

7.3. Мультивібратори

7.3.1. Загальні відомості

Мультивібратори (від латинського *multum* – багато; *vibro* – коливаю) – це релаксаційні автогенератори напруги прямокутної форми (релаксаційний – такий, що різко відрізняється від гармонійного – синусоїдного; автогенератор – пристрій, що генерує незатухаючі коливання без запуску ззовні і не має стійких станів).

Виконуються мультивібратори на основі електронних приладів, що мають на вольт-амперній характеристиці ділянку з негативним опором (наприклад, тунельні діоди, тиристори), а також на підсилювачах постійного струму з позитивними зворотними зв'язками (на транзисторах, ОП, цифрових і спеціальних ІМС). Електронні прилади, що використовуються в мультивібраторах працюють у ключових режимах.

Мультивібратори можуть працювати у трьох режимах: чекаючому, автоколивальному та режимі синхронізації.

Найчастіше вони працюють у автоколивальному режимі, коли мультивібратор має два квазісталіх (нестійких) стани рівноваги і переходить із одного стану в інший самочинно під впливом внутрішніх перехідних процесів. У такому режимі мультивібратор використовується як генератор прямокутної напруги.

У чекаючому режимі мультивібратор має один сталий і один квазісталий стани рівноваги. Зазвичай він знаходиться у сталому стані і переходить до квазісталого під дією зовнішнього електричного сигналу. Час перебування у квазісталому стані визначається внутрішніми процесами в схемі мультивібратора. Такі мультивібратори використо-

вуються для формування імпульсів напруги необхідної тривалості, а також для затримки імпульсів на визначений час. Мультивібратор, що працює у такому режимі, має назву одновібратора.

У режимі синхронізації використовується мультивібратор, що працює в автоколивальному режимі, але його перехід із одного стану в інший забезпечується зовнішньою синхронізуючою напругою. Для його нормальної роботи в цьому режимі необхідно, щоб частота синхронізуючого сигналу перевищувала частоту власних коливань. У результаті частота коливань мультивібратора практично не залежить від дестабілізуючих факторів, що впливають на його елементи. Використовуються такі мультивібратори для створення генераторів стабільної частоти і при керуванні складними електронними пристроями, робота яких синхронізована якоюсь зовнішньою дією (наприклад, синхронізація розгортки електронного осцилографа).

Загалом, мультивібратори повинні забезпечувати стабільність частоти і довжини імпульсів, а також необхідну (зазвичай мінімальну) тривалість їх фронтів.

7.3.2. Мультивібратор з колекторно-базовими зв'язками в автоколивальному режимі

Автоколивальний мультивібратор на транзисторах найчастіше виконують за симетричною схемою з колекторно-базовими зв'язками.

Він складається з двох однакових каскадів підсилення з СЕ. Для забезпечення позитивного зворотного зв'язку, за рахунок якого мультивібратор самозбуджується, вихідна напруга кожного з каскадів подається на вхід іншого. Схему такого мультивібратора зображено на рис. 7.9. І хоча зараз її практично не застосовують (бо використовую-

ють, в основному, мультивібратори на ІМС), вона найкраще підходить для здобуття навиків аналізу роботи імпульсних пристроїв.

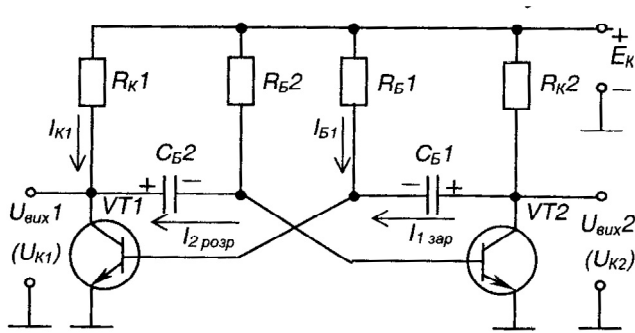


Рис. 7.9 – Мультивібратор з колекторно–базовими зв'язками

Симетрія схеми забезпечується тим, що задають: $R_{Б1}=R_{Б2}$, $R_{К1}=R_{К2}$ (вони призначені для забезпечення насиченого стану транзисторів), $C_{Б1}=C_{Б2}$ (забезпечують зв'язок між каскадами). Відповідно, параметри транзисторів повинні бути повністю ідентичні. І така ідеальна схема буде непрацездатною: обидва транзистори будуть відкриті. Неможливість реально забезпечити абсолютну симетрію і наявність позитивного зворотного зв'язку призводять до того, що після подачі напруги живлення один із транзисторів повністю відкривається, а другий – закривається.

