



Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет

Кобяков О. М., Бражник І. Є., Єрьоменко Ю. С.

ІМПУЛЬСНІ ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ

Конспект лекцій

Суми
Сумський державний університет
2021

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет

ІМПУЛЬСНІ ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ

Конспект лекцій

для студентів спеціальності 171 «Електроніка»
денної форми навчання

Затверджено на засіданні
кафедри електроніки
і комп'ютерної техніки
як конспект лекцій
із дисципліни
«Твердотільна електроніка».
Протокол № 17 від 06.04.2021.



Суми
Сумський державний університет
2021

Імпульсні електронні пристрої : конспект лекцій / укладачі:
О. М. Кобяков, І. Є. Бражник, Ю. С. Єрьоменко. – Суми : Сумський
державний університет, 2021. – 43 с.

Кафедра електроніки і комп'ютерної техніки

Зміст







	С.
1 Загальні відомості про імпульсні сигнали	4
2 Нерегенеративні імпульсні пристрої.....	6
2.1 Формувальні ланцюжки.....	6
2.2 Діодні обмежувачі.....	9
2.3 Електронні ключі на біполярних транзисторах.....	11
2.4 Генератори пилкоподібної напруги.....	19
3 Регенеративні імпульсні пристрої.....	23
3.1 Тригери.....	23
3.2 Релаксаційні генератори прямокутних імпульсів... ..	27
Список літератури.....	42

1 Загальні відомості про імпульсні сигнали

До імпульсних електронних пристроїв (ІЕП) належать такі пристрої, що працюють у переривистому (імпульсному) режимі. Вони знаходять досить широке застосування в аналоговій і, подекуди, цифровій електроніці та здійснюють функції формування, генерування, перетворення і селекції імпульсів.

Імпульс – це короткотривала зміна напруги або струму в електричному колі, тривалість якої співвимірна або менша за час перехідних процесів. Розрізняють радіоімпульси – часові відрізки високочастотних коливань, і відеоімпульси – короткотривалі зміни напруги в колі постійного струму.

За формою розрізняють такі імпульси:

- прямокутний  ;
- трапецієподібний  ;
- експоненціальний  ;
- трикутний  ;
- дзвоноподібний  ;
- пилкоподібний  .

Періодична послідовність прямокутних відеоімпульсів має такі параметри (рис. 1.1), де:

- τ_U – тривалість імпульсу;
- τ_n – тривалість паузи;
- $q = \frac{T}{\tau_u}$ – шпаруватість;
- U_m – амплітуда імпульсу;
- T – період повторення ($F = \frac{1}{T}$ – частота повторення).

Якщо в послідовності імпульсів, наведених на рисунку 1.1, тривалість імпульсу $\tau_u = \tau_n$, проте шпаруватість $q = 2$, то така послідовність називається *меандром*.

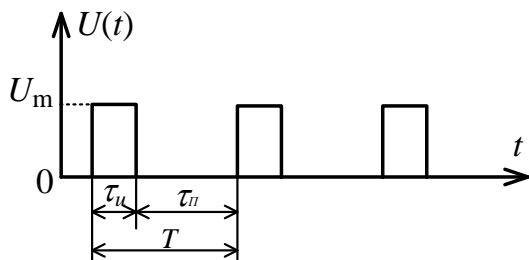


Рисунок 1.1 – Послідовність імпульсів

Перепадами напруг називаються стрибкоподібні зміни напруги. Розрізняють позитивний і негативний перепади напруги (рис. 1.2).

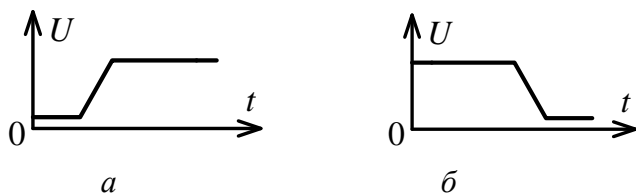


Рисунок 1.2 – Перепади напруг:
а) позитивний; б) негативний

Реальний відеоімпульс зображений на рисунку 1.3.

Він має такі параметри:

- U_m – амплітуда;
- τ_ϕ – тривалість фронту;
- $\tau_{сп}$ – тривалість спаду;
- τ_u – тривалість, виміряна на рівні $0,1U_m$.

Імпульси є сигналами, тобто електромагнітними процесами, що переносять інформацію. Інформація може бути закодована в будь-якому параметрі імпульсу (тривалості, амплітуді, періоді, формі тощо).

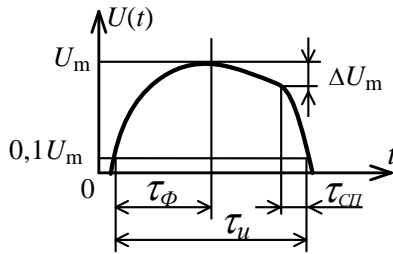


Рисунок 1.3 – Реальний відеоімпульс

У сучасній імпульсній електроніці тривалості імпульсів мають діапазон зміни від часток наносекунд до одиниць секунд.

Імпульсні електронні пристрої розподіляються:

- **за принципом дії** – регенеративні та нерегенеративні.

Регенеративні – це такі ІЕП, у яких стрибкоподібні зміни струму і напруги зумовлені як поданням на них зовнішніх збуджувальних дій, так і внутрішніми процесами у схемі.

Нерегенеративні – це такі ІЕП, у яких стрибкоподібні зміни струму і напруги, викликані внутрішніми процесами у схемі, відсутні;

- **за призначенням** – на формувачі, генератори, пристрої керування імпульсами, імпульсні підсилювачі, електронні ключі, запам'ятовувальні пристрої, селектори, модулятори тощо.

2 Нерегенеративні імпульсні пристрої

До нерегенеративних імпульсних пристроїв належать: формувальні ланцюжки, діодні обмежувачі, електронні ключі, генератори пилкоподібної напруги (ГПН), а також імпульсні підсилювачі.

2.1 Формувальні ланцюжки

Формувальні ланцюжки – це пасивні імпульсні кола, що дозволяють сформувати імпульси потрібної тривалості та форми.

Диференціальний ланцюжок. Схема такого пристрою подана на рисунку 2.1.

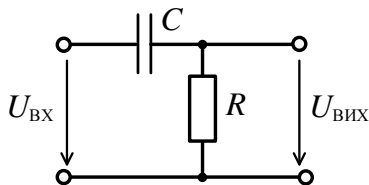


Рисунок 2.1 – Диференціальний ланцюжок

Нехай на вхід схеми надходить прямокутний імпульс напруги (рис. 2.2). Ємність C заряджається струмом $i(t)$, і на вихідному опорі R виділяється напруга, що своєю формою відтворює форму струму $i(t)$.

За другим законом Кірхгофа

$$U_{\text{ВХ}}(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt + i(t)R. \quad (2.1)$$

Якщо стала часу диференціального ланцюжка $\tau = RC \ll \tau_u$, то другий доданок правої частини (2.1) буде досить малим, і

$$U_{\text{ВХ}}(t) \approx \frac{1}{C} \int i(t) dt, \quad (2.2)$$

або $i(t) \approx C \frac{dU_{\text{ВХ}}(t)}{dt}$.

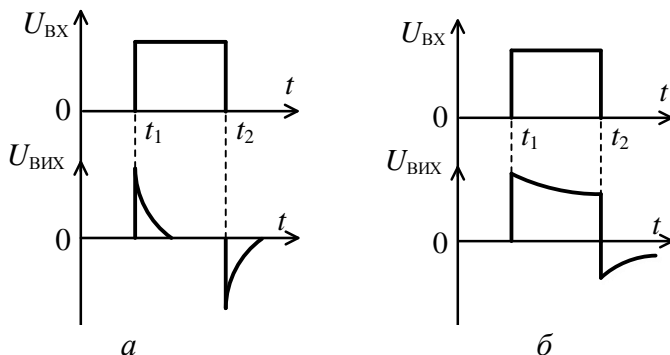


Рисунок 2.2 – Часові діаграми напруг:

а) диференціального ланцюжка; б) перехідного ланцюжка

Тоді

$$U_{\text{Вих}}(t) = i(t)R = RC \frac{dU_{\text{Вх}}(t)}{dt}. \quad (2.3)$$

Із формули (2.3) випливає, що даний RC -ланцюжок є диференціальним, і його робота ілюструється рисунком 2.2 а.

У разі, коли стала часу RC -ланцюжка $\tau = RC \gg \tau_u$, то робота пристрою проілюстрована рисунком 2.2 б. Ємність C не встигає зарядитися упродовж дії вхідного імпульсу, і ланцюжок (див. рис. 2.1) поводить себе як перехідний, тобто він передає вхідний імпульс на вихід із мінімальним спотворенням.

Інтегральний ланцюжок. Схема пристрою подана на рисунку 2.3.

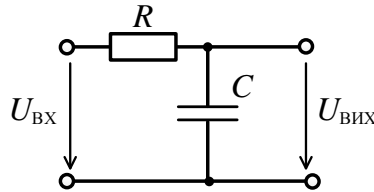


Рисунок 2.3 – Інтегральний ланцюжок

Нехай на вхід схеми надходить прямокутний імпульс напруги (рис. 2.4).

