і в подальшій їх розрядці через кола транзисторів.

Симетричний автоколивальний транзисторний мультивібратор зібраний з схожих елементів: транзисторів $VT1$ і $VT2$, резисторів з опорами $R_{K1} = R_{K2} = R_K$; $R_{B1} = R_{B2} = R_B$; і конденсаторів з ємностями $C_1 = C_2 = C$; $R_K \ll R_B$ (рис. 12.14 а).

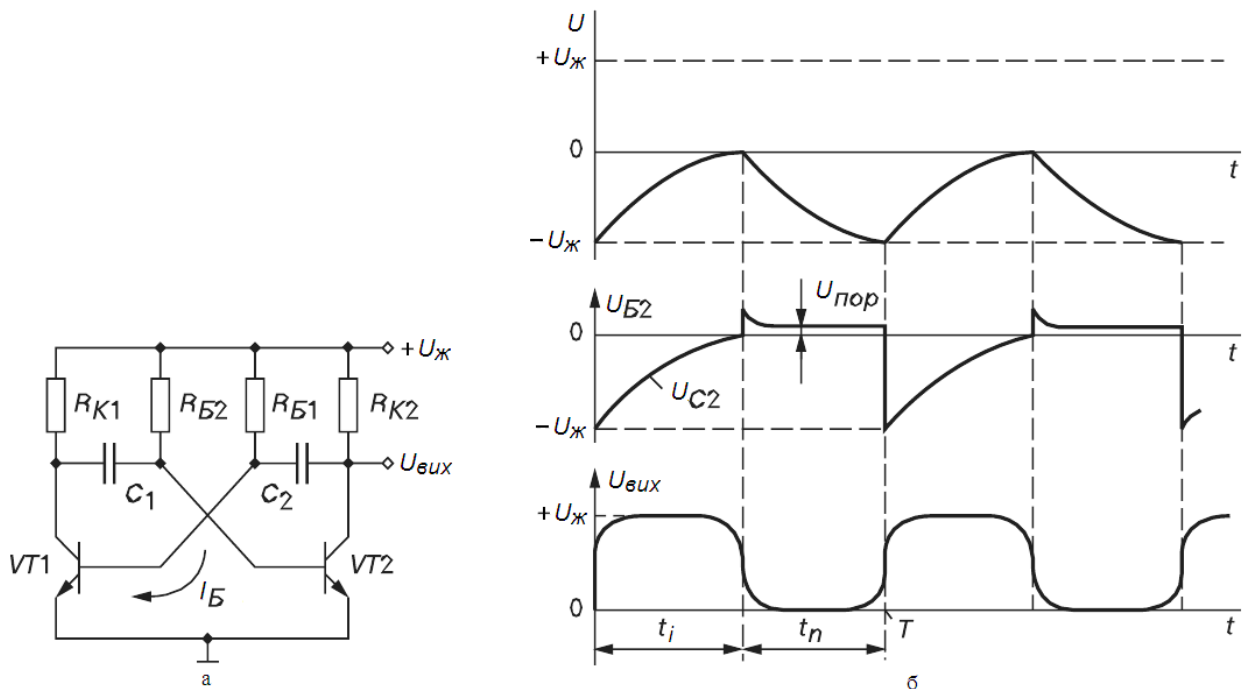


Рисунок 12.14 - Симетричний автоколивальний транзисторний мультивібратор

Так само, як і в тригері, транзистори в мультивібраторі працюють в ключовому режимі. Мультивібратор має два стани квазірівноваги: у одному їх них транзистор $VT1$ відкритий струмом бази $I_{B1} = I_K + I_{C1}$ і знаходиться в стані насичення, а транзистор $VT2$ закритий (знаходиться в стані відсічення). Кожен з цих станів квазірівноваги нестійкий, оскільки негативний потенціал на базі закритого транзистора $VT2$ у міру заряду конденсатора C_2 прагне до позитивного потенціалу джерела живлення $U_{жс}$ (зарядка конденсатора C_2 йде швидше, ніж розрядка конденсатора C_1). В той момент, коли цей потенціал

стане позитивним, стан квазірівноваги порушиться, закритий транзистор відкриється, відкритий закривається, і мультивібратор переходить в новий стан квазірівноваги. На виході формуються майже прямокутні імпульси $U_{вих}$ при шпаруватості $N \approx 2$ (рис. 12.14 б).