Роботу мультивібратора ілюструють часові діаграми, наведені на рис. 7.10.

Отже, мультивібратор має два квазістабільних стани:

- 1 – транзистор $VT1$ відкритий, а $VT2$ закритий;
- 2 – транзистор $VT2$ відкритий, а $VT1$ закритий.

Нехай початковий стан мультівібратора такий: $VT1$ відкритий (знаходиться у режимі насичення), а $VT2$ закритий (знаходиться у режимі відтинання). При цьому і надалі:

1) через $VT1$ і R_{K1} від E_K протікає колекторний струм насичення I_{K1} ;

2) через R_{B1} і базо-емітерний перехід $VT1$ протікає струм бази I_{B1} який утримує $VT1$ у режимі насичення (маємо схему зміщення фіксованим струмом бази);

3) конденсатор C_{B1} заряджається струмом $I_{Iзар}$ від E_K через R_{K2} і базо-емітерний перехід $VT1$;

4) конденсатор C_{B2} заряджений із вказаною на схемі полярністю до напруги, рівної E_K (у попередньому такті роботи схеми), і через $VT1$ (замкнений ключ) підімкнений до нульової точки, за рахунок чого через нього протікає струм $I_{2розр}$ від E_K через R_{B2} ; цей струм намагається перезарядити C_{B2} від напруги $-E_K$ до напруги $+E_K$, при цьому негативна напруга з C_{B2} подається на базу $VT2$ відносно його емітера і утримує транзистор у закритому стані (розімкнений ключ);

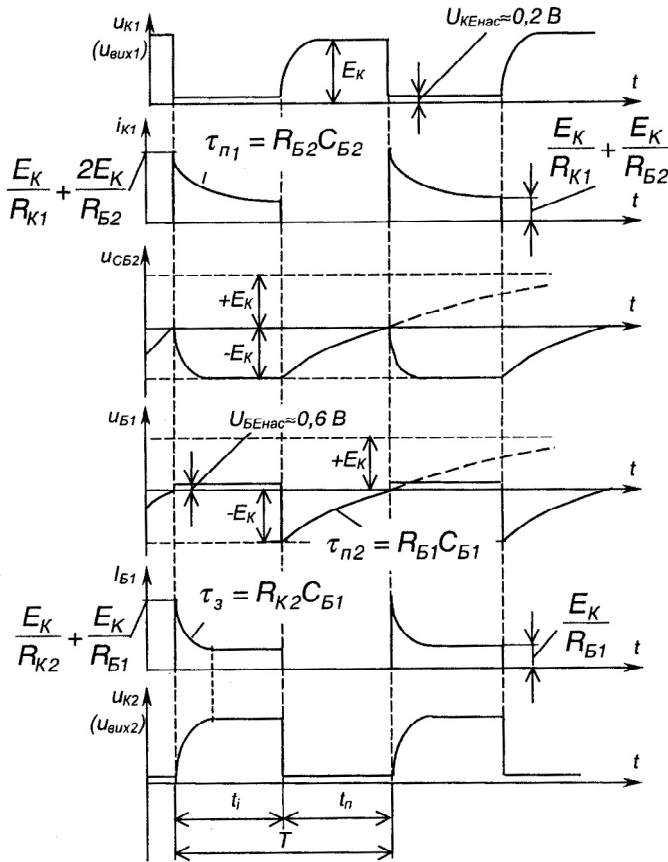


Рис. 7.10 – Часові діаграми роботи мультивібратора з колекторно-базовими зв'язками

5) процес перезаряду конденсатора C_B , триває доти, доки напруга на ньому не перетне нульового рівня і не стане вищою за порогову напругу базо-емітерного переходу транзистора $VT2$ $U_{BE\text{ нас}} \approx 0,6\text{В}$, після чого пройде базовий струм $VT2$ і він почне відкриватися;

6) через $VT2$, що перейшов у активний режим, конденсатор C_{B1} обкладкою «+» підмикається до нульової точки, і негативна напруга з C_{B2} подається на базу $VT1$ відносно його емітера, закриваючи транзистор;

7) як тільки $VT1$ починає закриватися, збільшується позитивна напруга на його колекторі і починає заряджатися C_{B2} від E_K через R_{K1} і базо-емітерний перехід $VT2$, за рахунок чого останній відкривається ще більше – діє позитивний зворотний зв'язок: розвивається лавино-подібний регенеративний процес, після закінчення якого $VT1$ повністю закривається, а $VT2$ відкривається і мультивібратор переходить до свого другого квазісталого стану.