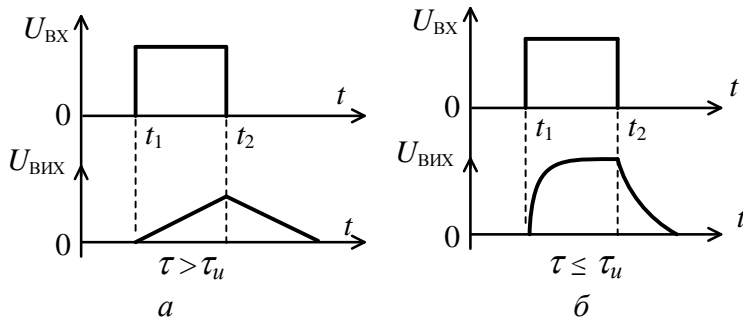


Рисунок 2.4 – Часові діаграми напруг:
а) інтегрального ланцюжка; б) перехідного ланцюжка

Вихідна ємність C заряджається струмом $i(t)$, а напруга на виході змінюється за законом

$$U_{\text{вих}}(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt. \quad (2.4)$$

Якщо стала часу RC -ланцюжка на рисунку 2.3 $\tau > \tau_u$, то у перехідному режимі

$$i(t) \approx \frac{U_{\text{вх}}(t)}{R}. \quad (2.5)$$

З урахуванням виразу (2.5) остаточно для (2.4) одержимо

$$U_{\text{вих}}(t) = \frac{1}{CR} \int U_{\text{вх}}(t) dt. \quad (2.6)$$

З останньої рівності випливає, що за $\tau = RC > \tau_u$ ланцюжок на рисунку 2.3 є інтегрувальним і працює в режимі «розтягнення» вхідних імпульсів, як це подано на рисунку 2.4 а.

Якщо параметри інтегрувального ланцюжка зумовлюють малу сталу часу $\tau = RC \leq \tau_u$, то даний ланцюжок працює як перехідний (рис. 2.4 б).

2.2 Діодні обмежувачі

Діодні обмежувачі – це різновид формувальних пристроїв, які дозволяють із синусоїдної вхідної напруги одержати періодичну послідовність дзвоноподібних імпульсів.

Робота цих пристроїв ґрунтується на одночасній дії на діод вхідної змінної напруги і постійної напруги джерела зміщення (у схемах рисунків 2.5 і 2.6 напруга зміщення $E_{\text{зм}} = 0$).

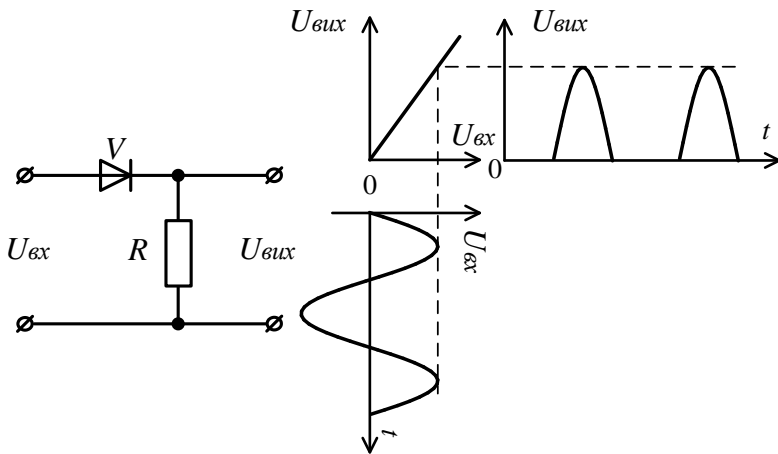


Рисунок 2.5 – Діодний послідовний обмежувач із нульовим рівнем вмикання

У кожній із наведених схем зміна полярності підключення діода призводить до зміни полярності вихідних імпульсів – інвертування (рис. 2.7 – 2.8).

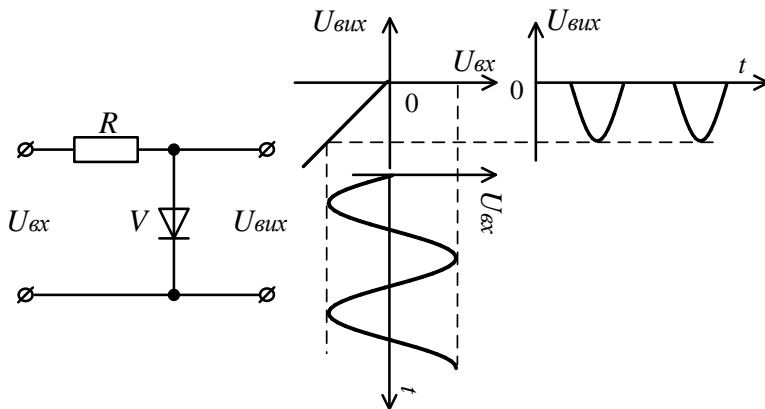


Рисунок 2.6 – Діодний паралельний обмежувач із нульовим рівнем вмикання

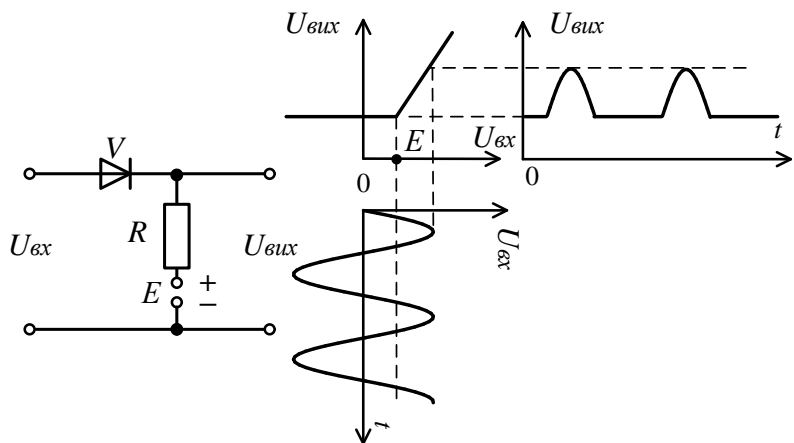


Рисунок 2.7 – Діодний послідовний обмежувач із ненульовим рівнем вмикання

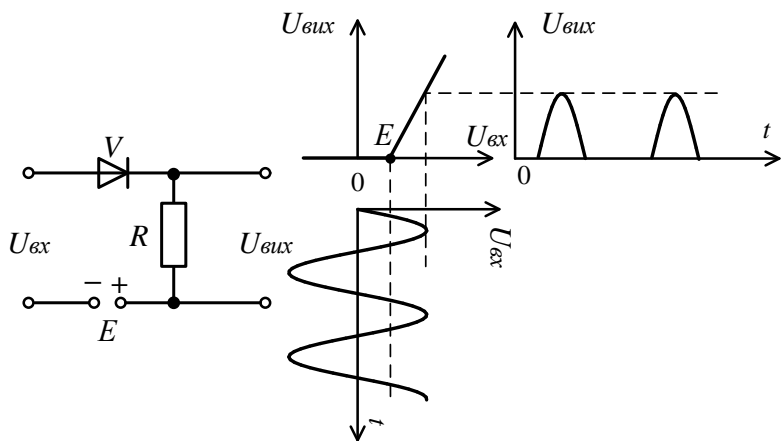


Рисунок 2.8 – Діодний паралельний обмежувач із ненульовим рівнем вмикання

2.3 Електронні ключі на біполярних транзисторах

Електронний ключ – це схема, що здійснює розмикання і замикання кола навантаження за допомогою керувальних входних сигналів. Еквівалентна схема ідеального ключа наведена на рисунку 2.9.

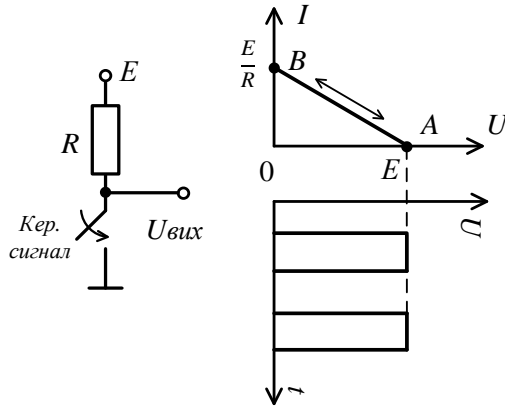


Рисунок 2.9 – Ідеальний ключ

Параметри ідеального ключа:

- опір у замкненому стані $r_3 = 0$;
- опір у розімкненому стані $r_{роз} = \infty$;
- напруга $U_{вих} = 0$ для замкненого ключа;
- $U_{вих} = E$ для розімкненого ключа.

Еквівалентна схема реального ключа наведена на рисунку 2.10.

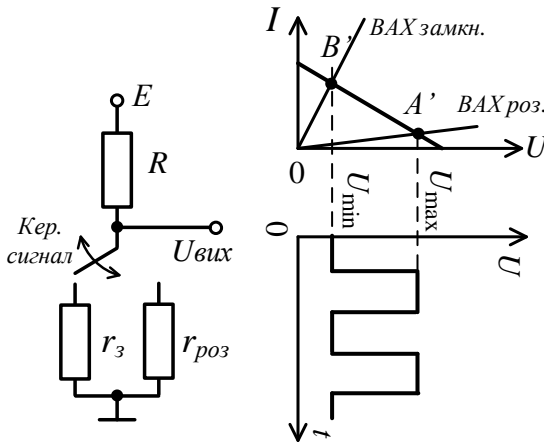


Рисунок 2.10 – Реальний ключ

Параметри реального ключа:

- опір у замкненому стані $r_3 > 0$;
- опір у розімкненому стані $r_{роз} < \infty$, $r_{роз} \gg r_3$;
- напруга $U_{вих} = U_{min} > 0$ у замкненому стані;
- $U_{вих} = U_{max} < E$ для розімкненого ключа.

Основні вимоги до електронних ключів

1 $r_3 \rightarrow 0$, $r_{роз} \rightarrow \infty$.

2 Залишкова напруга $U_{min} \rightarrow 0$.

3 $I_{роз} \rightarrow 0$.

4 Швидкодія. Пов'язана з перехідними процесами в електронних ключах і оцінюється частотою перемикаць:

$$F = \frac{1}{t_{вмик} + t_{роз}},$$

де $t_{вмик}$ – час замикання ключа;

$t_{роз}$ – час розмикання.

Мінімізація часів $t_{вмик}$ і $t_{роз}$ зумовлює забезпечення щонайбільшої частоти перемикаць F .