Період коливань симетричного мультивібратора

$$T = 2R_B C \ln 2 \approx 1,4R_B C$$

У несиметричному мультивібраторі тривалість імпульсу t_i напруги $U_{вих}$ не дорівнює тривалості паузи t_n .

Мультивібратор, як і інші генератори з формою напруги, відмінною від синусоїдальної, можна зібрати на операційному підсилювачі. У ОП завдяки великому коефіцієнту посилення ($K_U = 10^5 \dots 10^6$) вихідна напруга пропорційна вхідній лише при дуже малих вхідних сигналах (одиниці мілі- і мікробольт). При великих сигналах на вході напруга $U_{вих}$ може мати два значення $U_{вих}^+$ і $U_{вих}^-$ (рис. 12.15 а).

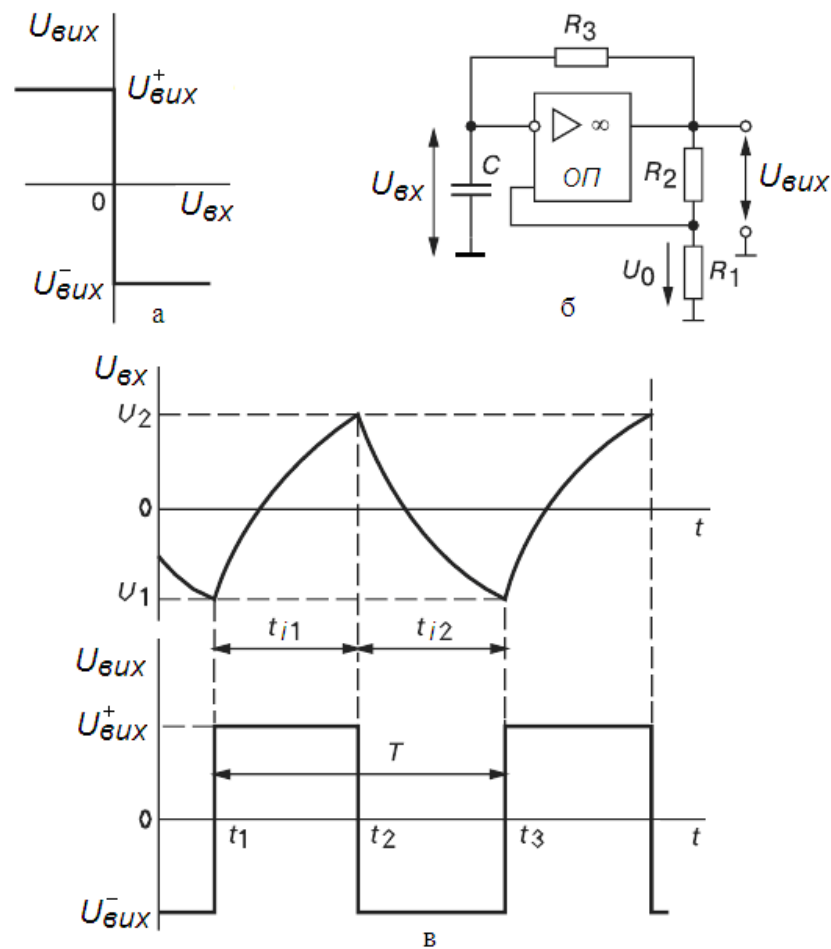


Рисунок 12.15 - Мультивібратор на операційному підсилювачі

Значення U_{ex} , при яких різниця $U_{ex} - U_{33} = 0$ (U_{33} – напруга зворотного зв'язку), дорівнюють

$$U_1 = U_{вих}^- \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \beta U_{вих}^- \text{ і } U_2 = U_{вих}^+ \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \beta U_{вих}^+, \text{ де } \beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \text{ коефіцієнт}$$

зворотного зв'язку (рис. 12.15 б, в).