Далі процеси у схемі протікають аналогічно, тільки тепер заряджається C_{B2} , а перезаряджається C_{B1} .

Таким чином, пристрій фактично працює за рахунок автоматичної комутації конденсаторів ключами-транзисторами.

Умовами працездатності мультивібратора є:

$$\begin{aligned} R_{K2}C_{B1} < R_{B2}C_{B2}; & \quad R_{K1}C_{B2} < R_{B1}C_{B1}; \\ R_{K1}\beta_1 \geq R_{B1}; & \quad R_{K2}\beta_2 \geq R_{B2}. \end{aligned} \quad (7.15)$$

Тривалість імпульсів, що знімаються з колекторів транзисторів $VT1$ або $VT2$, становить відповідно

$$t_1 \approx 0,7R_{B1}C_{B1}; \quad t_2 \approx 0,7R_{B2}C_{B2}. \quad (7.16)$$

Період надходження імпульсів: $T = t_1 + t_2$.

Для симетричної схеми:

$$T \approx 1,4RC, \quad (7.17)$$

де $R = R_{B1} = R_{B2}$; $C = C_{B1} = C_{B2}$.

Співвідношення величин t_1 і t_2 (шпаруватість) можна змінювати, порушуючи симетрію схеми: наприклад, збільшуючи величину R_{B1} і пропорційно зменшуючи величину R_{B2} . При цьому тривалість періоду залишається незмінною. Якщо змінювати величину тільки одного з

резисторів або конденсаторів, то за постійної тривалості імпульсу (або паузи) будуть змінюватись період і шпаруватість.

Недоліком розглянутої схеми є значно спотворений передній фронт генерованих імпульсів (він являє собою експоненту). Це відбувається через те, що вихідним сигналом пристрою є напруга, що знімається з транзисторного ключа і під'єданого паралельно до нього конденсатора – фактично це є напруга на конденсаторі, що заряджається. Скоротити тривалість фронтів (час заряду конденсаторів) можна, наприклад, зменшивши величину колекторних резисторів R_{K1} і R_{K2} . Але це призведе до значних енергетичних втрат: через транзистори у режимі насичення буде протікати великий струм.

Оскільки причиною спотворення є процес заряду конденсаторів, то забезпечити якість генерованих імпульсів можна, відключаючи колектори транзисторів від кіл заряду конденсаторів. Для цього в схему мультивібратора необхідно ввести допоміжні ключі – наприклад, діоди $VD1$ і $VD2$, як це показано на рис. 7.11.

Для створення кіл заряду конденсаторів тут введено резистори R_1 і R_2 . У результаті, діодні ключі відтинають кола заряду від колекторів на час заряду. Тому такий мультивібратор називають мультивібратором з відтинаючими діодами.

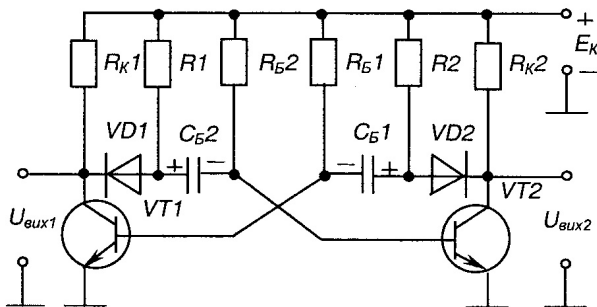


Рис. 7.11 – Мультивібратор з відтинаючими діодами

Перезаряджатися конденсаторам діодні ключі не заважають. Тепер довжина фронтів імпульсів майже однакова і визначається частотними властивостями транзисторів і діодів, а також паразитними ємностями схеми.

7.3.3. Мультивібратор на ОП

Схему мультивібратора на ОП наведено на рис. 7.12, а, часові діаграми роботи – на рис. 7.13. Автоколивальний режим (збудження генератора) забезпечується позитивним зворотним зв'язком, що охоплює ОП з виходу на неінвертуючий вхід дільником R_1, R_2 . Часові характеристики вихідного сигналу визначаються інтегруючим RC – колом, увімкненим у коло негативного зворотного зв'язку: з виходу ОП на його інвертуючий вхід.