5 Коефіцієнт застосування джерела живлення:

$$\varepsilon = \frac{U_{вих\ max}}{E} \rightarrow 1.$$

6 Навантажувальна здатність ключа – мінімальний опір навантаження $R_{H\ min}$, за якого ε не зменшується нижче за заданий рівень, – повинна бути якнайвищою (опір $R_{H\ min} \rightarrow 0$).

Нормально-розімкнений електронний ключ на біполярному транзисторі

Принципова схема електронного ключа на транзисторі подана на рисунку 2.11 а, динаміка роботи пристрою з навантажувальною вихідною характеристикою – на рисунку 2.11 б, де т. 1 – режим відсікання (РВ), т. 2 – АР, т. 3 – режим насичення (РН).

Склад схеми: біполярний транзистор V_1 , джерело колекторного живлення ($-E_K$), джерело базового зміщення $+E_B$,

R_B – базовий опір, R_K – колекторний опір, C_p – вихідна розділювальна ємність.

У початковому стані прилад V_1 закритий і перебуває у режимі відсікання (РВ), бо $+E_B$ прикладений до бази транзистора. Струм спокою I_{B_0} протікає по колу: $+E_B \rightarrow R_B \rightarrow$ ділянка «база – емітер» $V_1 \rightarrow$ корпус $\rightarrow (-E_B)$.

Струм спокою I_{K_0} протікає по колу: корпус ($+E_K$) \rightarrow внутрішній опір джерела $E_B \rightarrow R_B \rightarrow$ ділянка «база-колектор» $V_1 \rightarrow R_K \rightarrow (-E_K)$.

Одночасно за I законом Кірхгофа $I_{B_0} = I_{E_0} + I_{K_0} \approx I_{K_0}$ (з огляду на те, що струм I_{E_0} у РВ малий).

Спад напруги на опорі R_B $U_{R_B} = I_{K_0} R_B$ має тенденцію відкрити транзистор V_1 .

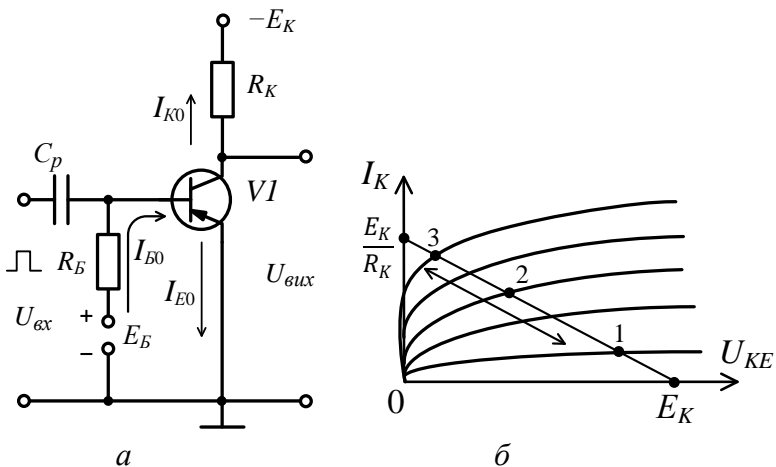


Рисунок 2.11 – Схема електронного ключа (а) і його навантажувальна характеристика (б)

Для запобігання цьому потрібно використовувати умову запирання V_1

$$E_B > I_{K_0 \max} R_B. \quad (2.7)$$

Зазвичай $E_B = (0,1 \dots 0,2) E_K$, а отже,

$$R_B \leq \frac{(0,1\dots 0,2)E_K}{I_{K0 \max}}. \quad (2.8)$$

На виході електронного ключа в початковому режимі діє напруга: $U_{\text{вих}} = E_K - I_{K0} R_K \approx E_K$.

У момент t_1 на схему починає діяти негативний за полярністю відкривальний імпульс (див. рис. 2.12 – часові діаграми роботи електронного ключа). Амплітуда вхідного імпульсу повинна бути

$$U_{\text{вх}} > E_B - I_{K0} R_B + I_B R_{\text{вх}}, \quad (2.9)$$

де $R_{\text{вх}} = \frac{R_B r_E}{R_B + r_E} \approx r_E$ – вхідний опір транзистора.

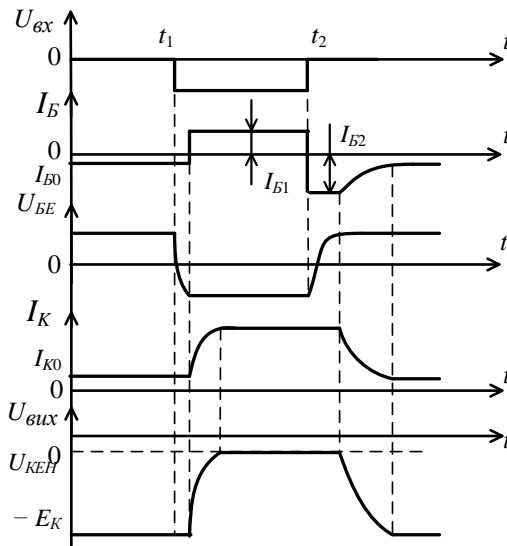


Рисунок 2.12 – Часові діаграми струмів і напруг нормально-розімкненого електронного ключа

Умова (2.9) є умовою відкривання V_1 на час, рівний тривалості вхідного імпульсу. Для переведення приладу V_1 у режим насичення (РН) потрібно струм бази збільшити до величини струму бази насичення $I_{Bн}$, причому амплітуда відкривального імпульсу повинна бути

$$U_{\text{вхн}} \geq I_{\text{Бн}} r_E, \quad (2.10)$$

де r_E – опір емітера (знаходиться за довідником).

Під дією імпульсу на вході електронного ключа транзистор V_1 переходить до РН.

Вихідна напруга схеми одночасно зменшується до незначної залишкової напруги ключа

$$U_{\text{вих}} = I_{\text{Кн}} r_{iV_1} = U_{\text{КЕн}},$$

оскільки внутрішній опір насиченого транзистора V_1 $r_{iV_1} \rightarrow 0$. Транзистор V_1 залишиться відкритим і насиченим упродовж дії вхідного імпульсу (до моменту t_2 на рисунку 2.12). Після завершення початковий стан електронного ключа відновиться.

Поступовість (немиттєвість) замикання і розмикання ключа в часі зумовлена інерційними процесами інжекції та екстракції неосновних нерівноважних носіїв у базі [5].

Описаний тут нормально-розімкнений електронний ключ є базовим для побудови більшості імпульсних електронних пристроїв.

Нормально-замкнений електронний ключ на біполярному транзисторі

Схема такого ключа подана на рисунку 2.13.

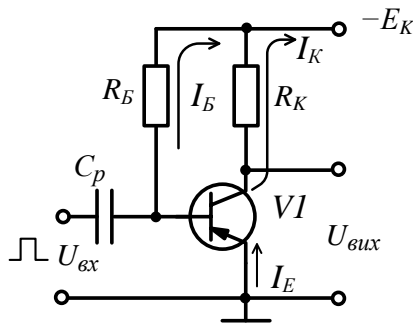


Рисунок 2.13 – Схема нормально-замкненого електронного ключа

На рисунку 2.14 представлені часові діаграми роботи пристрою.

Початковий режим біполярного транзистора V_1 – режим насичення: на базу приладу через опір R_B подається негативне зміщення від джерела ($-E_K$).

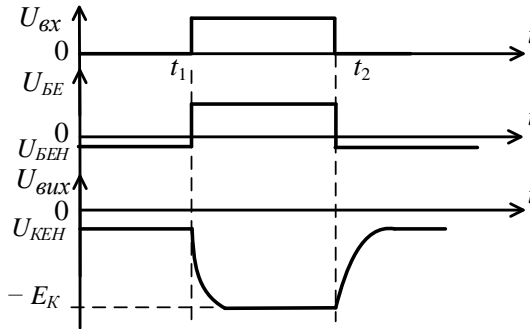


Рисунок 2.14 – Часові діаграми напруг нормально-замкненого електронного ключа

Транзистор «стискується» в потенціальну точку (його внутрішній опір $r_{iV_1} \rightarrow 0$). Для забезпечення початкового режиму насичення потрібно виконати умову $I_B > I_{BН}$.

Оскільки опір емітера V_1 r_E має мале значення, то

$$I_B = \frac{E_K}{R_B + r_E} \approx \frac{E_B}{R_B}. \quad (2.11)$$

З іншого боку, струм бази в РН

$$I_{BН} \approx \frac{I_{KН}}{\beta}, \quad (2.12)$$

де $I_{KН}$ – струм колектора в РН;

β – статичний коефіцієнт підсилення транзистора за струмом.

У РН струм колектора

$$I_{KН} = \frac{E_K - U_{KEН}}{R_K} \approx \frac{E_K}{R_K} \quad (2.13)$$

(бо $E_K \gg U_{KEН}$).

Отже, підставивши (2.13) до (2.12), одержимо

$$I_{Бн} = \frac{E_K}{\beta R_K}. \quad (2.14)$$

Із порівняння рівності (2.11) і виразу (2.14) одержимо умову насичення транзистора V_1 :

$$R_B \leq \beta R_K. \quad (2.15)$$

У момент часу t_1 до схеми рисунка 2.13 надходить позитивний закривальний імпульс, амплітуда якого дозволяє перевести транзистор V_1 із РН до РВ. Транзистор V_1 закривається, і на його виході через деякий час (зумовлений «розсмоктуванням» носіїв у базі переважно за рахунок екстракції – див. рисунок 2.14, вихідна діаграма напруги ключа) встановлюється висока (приблизно $(-E_K)$) напруга за малого зворотного колекторного струму I_{KB_0} .

Після закінчення дії в момент часу t_2 вхідного імпульсу насичений стан V_1 за рахунок інжекції носіїв у базі поступово відновлюється, як це подано на вихідній діаграмі рисунка 2.14.

Засоби підвищення швидкодії електронних ключів

1 Збільшення базового струму під час замикання (відкривання) нормально-розімкненого електронного ключа (за рахунок перезарядження ємності C у базовому колі V_1 – рисунок 2.15).