У схемі автоколивального мультивібратора (рис. 12.15 б) виникає режим самозбудження за рахунок другого зворотного зв'язку через R_3C ланку.

Передбачимо, що у момент t_1 (рис. 12.15 в) напруга $U_{вих}$ змінилася стрибком з $U_{вих}^-$ до $U_{вих}^+$. Конденсатор C починає перезаряджатися струмом, який протікає через резистор R_3 під дією $U_{вих}^+$, причому напруга на конденсаторі U_C змінюється по експоненті, прагнучи до $U_{вих}^+$. Напруга U_C є вхідною напругою U_{ex} інвертуючого підсилювача, і коли у момент t_2 вона досягне значення U_2 , вихідна напруга ОП стрибком зміниться з $U_{вих}^+$ на $U_{вих}^-$. Конденсатор починає перезаряджатися, прагнучи до $U_{вих}^-$, але досягнувши U_1 до моменту t_3 воно змушує ОП інвертувати вихідну напругу на $U_{вих}^+$. Далі процес повторюватиметься.

Генератори, засновані на розглянутому принципі, називають релаксаційними. Період коливань такого мультивібратора

$$T = 2R_3C \ln\left(\frac{1 + 2R_1}{R_2}\right),$$

Причому $t_{i1} = t_{i2}$. Такий вигляд коливань називають меандром.

12.10 Генератор імпульсів трикутної форми

У RC генераторі трикутних імпульсів (рис. 12.16 а) вхідною напругою U_{ex} тригера, виконаного на ОП1, служить напруга $U_{вих2}$, яка отримується на інверторі - інтеграторі, зібраному на ОП2.

Струм I_C , який проходить через конденсатор C , дорівнює множенню його ємності на похідну від різниці потенціалів на його затискачах ($U_C = U_{вих2}$, оскільки потенціал точки А (рис. 12.16 а) близький до нуля)