ОП тут фактично працює як компаратор, порівнюючи величини напруг, що подаються на його інвертуючий та неінвертуючий входи.

Величина напруги на неінвертуючому вході є частиною вихідної напруги ОП. Для абсолютних величин це:

$$|U_0| = \frac{|U_{вих}| R_2}{R_1 + R_2} . \quad (7.18)$$

Тому маємо два пороги спрацьовування U_0^+ і U_0^- . При цьому, якщо напруга на інвертуючому вході буде змінюватися від найбільш можливої негативної $U_{вих}^-$ до найбільшої позитивної $U_{вих}^+$ спрацьовування відбудеться за її значення U_0^+ , а якщо вона почне змінюватись у зворотному напрямку – при U_0^- . Такий пристрій (з гістерезисом за вхідним сигналом) називають тригером Шмітта.

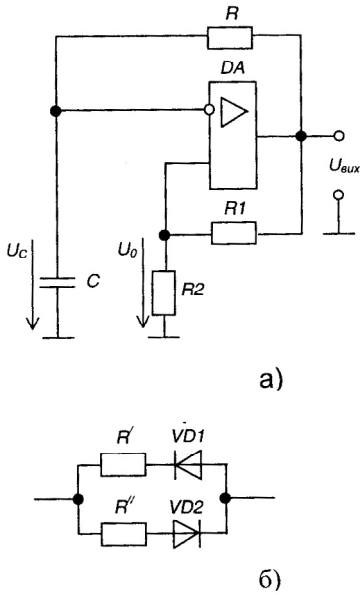


Рис. 7.12 – Мультивібратор на ОП

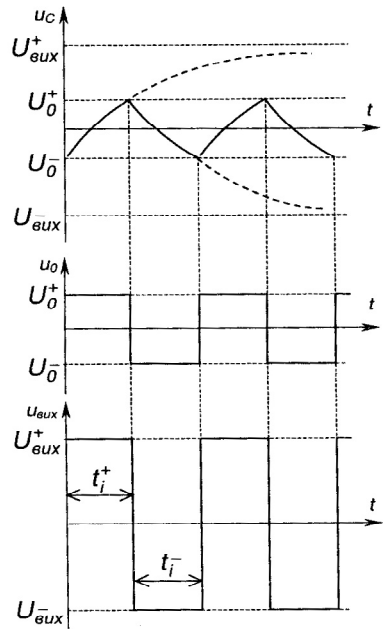


Рис. 7.13 – Часові діаграми роботи мультивібратора на ОП

Таким чином, при роботі мультивібратора порівнюються фіксована величина напруги, що знімається з дільника, зі змінною напругою на конденсаторі, який намагається зарядитися до вихідної напруги ОП $U_{вих}$. Як тільки величини напруг зрівнюються, $U_{вих}$ змінює знак, а відповідно, і U_0 також, а конденсатор починає заряджатися до нового значення $U_{вих}$ і так далі. На виході ОП формується прямокутна напруга типу «меандр» – коли тривалості її негативного t_i^- і позитивного t_i^+ значень однакові. Період генерованих імпульсів становить:

$$T = 2RC \ln\left(1 + 2 \frac{R_2}{R_1}\right). \quad (7.19)$$

Змінити співвідношення t_i^- і t_i^+ можна, якщо замість резистора R ввести два паралельних кола, що складаються з двох різних за опорами резисторів R' і R'' і послідовно ввімкнених з ними діодів $VD1$ і $VD2$, які підключені зустрічно, як це показано на рис. 7.12, б.

7.3.4. Одновібратор з колекторно-базовими зв'язками (чекаючий мультивібратор)

Одновібратор (чекаючий мультивібратор), схему якого зображено на рис. 7.14, являє собою двокаскадний підсилювач із позитивним зворотним зв'язком, виконаний на транзисторах $VT1$ та $VT2$, увімкнених за схемою з СЕ.

Позитивний зворотний зв'язок забезпечується подачею колекторної напруги першого транзистора через конденсатор $C_{Б2}$ на базу другого транзистора та колекторної напруги другого транзистора через резистор $R_{Б1}$ та пришвидчуючий конденсатор $C_{Б1}$ – на базу першого.