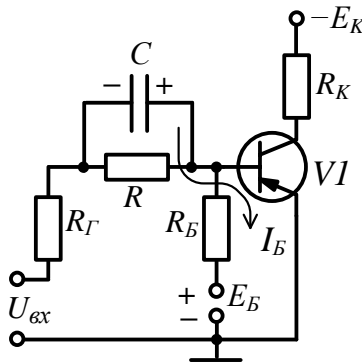


Рисунок 2.15 – До збільшення швидкодії нормально-розімкненого ключа

2 Застосування нелінійного зворотного зв'язку, що перетворює електронний ключ на ненасичений. Це досягається вмиканням між базою і колектором V_1 діода Шотткі, як це подано на рисунку 2.16.

У РВ і АР потенціали колектора і бази $\varphi_K < \varphi_B$, діод Шотткі закритий і транзистор V_1 працює у звичайному режимі.

У РН $\varphi_K > \varphi_B$, діод Шотткі відкривається, і переважна частина струму бази протікає до колектора через діод. Надлишковий заряд у базі не накопичується, а отже, у разі розмикання електронного ключа (переведенні V_1 із режиму насичення до режиму відсікання) стадія розсмоктування надлишкового заряду в базі буде відсутньою.

Швидкодія ключа з діодом Шотткі зростає порівняно із ключем за традиційною схемою.

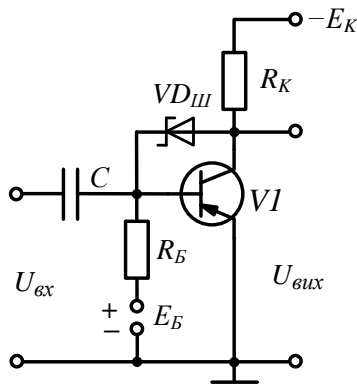


Рисунок 2.16 – Ненасичений електронний ключ із діодом Шотткі

3 Застосування в ключових схемах транзисторів із високою граничною частотою (вузькобазові, дрейфові та планарні біполярні транзистори).

2.4 Генератори пилкоподібної напруги

Генератори пилкоподібної напруги (ГПН) призначені для генерування напруги, що лінійно змінюється в часі.

Пилкоподібна напруга застосовується для розгортання

променя в електронно-променевих трубках із електростатичним відхиленням. Найпростіший ГПН, поданий на рисунку 2.17 – це електронний нормально-замкнений ключ, що комутує коло заряджання-розряджання вихідної ємності C .

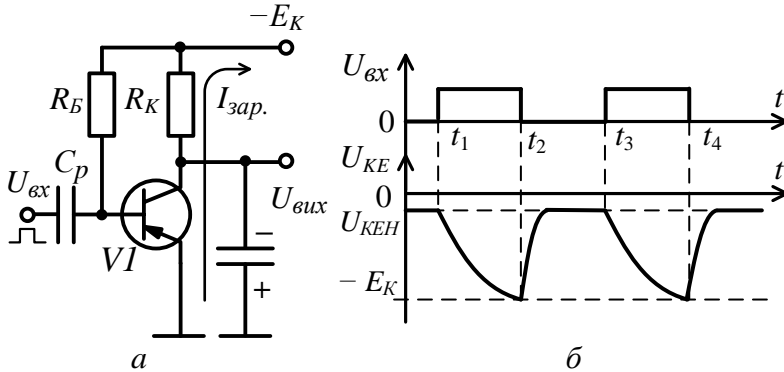


Рисунок 2.17 – Найпростіший ГПН:
а) схема генератора; б) діаграма напруг

У початковому стані транзистор V_1 як основний елемент ключа перебуває у РН, а конденсатор C розряджений до величини напруги $U_{КЕН}$.

У момент надходження на вхід схеми позитивного запирального імпульсу V_1 переходить до РВ, і ємність C заряджається по колу: корпус $\rightarrow C \rightarrow$ опір $R_K \rightarrow (-E_K)$ до величини, близької до напруги $(-E_K)$. У момент t_2 припиняється дія вхідного імпульсу, транзистор V_1 переходить із РВ до РН, і ємність C швидко розряджається до напруги $U_{КЕН}$. У такій схемі неможливо забезпечити якісну лінійну пилкоподібну напругу, оскільки остання змінюється на конденсаторі за експоненціальним законом.

Для одержання лінійного закону зміни пилкоподібної напруги потрібно мати сталий струм заряду ємності C :

$$U_C(t) = \frac{1}{C} \int i_C(t) dt = \frac{1}{C} \int I dt = \frac{I(t)}{C}, \quad (2.16)$$

де I – сталий струм заряду ємності.

Тому для підвищення лінійності пилкоподібної напруги у ГПН застосовують стабілізацію струму заряду. Прикладом такого ГПН є генератор пилкоподібної напруги зі струмостабілізуювальним двополюсником (рис. 2.18).

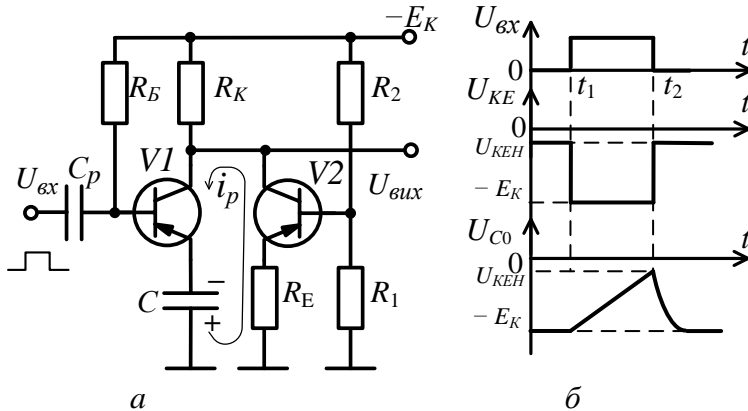


Рисунок 2.18 – ГПН зі струмостабілізуювальним двополюсником:
а) схема, б) діаграми напруг

Склад схеми: V_1 , R_B , R_K , C_p – нормально замкнений електронний ключ; C – робоча ємність ГПН; V_2 , R_E , R_1 , R_2 – струмостабілізуювальний двополюсник. Даний двополюсник є, по суті, транзисторним каскадом за схемою зі спільним емітером. На пологій ділянці вихідної характеристики транзистор V_2 забезпечує високий диференційний опір, а отже – стабілізацію колекторного струму в широких межах зміни колекторної напруги.

У схемі (див. рис. 2.18) колекторний струм транзистора V_2 і є струмом розряду ємності C , і тому забезпечується висока лінійність вихідної пилкоподібної напруги ГПН.

У початковому стані транзистор V_1 відкритий і насичений, а V_2 перебуває в активному режимі. Ємність C заряджена до високої напруги ($-E_K$) у колі: корпус $\rightarrow C \rightarrow$ відкритий $V_1 \rightarrow$ опір $R_K \rightarrow (-E_K)$. Із надходженням на вхід схеми позитивного запирального імпульсу транзистор V_1 переходить до РВ, і ємність C починає розряджатись по колу: $+C \rightarrow$ корпус \rightarrow

опір $R_E \rightarrow V_2 \rightarrow (-C)$, причому струм розряду зберігається сталим. На виході схеми формується пілкоподібний імпульс. Після закінчення дії вхідного позитивного імпульсу процес формування лінійно-змінної напруги генератора припиняється, і ємність C знову швидко заряджається через відкритий і насичений V_1 за експоненціальним законом до величини $(-E_K)$. Оскільки стала часу заряджання ємності C менша від сталої часу її розрядження, то спад пілкоподібного імпульсу буде порівняно короткотривалим.

Окремим класом ГПН є генератори на операційних підсилювачах, серед яких найпростіший – ГПН, поданий на рисунку 2.19.

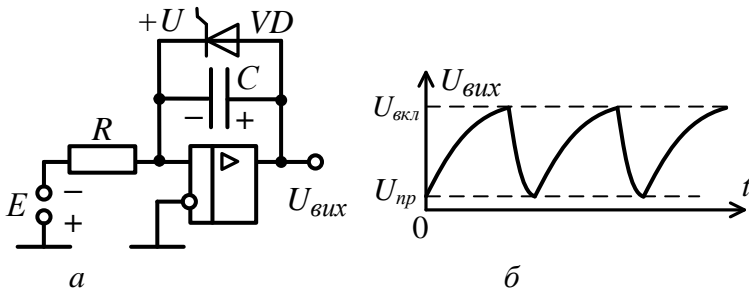


Рисунок 2.19 – ГПН на операційному підсилювачі:
а) схема, б) діаграми напруг

На керувальний електрод триністора VD подається напруга $+U$, що задає певну напругу вмикання приладу $U_{вкл}$, що, зі свого боку, відповідає амплітудному значенню вхідної лінійно-змінної напруги. Під дією вхідного джерела напруги E конденсатор заряджається, і вихідна напруга збільшується за законом, близьким до лінійного. Коли напруга на ємності досягне рівня $U_{вкл}$ триністора, прилад відкривається, конденсатор швидко розряджається через триністор, і вихідна напруга зменшується до величини $U_{пр}$ – спаду напруги на увімкненому тиристорі. Триністор вимикається після закінчення процесу розрядження C , і тоді починається нове зарядження конденсатора C і зростання вихідної напруги.

3 Регенеративні імпульсні пристрої

Регенеративні пристрої мають два види станів рівноваги:

- стійка рівновага, за якої напруги і струми у пристрої не змінюються ($I_C = 0; U_L = 0$) у часі, зберігаючи певне значення необмежено довго; в разі малих відхилень від рівноваги щодо припинення дій, що спричинили це відхилення, пристрій повертається до початкового рівноважного стану;
- квазістійка рівновага, за якої напруги і струми повільно змінюються в часі; цей стан є нескінченним за тривалістю і неодмінно має закінчитися лавиноподібним переходом («перевертанням», спусканням, спрацюванням) або до іншого квазістійкого чи стійкого стану. До регенеративних імпульсних пристроїв належать симетричні і несиметричні тригери, одновібратори і мультівібратори, блокінг-генератори.