$$I_C = -\frac{dU_{вих2}}{dt}$$

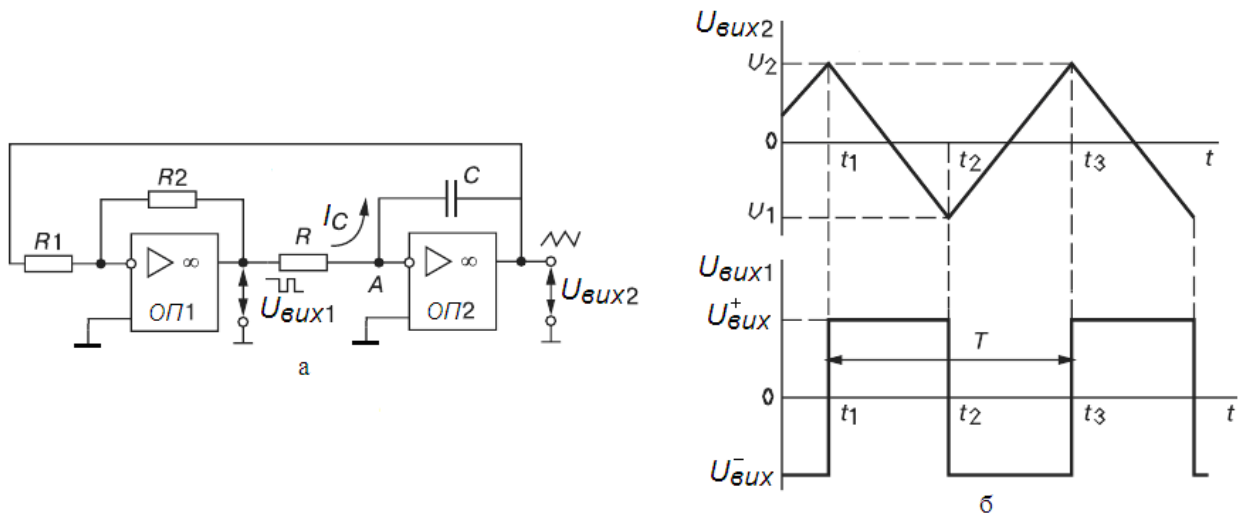


Рисунок 12.16 - Генератор імпульсів трикутної форми

Струм зв'язку між операційними підсилювачами ОП1 і ОП2

$$I_C = \frac{U_{вих1}}{R}.$$

Прирівнявши праві частини двох рівностей, отримаємо:

$$-C \frac{dU_{вих2}}{dt} \approx \frac{U_{вих1}}{R}$$

Проінтегрував цей вираз від 0 до t і розділивши обидві частини на $(-C)$, маємо

$$U_{вих2} - U_{вих0} \approx -\frac{1}{RC} \int_0^t U_{вих} dt,$$

де $U_{вих0}$ – напруга на генераторі при $t = 0$.

Нехай у момент часу t_1 (рис. 12.16 б) з тригера на вхід ОП2 подана напруга $U_{вих}^+$. Оскільки $U_{вих}^+ = const$ (а інтеграл від постійного значення пропорційний часу t), то напруга $U_{вих2}$ змінюється по прямій лінії до тих пір, поки в момент t_2 вона не досягне значення U_2 , при якому тригер перемикається і на вхід інтегратора буде подано напругу $U_{вих}^-$. З моменту t_2 конденсатор почне перезаряджатися, і напруга на ньому лінійно зростає до моменту t_3 , після чого процеси повторюються.

Амплітуда трикутної напруги визначається напругою перемикавання

тригера і дорівнює

$$|U_{\text{вих}}| \cdot \frac{R1}{R2}.$$

Період коливань

$$E = 4RC \frac{R1}{R2}.$$

12.11 Чекаючий мультивібратор

Цей генератор має стан стійкої рівноваги і квазірівноваги. Під дією зовнішнього запускаючого імпульсу генератор виходить із стану стійкої рівноваги, але завдяки внутрішнім процесам перерозподілу енергії мимоволі повертається в стійкий стан.

Такі генератори (одновібратори) називають чекаючими. Їх отримують з мультивібраторів, загальмувавши їх роботу. Так, якщо в схемі (рис. 12.15 б) зашунтувати конденсатор C діодом VD (рис. 12.17), то конденсатор, розрядившись від U_1 до $U_C = 0$ (рис. 12.15 в), перестане перезаряджатися під дією U^+ , тому що струм від резистора $R3$ пройде через відкритий діод, а значить напруга на конденсаторі не досягне значення U_2 і автоколивання зірвуться.

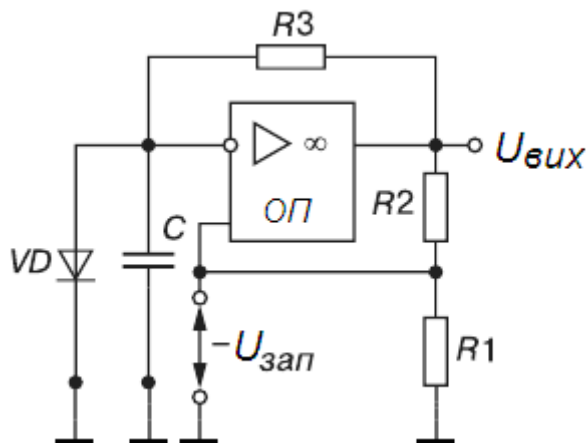


Рисунок 12.17 - Чекаючий мультивібратор

Генератор може бути запущений, якщо на неінвертуючий вхід ОП подати негативний імпульс запуску $-U_{\text{зап}}$. еквівалентний напрузі $U_{\text{ех}}$ на інвертуючому вході.