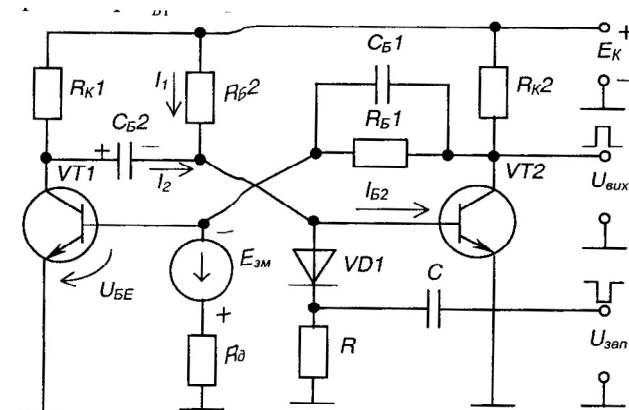


Рис. 7.14 – Одновібратор (чекаючий мультивібратор)

Джерело негативного зміщення E_{3m} призначене для надійного утримання транзистора $VT1$ закритим, коли схема знаходиться у сталому стані.

VD , C , R є елементами кола запуску, яке призначено для переведу пристрою у квазісталий стан під дією зовнішнього сигналу і забезпечує формування на виході одиночного прямокутного імпульсу напруги.

За відсутності сигналу запуску $U_{зан}$ схема знаходиться у сталому стані рівноваги $VT1$ закритий напругою E_{3m} , а $VT2$ знаходиться у режимі насичення під дією струму I_{B2} . При цьому конденсатор C_{B2} заряджений до напруги з полярністю вказаною на рис. 7.14, а струм I_{B2} становить:

$$I_{B2} = I_1 + I_2.$$

Оскільки у сталому стані $I_2 = 0$, то $I_{B2} = I_1 = E_K / R_{B2}$.

Щоб транзистор $VT2$ знаходився у режимі насичення, необхідно виконати умову $I_{B2} \geq I_{BH2}$ (струму насичення). Тоді

$$I_{BH2} = \frac{I_{KH2}}{\beta_2} = \frac{E_K}{R_{K2}\beta_2}, \quad (7.20)$$

$$\frac{E_{K1}}{R_{B2}} \geq \frac{E_K}{R_{K2}\beta_2}, \quad \text{або} \quad R_{B2} \leq \beta_2 R_{K2}. \quad (7.21)$$

Роботу одновібратора ілюструють часові діаграми, зображені на рис. 7.15.

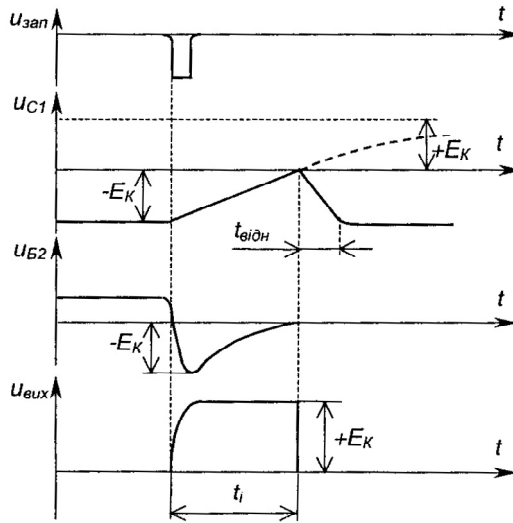


Рис. 7.15 – Часові діаграми роботи одно вібратора

Подача на базу транзистора $VT2$ короткого запускаючого імпульсу негативної полярності через коло $C - R - VD1$ перекидає одновібратор: $VT2$ закривається і його колекторна напруга через прискорюючий конденсатор C_{B1} подається на базу $VT1$, викликаючи насичення останнього. При цьому конденсатор C_{B2} через відкритий транзистор $VT1$ підключається у запірному напрямку до бази транзистора $VT2$. Тобто, завдяки позитивному зворотному зв'язку, після закінчення запускаючого імпульсу транзистор $VT2$ залишається закритим, а $VT1$ - відкритим.

При цьому конденсатор C_{B2} починає перезаряджатися по колу $+E_K - R_{B2} - C - VT1$ - нульова точка схеми ($-E_K$), намагаючись досягти протилежної полярності. Але, коли напруга на ньому досягне нуля, запірна напруга на базі $VT2$ зникає і схема повертається до початкового стану: $VT1$ - закритий, $VT2$ - відкритий.