3.1 Тригери

Пристрій, який має два стійкі стани рівноваги, що почергово змінюються під впливом зовнішніх сигналів, називається *тригером*. Це, по суті, підсилювач постійного струму, охоплений позитивним зворотним зв'язком, що працює в режимі електронного ключа. Оскільки одночасно вихідна напруга має бути синфазною зі вхідною, то у тригері застосовуються два підсилювальні (ключові) каскади.

Симетричний тригер із лічильним входом на біполярних транзисторах

Такий пристрій є генератором імпульсів прямокутної форми. Вихідний імпульс у ньому формується під впливом надходження послідовно в часі на вхід двох імпульсів, причому перший імпульс формує фронт, а другий – спадання вихідного імпульсу. Отже, тригер є подільником частоти вхідних імпульсів із коефіцієнтом поділу $K_{\text{под}} = 2$.

Схема пристрою подана на рисунку 3.1 а, а на рисунку 3.1 б – часові діаграми напруг, що ілюструють його роботу.

Склад схеми: ключовий каскад V_1, R_2, R_3, C_1, R_1 ; ключовий каскад V_2, R_5, R_4, C_2, R_6 , джерело колекторного живлення ($-E_K$), джерело базового зміщення $+E_B$, діоди запускання VD_1, VD_2 .

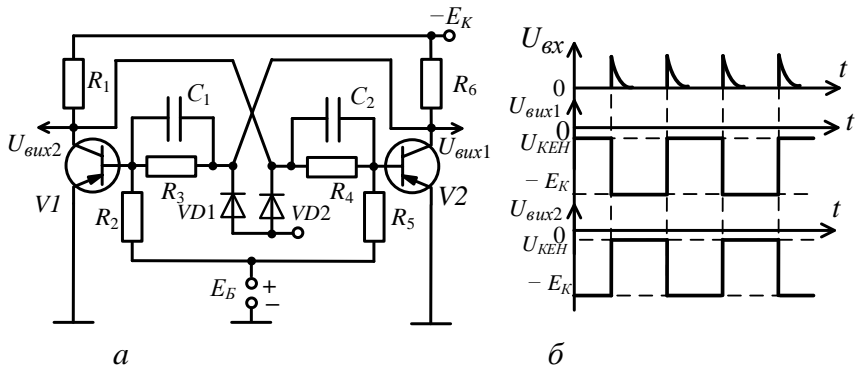


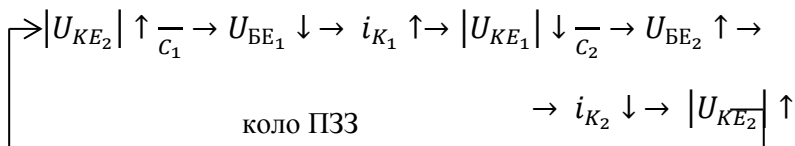
Рисунок 3.1 – Симетричний тригер:
а) принципова схема; б) часові діаграми напруг

Робота схеми. Нехай у початковому стані транзистор V_2 відкритий і перебуває в РН, а V_1 – закритий, у РВ. Це так званий перший стійкий стан рівноваги. V_1 закритий під дією джерела $+E_B$, і високий негативний потенціал ($\approx -E_K$) на його колекторі надійно утримує V_2 у РН. Інакше кажучи, подільник R_4R_5 у колі бази V_2 включений між потенціалами $+E_B$ і ($-E_K$), а номінали опорів підібрані так, щоб потенціал бази V_2 був негативним, достатнім для утримання V_2 у насиченому стані (перевищував за модулем негативний потенціал колектора V_2).

У момент часу t_1 до баз V_1 і V_2 через діоди запускання надходить короткий позитивний імпульс.

Цей імпульс починає закривати V_2 , колекторний струм i_{K_2} зменшується, і напруга на колекторі приладу U_{KE_2} зростає (стає більш негативною). Цей миттєвий негативний перепад напруги передається через ємність C_1 до бази закритого V_1 і починає його відкривати.

Починається процес «перевертання» тригера:



Тут збільшення U_{KE_2} за абсолютним значенням означає, що ця напруга для $p-n-p$ транзистора V_2 стає більш негативною, а зменшення U_{KE_1} за модулем – що ця напруга для V_1 стає менш негативною.

Регенеративний процес перебігає миттєво і завершується зміною стану тригера: V_1 – відкритий і насичений; V_2 – закритий, у РВ. Цей стан триває як завгодно довго, принаймні до надходження подальшого позитивного імпульсу в момент часу t_2 .

Діючи на базу V_1 , цей імпульс закриває перший транзистор, і починається новий регенеративний процес «перевертання» тригера: $|U_{KE_1}| \uparrow \rightarrow U_{BE_2} \downarrow \rightarrow i_{K_2} \uparrow$ і т. д.

Після його завершення початковий описаний стан пристрою відновлюється (V_1 – закритий, V_2 – відкритий і насичений). Вихід 1 у тригері вважається прямим, вихід 2 – інверсним.

Несиметричний тригер на біполярних транзисторах

Схема цього тригера, який називається ще тригером Шмітта, подана на рисунку 3.2 а, а на рисунку 3.2 б наведені часові діаграми його роботи.

Схема містить два ключові каскади на біполярних транзисторах V_1 і V_2 , охоплені позитивним зворотним зв'язком на резисторі R_3 .

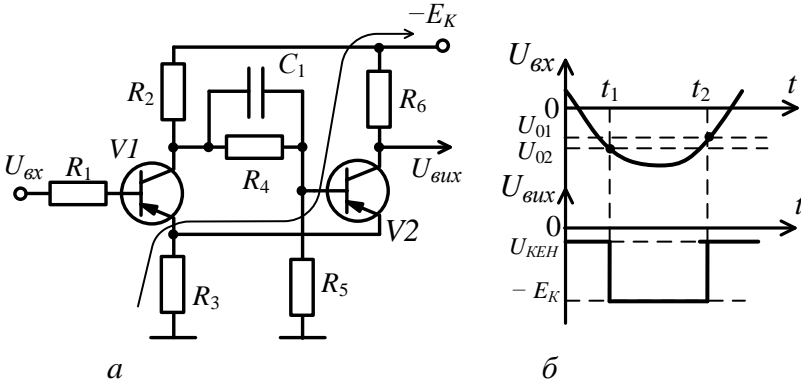
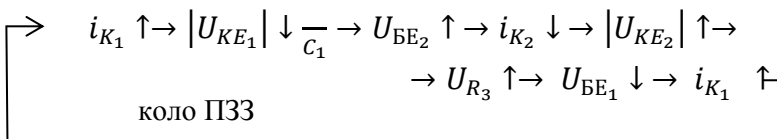


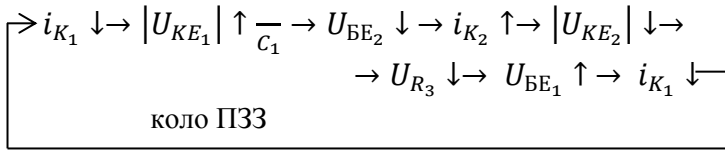
Рисунок 3.2 – Несиметричний тригер:
а) принципова схема; б) часові діаграми

У початковому стані V_1 закритий, у РВ, а V_2 – відкритий і насичений. Стан транзистора V_1 підтримується через те, що емітер приладу підключений до негативного потенціалу подільника напруги R_3 – насичений $V_2 - R_6$. V_2 насичений, оскільки базою через резистор R_4 він підключений до колектора закритого транзистора V_1 , тобто $U_{BE_2} \approx (-E_K)$.

У разі зміни вхідної напруги схеми стан останньої не змінюється доти, поки потенціал бази V_1 не стане більш негативним, ніж потенціал емітера. Це відповідає досягненню вхідною напругою порогового значення U_{O_2} . У цей момент часу t_1 транзистор V_1 відкривається, і починається регенеративний процес:



Після завершення процесу V_1 переходить до РН, а V_2 – закривається. У момент часу t_2 вхідна напруга досягає другого порогового значення U_{O_1} , і у разі подальшій її зміні потенціал бази V_1 стає більшим від потенціалу емітера. V_1 починає закриватися, настає нове «перевертання» тригера:



Унаслідок цього встановлюється початковий стан рівноваги (V_1 закритий, V_2 відкритий і насичений). Отже, на виході тригера Шмітта сформований прямокутний імпульс.

Тригер Шмітта застосовується як схема порівняння (компаратор).

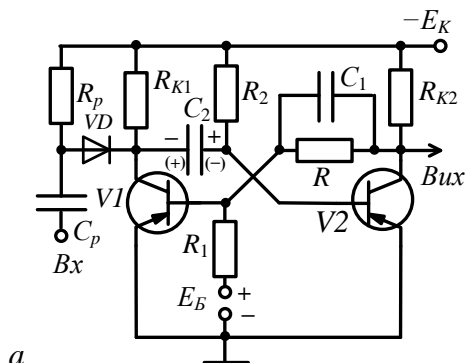
3.2 Релаксаційні генератори прямокутних імпульсів

У генераторів прямокутних імпульсів релаксаційного типу фронти вихідних імпульсів формуються не лише під дією зовнішніх імпульсів, але й за рахунок процесів заряджання-розряджання в ланцюжках, що задають часові проміжки. Ці генератори є регенеративними пристроями з позитивним зворотним зв'язком, у яких стійкий і квазістійкий стани рівноваги або чергуються один з одним, або стійкий стан відсутній взагалі. Першими є генератори в загальмованому режимі (одновібратори, загальмовані блокінг-генератори), другими – генератори в автоколивальному режимі (мультивібратори, автоколивальні блокінг-генератори). Розглянемо ці пристрої окремо.