12.12 Генератор пилкоподібної напруги

Прямолінійна наростаюча напруга виходить на конденсаторі, якщо його заряджати постійним (по величині) струмом $I_C = const$, не залежним від напруги U_C на ньому, і запобігти впливу на цей струм опору навантаження.

Тоді інтегруючи за часом вираження

$$I_C = C \frac{dU_C}{dt} = const$$

розділивши змінні, отримуємо:

$$\int dU_C = \frac{I_C}{C} \int dt \text{ або } U_C = \frac{I_C}{C} t.$$

Умова $I_C = const$ в схемі (рис. 12.18 а) з операційним підсилювачем забезпечується постійною напругою U_{ex} . Поки вхідний транзистор VT закритий, протягом часу t_n (рис. 12.18 б) відбувається зарядка конденсатора C і його вихідна напруга U_C наростає по прямій.

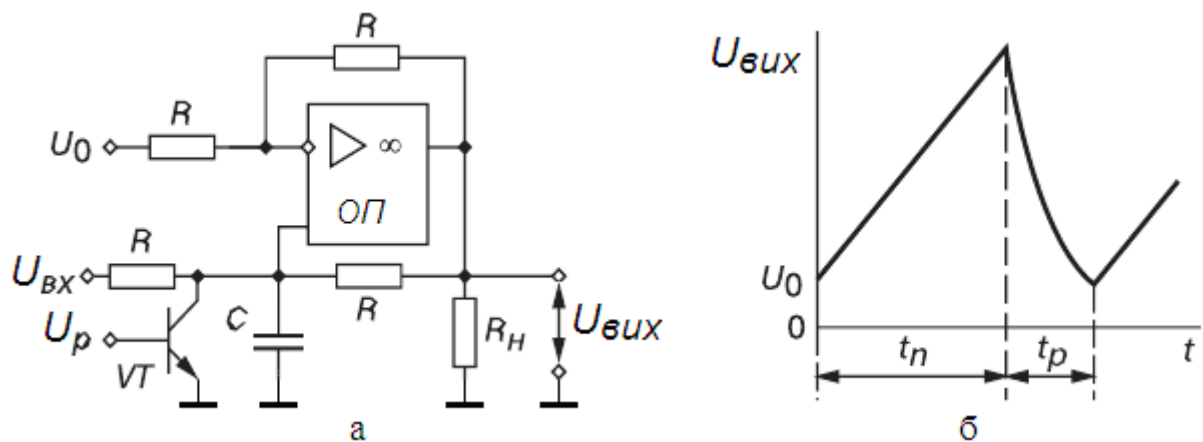


Рисунок 12.18 - Генератор пилкоподібної напруги

При подачі імпульсу U_p транзистор VT насичується, конденсатор швидко (за час t_p) розряджається через малий (у декілька ом) опір відкритого транзистора VT , після чого процес зарядки конденсатора повторюється, а напруга $U_{вих}$ набуває пилкоподібної форми (рис. 12.18 б).

Тривалість t_n визначається значеннями ємності C і струму зарядки, залежним від напруги U_{ex} і опорів резисторів R схеми. Змінюючи значення на-

пруги U_0 , поданої на інший вхід підсилювача, можна "зміщувати пилу" по вертикалі. Пилкоподібна форма $U_{вих}$ зберігається до тих пір, поки вона розташовується усередині граничних значень вихідної напруги $U_{вих}^+$ операційного підсилювача (рис. 12.15 а). При однакових опорах R схеми вихідна напруга

$$U_{вих} = \frac{2}{RC} \int U_{ex} dt - U_0 .$$