Час перебування одновібратора у стані квазісталої рівноваги визначається часом розряду конденсатора C_{B2} від напруги, що дорівнює E_K до 0, при цьому на виході схеми формується прямокутний імпульс напруги тривалістю $t_i = 0,7R_{B2}C_{B2}$.

Час відновлення, із закінченням якого на схему знову можна подавати запускаючий імпульс, становить $t_{відн} \approx 3R_{K1}C_{B2}$.

Коло $R_{B2}C_{B2}$ має назву часозадаючого.

Стала часу заряду конденсатора C_{B2} становить $R_{K1}C_{B2}$.

7.3.5. Одновібратор на ОП

Одновібратор на ОП можна отримати з мультивібратора (див. рис. 7.12), якщо зашунтувати конденсатор діодом, як це показано на рис. 7.16. Це виключає можливість заряду конденсатора до напруги U_0 і забезпечує один стійкий стан пристрою, як показано на часових діаграмах, наведе-них на рис. 7.17.

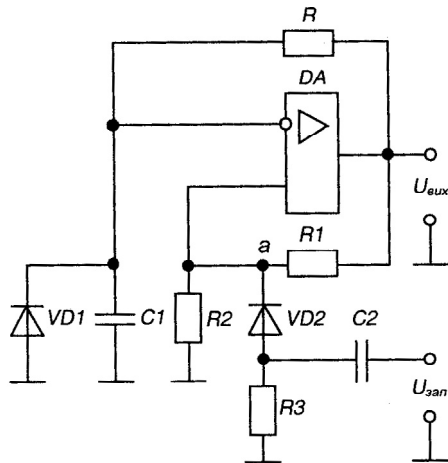


Рис. 7.16 – Одновібратор на ОП

У вихідному стані конденсатор C_1 розряджений, на виході маємо напругу $U_{вих}^-$, струм протікає через діод $VD1$ і резистор R .

Щоб перевести пристрій у квазісталий стан, необхідно в точку a подати імпульс напруги позитивної полярності більший за U_0^+ . Тоді на виході будемо мати напругу $U_{вих}^+$ і конденсатор C_1 , почне заряджатися через резистор R : на виході формується імпульс позитивної полярності.

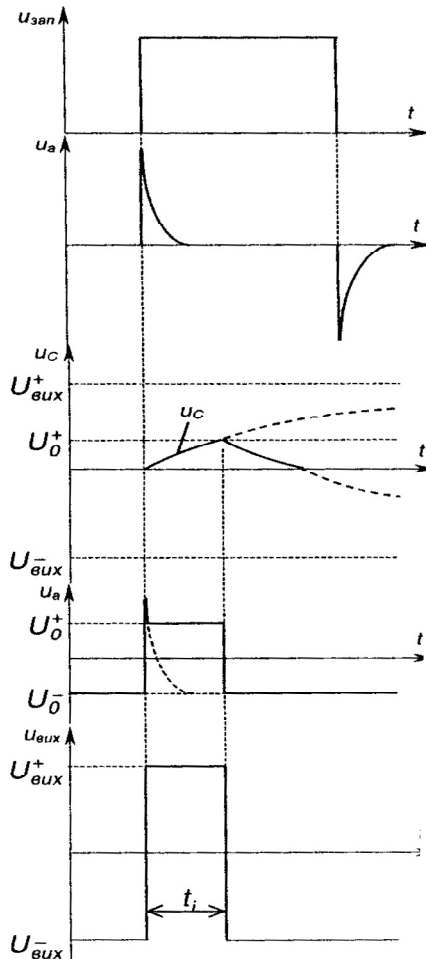


Рис. 7.17 – Часові діаграми роботи одновібратора на ОП

Коли напруга на конденсаторі досягне значення U_0^+ отримаємо на виході $U_{вих}^-$ – закінчиться формування імпульсу, конденсатор C_1 розрядиться і пристрій буде готовий до повторного запуску.

Якщо тривалість запускаючого імпульсу більша за тривалість генерованого, то запускаючий подають через диференціююче коло R_3C_2 і діод $VD2$ (інакше на виході отримаємо імпульс з тривалістю запускаючого).

Тривалість генерованого імпульсу становитиме:

$$t_i = RC_1 \ln \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right). \quad (7.22)$$