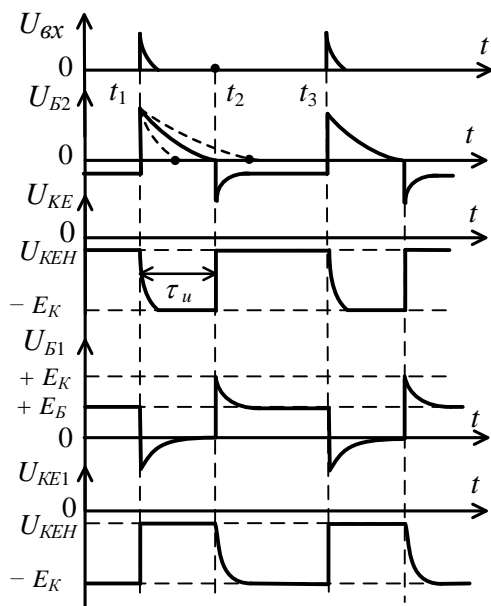
Одновібратор на транзисторах із колекторно-базовими зв'язками

Схема пристрою подана на рисунку 3.3 а, а часові діаграми напруг одновібратора – на рисунку 3.3 б.

Склад схеми: електронні ключові каскади $V_1, R_{K_1}, R_1, E_B; V_2, R_{K_2}$; колекторно-базовий зв'язок $C_1 R_3$; ланцюжок $C_2 R_2$, що задає часовий проміжок; розділювальний ланцюжок $C_p R_p$.



а



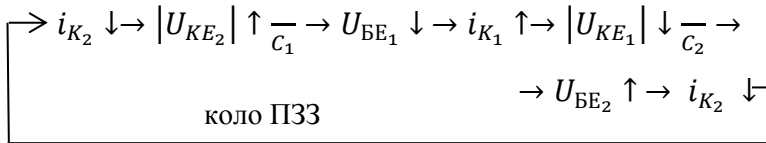
б

Рисунок 3.3 – Одновібратор із колекторно-базовими зв'язками:
а) принципова схема; б) часові діаграми

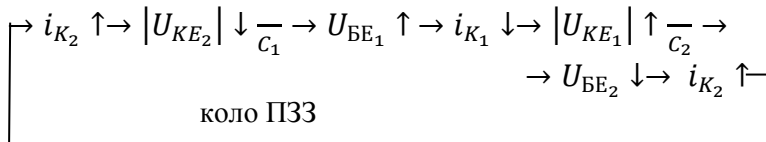
У початковому стані транзистор V_1 закритий за рахунок $+E_B$, V_2 відкритий і насичений за рахунок підключення до бази джерела $(-E_K)$ через опір $R_2 \leq \beta_2 R_{K2}$.

Ємність C_2 , що задає часові проміжки в одновібраторі, заряджена в колі: корпус \rightarrow відкритий $V_2 \rightarrow C_2 \rightarrow (-E_K)$ до напруги $U_{C2_0} \approx +E_K$.

У момент часу t_1 на вхід схеми надходить короткий позитивний імпульс. Транзистор V_2 починає закриватися, запускаючи регенеративний процес першого «перевертання» одновібратора:



Упродовж цього миттєвого процесу заряд конденсатора C_2 зберігається. Після «перевертання» одновібратора транзистор V_1 відкривається і переходить до РН, а V_2 – закривається. Починається новий стан рівноваги – квазістійкий, зумовлений перезарядом ємності C_2 у колі: корпус \rightarrow відкритий $V_1 \rightarrow C_2 \rightarrow R_2 \rightarrow (-E_K)$. Оскільки на правій обкладинці конденсатора C_2 тепер наростає «-», то напруга U_{BE_2} від максимальної позитивної $(+E_K)$ зменшується за експоненціальним законом. Коли напруга U_{BE_2} досягає нуля, V_2 відкривається, і розпочинається друге «перевертання» схеми:



Це «перевертання» приведе одновібратор до нового стану рівноваги, цього разу – стійкого. Цей стан триває як завгодно довго, як у тригері – до чергового надходження запускарного імпульсу. У цьому стані V_1 закритий, V_2 – відкритий і насичений, а C_2 перезаряджається, відновлюючи свій початковий заряд. Оскільки одночасно генератор перебуває в режимі «очікування» запускарного імпульсу, то він часто в літературі називається загальмованим мультівібратором.

Тривалість вихідного імпульсу дорівнює часові перебування одновібратора у квазістійкому стані рівноваги і повністю визначається параметрами ланцюжка C_2R_2 :

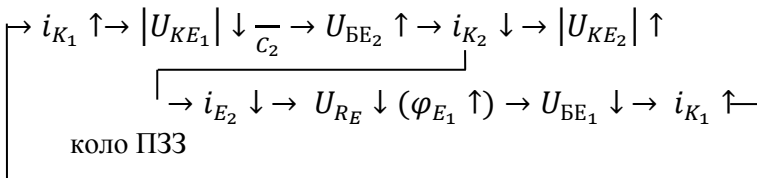
$$\tau_u = C_2R_2 \ln 2 \approx 0,7C_2R_2. \quad (3.1)$$

Одновібратор з емітерним зв'язком

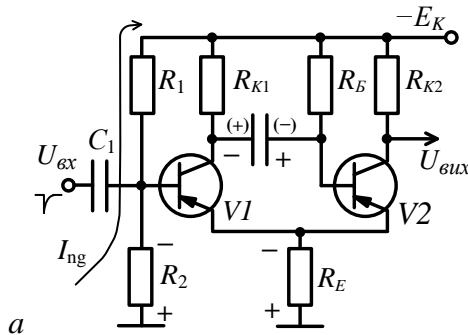
Схема і робота пристрою подані на рисунку 3.4.

Початковий стан. V_2 відкритий і насичений за рахунок джерела $(-E_K)$, напруга якого прикладена до бази транзистора через опір $R_B \leq \beta_2 R_{K2}$. V_1 закритий, оскільки струм I_{E2} , протікаючи через опір R_E , створює спад напруги, який «мінусом» прикладений до емітера V_1 , а отже, $\varphi_{E1} < \varphi_{B1}$. Конденсатор C_2 заряджений у колі: корпус $\rightarrow R_E \rightarrow$ емітер-база $V_2 \rightarrow C_2 \rightarrow R_{K1} \rightarrow (-E_K)$ до напруги, що приблизно дорівнює $(-E_K)$.

Перше «перевертання» і квазістійкий стан рівноваги. У момент часу t_1 негативний вхідний імпульс починає відкривати V_1 . Одновібратор «перевертається»:



коло ПЗЗ



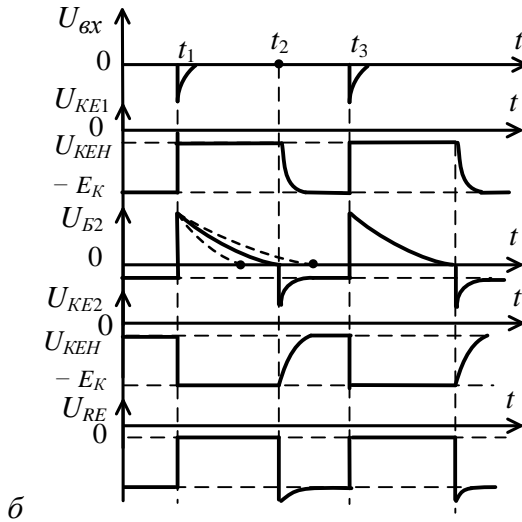
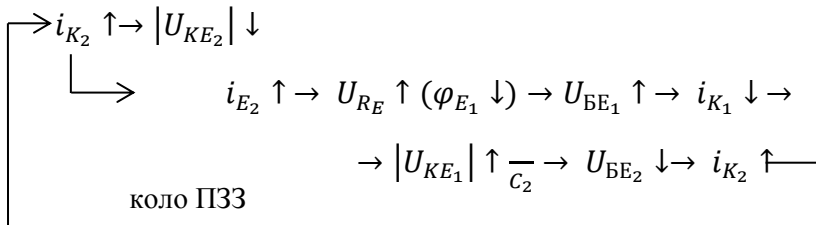


Рисунок 3.4 – Одновібратор з емітерним зв'язком:
а) принципова схема; б) часові діаграми

Наприкінці цього регенеративного процесу настає новий стан одновібратора: V_1 – відкритий і насичений, V_2 – закритий. Починається перезаряджання конденсатора C_2 у колі: корпус $\rightarrow R_E \rightarrow$ відкритий $V_1 \rightarrow C_2 \rightarrow R_B \rightarrow (-E_K)$. У процесі перезаряджання наростає «мінус» правої обкладинки C_2 , і, отже, зменшується за експоненціальним законом напруга U_{BE_2} . За $U_{BE_2} = 0$ починає відкриватися V_2 .

Друге «перевертання» і відновлення початкового стану. Починається новий регенеративний процес:



Після його завершення V_1 закритий, у РВ, V_2 відкритий і насичений. Ємність C_2 перезаряджається до відновлення початкового заряду. Тривалість вихідного імпульсу

$$\tau_U \approx 0,7C_2(R_E + R_B). \quad (3.2)$$

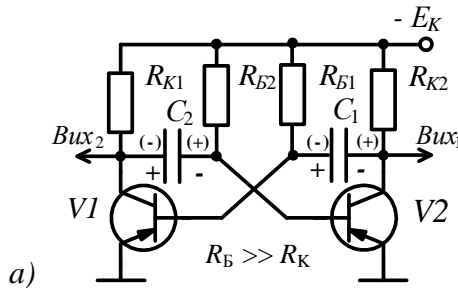
Автоколивальний мультивібратор на транзисторах

Схема і діаграми напруг автоколивального мультивібратора наведені на рисунку 3.5. Цей генератор імпульсів побудований за симетричною схемою і не має стійкого стану рівноваги. Перехід від одного квазістійкого стану до іншого здійснюється внаслідок релаксаційних процесів перезарядження ємностей C_1 і C_2 .

Отже, автоколивальний мультивібратор, на відміну від одновібратора, не потребує надходження зовнішніх імпульсів. «Перевертання» пристрою відбуваються під час почергового досягнення потенціалами безнульових значень за рахунок перезарядження ємностей.

Часові інтервали на діаграмі напруг на рисунку 3.5 б розраховуються за формулами:

$$T' = 0,7C_1R_{B1}, \quad T'' = 0,7C_2R_{B2}. \quad (3.3)$$



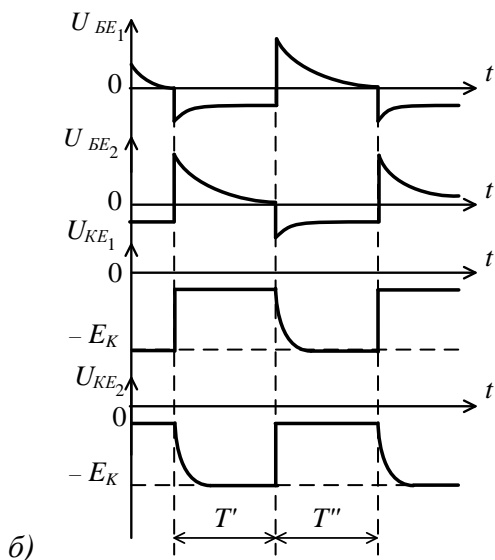
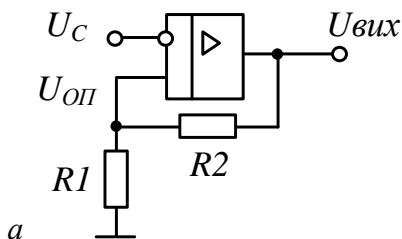


Рисунок 3.5 – Автоколивальний мультивібратор:
а) принципова схема; б) діаграма напруг

Одновібратор на операційному підсилювачі

Операційні підсилювачі (ОП) є найбільш універсальними аналоговими інтегральними схемами, і тому вони успішно застосовуються не лише для побудови лінійних пристроїв, але й під час реалізації різного типу імпульсних пристроїв.

Основою побудови імпульсних генераторів на ОП є схема регенеративного компаратора (рис. 3.6).



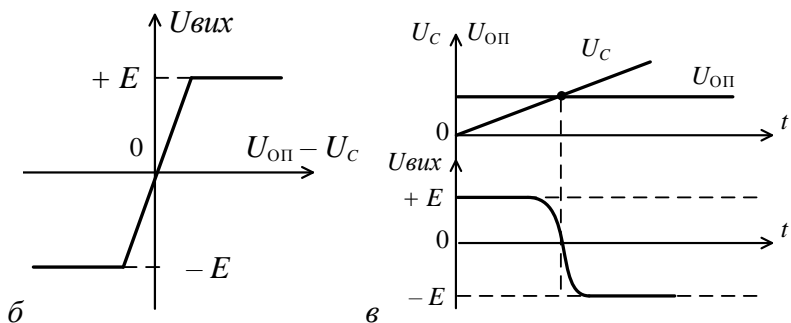
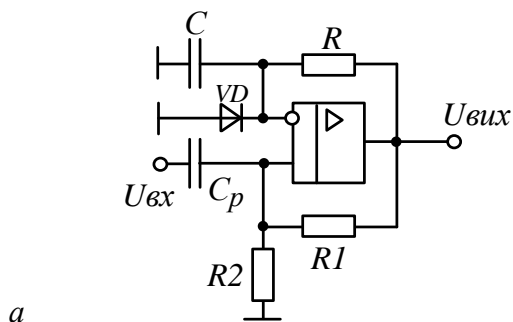


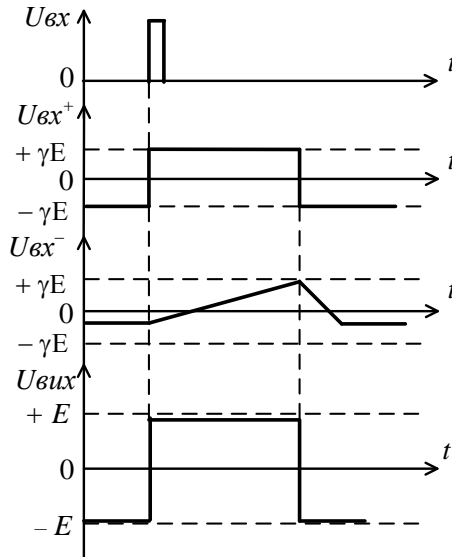
Рисунок 3.6 – Регенеративний компаратор на операційному підсилювачі: а) схема; б) амплітудна характеристика; в) часові діаграми роботи

У таких пристроях у момент практичної рівності напруг на входах ОП за рахунок дії позитивного зворотного зв'язку (ланцюжок R_1 , R_2 на схемі рисунка 3.6 а, що доставляє на неінверсний вхід ОП опорну напругу $U_{оп}$), відбувається стрибкоподібна зміна стану пристрою з одного режиму обмеження $U_{вих} = +E$ до іншого $U_{вих} = (-E)$.

Одновібратор, побудований на базі регенеративного компаратора, поданий на рисунку 3.7. Загальмований режим пристрою забезпечується вмиканням паралельно до ємності C діода VD на інверсному вході.



а



б

Рисунок 3.7 – Одновібратор на операційному підсилювачі: а) схема; б) часові діаграми напруг

Отже, напруга ємності C не може досягти порогу спрацювання компаратора $(-\gamma E)$, де $\gamma = \frac{R_2}{(R_1+R_2)}$, і режим стає загальмованим.

У початковому стані напруга на вході ОП є негативною і дорівнює $U_{\text{вих}}^- \approx (-E)$, діод VD відкритий.

Напруга на конденсаторі C дорівнює спаду напруги на відкритому діоді (десяті частки вольта). Можна вважати, що конденсатор C розряджений. Напруга на неінверсному вході $U_{\text{вх}}^+ = (-\gamma E)$. Оскільки напруга $U_{\text{вх}}^+$ є більш негативною, ніж напруга $U_{\text{вх}}^- \approx 0$ на інверсному вході, то саме тому вихідна напруга ОП є максимальною негативною $U_{\text{вих}}^- \approx (-E)$.

Запускання одновібратора здійснюється імпульсом позитивної полярності з амплітудою, що перевищує величину γE . Одночасно ОП стрибком переходить до нового режиму роботи з $U_{\text{вих}}^+ \approx +E$. Напруга на неінверсному вході також миттєво стає позитивною $U_{\text{вх}}^+ = +\gamma E$. Починається стан квазістійкої рівноваги

одновібратора, під час якого конденсатор C заряджається в колі: вихід ОП ($+E$) $\rightarrow R \rightarrow C \rightarrow$ корпус (діод VD – закритий).

Напруга на ємності C (а отже на інверсному вході $U_{\text{вх}}^-$) наростає, і в момент часу, коли вона досягне рівня $U_{\text{вх}}^+ = +\gamma E$, замикається позитивний зворотний зв'язок і відбувається друге «перевертання» одновібратора.

Напруга на виході ОП стрибком починає дорівнювати $U_{\text{вих}} \approx (-E)$ (на неінверсійному вході $U_{\text{вх}}^+ = -\gamma E$). Стартує новий, стійкий стан рівноваги пристрою, під час якого конденсатор C розряджається через вихід ОП і опір R . Процес розрядження C у часі припиняється відкриттям діода VD , що фіксує напругу на ємності C практично на нульовому рівні.

Варто додати, що для формування на виході одновібратора негативного (а не позитивного, як на діаграмі рисунка 3.7 б) імпульсу необхідно у схемі змінити полярність вмикання діода VD на протилежну. До того ж і полярність імпульсу запускання має бути негативною.

Тривалість вихідного імпульсу одновібратора

$$\tau_U = RC \ln\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right). \quad (3.4)$$

Автоколивальний мультивібратор на операційному підсилювачі

Схема пристрою разом із діаграмами напруг подана на рисунку 3.8.

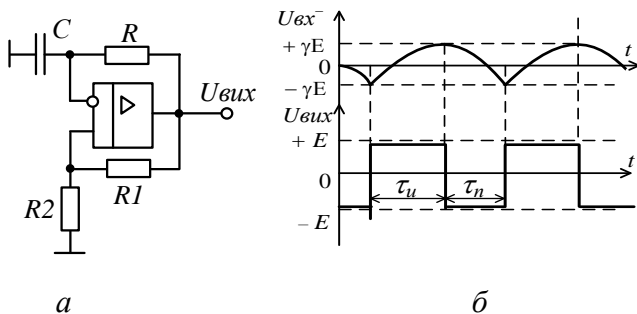


Рисунок 3.8 – Автоколивальний мультивібратор на операційному підсилювачі:
а) схема; б) часові діаграми напруг

Нехай після чергового «перевертання» на виході ОП встановився рівень $U_{\text{вих}} \approx +E$.

Відбувається перезарядження конденсатора C через коло: вихід ОП $(+E) \rightarrow R \rightarrow C \rightarrow$ корпус. Напряга на ємності, що дорівнювала $U_{\text{вх}}^-$, зростає.

У цей час на неінверсному вході ОП діє напруга $U_{\text{вх}}^+ = +\gamma E$, де $\gamma = \frac{R_2}{(R_1 + R_2)}$. Коли зростаюча у процесі перезарядження ємності C напруга на інверсному вході $U_{\text{вх}}^-$ зрівняється з напругою $U_{\text{вх}}^+$ на неінверсному вході, відбудеться «перевертання» пристрою, внаслідок якого на виході ОП установиться напруга $U_{\text{вих}} \approx (-E)$. Стартує новий стан квазістійкої рівноваги мультівібратора, впродовж якого конденсатор C перезаряджається у протилежному напрямі доти, поки напруга на ньому досягне величини $(-\gamma E)$.

У цей момент знову вирівнюються напруги на входах ОП, і відбувається нове «перевертання» мультівібратора, внаслідок якого на виході ОП встановлюється напруга $U_{\text{вих}} \approx +E$. Після цього починається новий квазістійкий стан рівноваги пристрою, під час якого ємність C знову перезаряджається, тощо.

Тривалість вихідного імпульсу схеми

$$\tau_U = RC \ln\left(1 + 2 \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (3.5)$$

дорівнює тривалості паузи: $\tau_u = \tau_n$.

Загальмований блокінг-генератор

Блокінг-генератор – це релаксаційний генератор прямокутних імпульсів, що містить у собі однокаскадний підсилювач, охоплений позитивним зворотним зв'язком на імпульсному трансформаторі. Блокінг-генератор служить для генерування потужних прямокутних імпульсів великої ($q > 10$) шпаруватості, може працювати в режимах загальмованому, автоколиваний, синхронізації та ділення частоти.

Загальмований блокінг-генератор із колекторно-базовим зв'язком поданий на рисунку 3.9. Ланцюжок R_1, E_B служить для запирання транзистора V_1 у початковому режимі (режимі

очікування). Імпульсний трансформатор є головним елементом позитивного зворотного зв'язку і, крім того, служить колекторним навантаженням транзистора. Одночасно позитивний зворотний зв'язок забезпечується зустрічним вмиканням обмоток W_1 і W_2 трансформатора. Ланцюжок VD, R_2 – демпфірувальний, W_3 – вихідна обмотка блокінг-генератора.

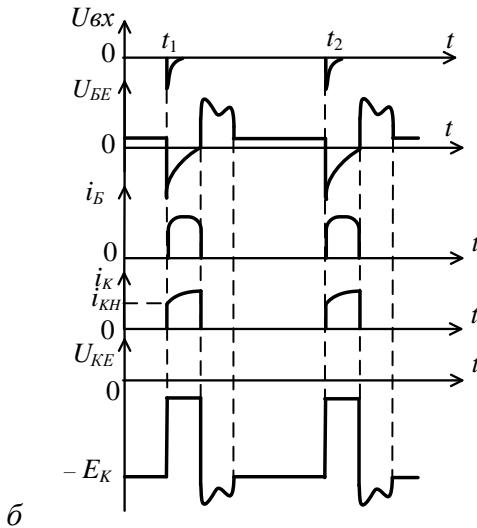
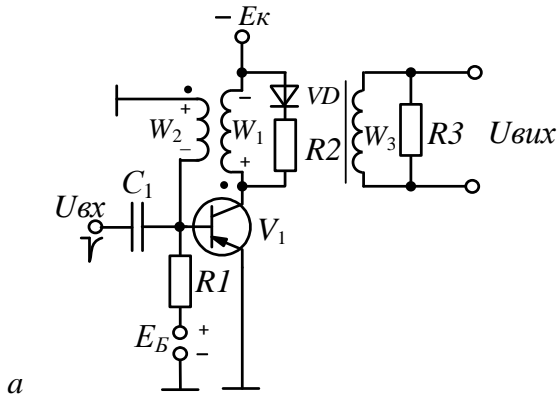
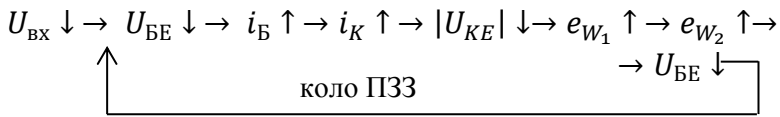


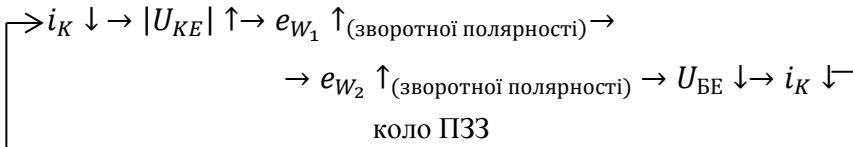
Рисунок 3.9 – Загальмований блокінг-генератор:
а) принципова схема; б) часові діаграми роботи

У момент часу t_1 на вхід пристрою надходить короткий негативний імпульс. V_1 відкривається і переходить до активного режиму. Зростання колекторного струму приводить до збільшення ЕРС самоіндукції e_{W_1} , а отже до збільшення ЕРС взаємоіндукції e_{W_2} .

Остання ЕРС у обмотці W_2 прикладена «мінусом» до бази транзистора V_1 , дедалі більше відкриваючи його. Здійснюється прямий блокінг-процес формування переднього фронту імпульсу колекторної напруги:



У результаті V_1 входить до РН, швидкість наростання колекторного струму зменшується, і через це ЕРС самоіндукції e_{W_1} і ЕРС взаємоіндукції e_{W_2} зменшуються, коло позитивного зворотного зв'язку розмикається, «мінус» на базі V_1 зменшується. Транзистор переходить із РН до активного режиму. Стартує зворотний блокінг процес:



Формується спадання імпульсу $U_{\text{КЕ}}$. Ланцюжок R_2, VD шунтує обмотку W_1 , запобігаючи виникненню коливань колекторної напруги у разі закритого транзистора. Вихідні імпульси знімаються з обмотки W_3 ; вони повністю відтворюють форму імпульсів $U_{\text{КЕ}}$, але позбавлені коливальних «хвостів». Тривалість вихідного імпульсу блокінг-генератора визначається за формулою

$$\tau_U = L_{\mu} \frac{n}{R_1} (\beta - n), \tag{3.6}$$

де L_μ – індуктивність намагнічування імпульсного трансформатора; R_1 – опір у базовому колі; n – коефіцієнт трансформації ($e_{W_2} = ne_{W_1}$; $i_B = \frac{i_K}{n}$).

Автоколивальний блокінг-генератор

Схема пристрою наведена на рисунку 3.10 а, на рисунку 3.10 б подані часові діаграми його роботи.

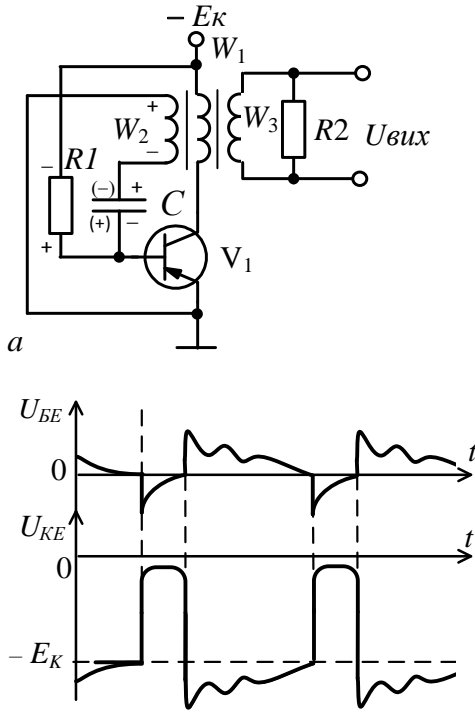


Рисунок 3.10 – Автоколивальний блокінг-генератор:
а) принципова схема; б) часові діаграми роботи

Схема має два квазістійкі стани рівноваги. Наприклад, нехай V_1 – закритий, а конденсатор C повільно заряджається в колі: корпус $\rightarrow W_2 \rightarrow C \rightarrow R_1 \rightarrow E_K$. Коли напруга на ємності стає такою, що $U_{BE} = 0$, починається перший блокінг-процес,

внаслідок якого транзистор перейде до РН. Установлюється другий квазістійкий стан рівноваги.

У цьому стані конденсатор C починає заряджатися від ЕРС взаємоіндукції обмотки W_2 імпульсного трансформатора в колі: «+» обмотки $\rightarrow W_2 \rightarrow$ емітерний перехід відкритого $V_1 \rightarrow C \rightarrow$ «мінус» W_2 . Обкладинка конденсатора позитивної полярності (нижня) прикладена до бази V_1 .

У момент, коли у процесі заряджання ємності напруги U_{BE} стає позитивною, транзистор переходить до активного режиму, і починається другий блокінг-процес, внаслідок якого V_1 переходить до РВ, закривається.

Тривалість вихідного імпульсу визначається сталою часу

$$\tau_U \approx 0,7C \tau_E,$$

де τ_E – розподілений опір емітера.

Тривалість паузи

$$\tau_{II} \approx 0,7C R_1.$$

Список літератури

1. Твердотільна електроніка: начальний посібник / О. А. Борисенко, О. М. Кобяков, А. І. Новгородцев та ін. – Суми : Сумський державний університет, 2013. – 270 с.
2. Схемотехніка електронних систем: у 3 кн. Кн. 1. Аналогова схемотехніка та імпульсні пристрої: підручник / В. І. Бойко, А. М. Гуржій, В. Я. Жуйков та ін. – Київ : Вища школа, 2004. – 366 с.
3. Опадчий Ю. Ф. Аналоговая и цифровая электроника (полный курс) : учебник для вузов / Ю. Ф. Опадчий, О. П. Глудкин, А. И. Гуров. – Москва : Горячая линия- Телеком, 2005. – 768 с.
4. Евецкий В. Л. Электронные приборы и основы микроэлектроники: основы микроэлектроники : конспект лекций / В. Л. Евецкий, В. Ф. Новиков. – Киев : КВИРТУ ПВО, 1988. – Ч. II. – 280 с.
5. Справочник по импульсной технике / под ред. В. Н. Яковлева. – Киев : Техніка, 1973. – 712 с.

Навчальне видання

**Кобяков Олександр Миколайович,
Бражник Ірина Євгенівна,
Єрьоменко Юрій Сергійович**

ІМПУЛЬСНІ ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ

Конспект лекцій

для студентів спеціальності 171 *«Електроніка»*
денної форми навчання

Відповідальний за випуск А. С. Опанасюк
Редактор І.О. Кругляк
Комп'ютерне верстання Ю. С. Єрьоменко

Підписано до друку 08.04.2021, поз. 53.
Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 2,56. Обл.-вид. арк. 2,32. Тираж 5 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.