

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ,
МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ**

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

**ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ НА КЕРОВАНИХ ВЕНТИЛЯХ
(ТИРИСТОРАХ)
конспект лекцій з курсу
«Теорія та розрахунок безконтактних електричних апаратів»**

Харків 2013

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ,
МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ**

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

**ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ НА КЕРОВАНИХ ВЕНТИЛЯХ
(ТИРИСТОРАХ)
конспект лекцій з курсу
«Теорія та розрахунок безконтактних електричних апаратів»**

для студентів усіх форм навчання
спеціальності 050702.01 «Електричні машини та апарати»

Затверджено

редакційно-видавничою
радою університету
протокол № 01 від 20.06.12 р.

Харків
НТУ «ХПІ»
2013

УДК 621.316.5

ББК 31.264

С 32

Рецензенти: В.В. Кузьмін, д-р техн. наук, професор кафедри електроенергетики Української інженерно-педагогічної академії;
Г.М. Сучков, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри приладів та методів неруйнівного контролю НТУ «ХП»;
В.Ф. Болюх, д-р техн. наук, професор кафедри загальної електротехніки НТУ «ХП».

Серета О.Г.

С 32

Електричні апарати на керованих вентилях (тиристорах) : конспект лекцій з курсу «Теорія та розрахунок безконтактних електричних апаратів» для студентів усіх форм навчання спеціальності 050702.01 «Електричні машини та апарати» // О.Г. Серета, О.О. Сєдова. – Х.: НТУ «ХП», 2013. – 40 с.

ISBN

Розглянуті окремі розділи теорії безконтактних електричних апаратів, а саме, принципи проектування та будова тиристорних елементів систем автоматичного керування, регулювання та захисту. Описані базові схеми тиристорних апаратів постійного та змінного струму та режими їх роботи. Визначені напрямки раціонального використання цих виробів і напрямки їх розвитку. Теоретичні положення підкріплено прикладами практичних розрахунків.

Призначено для студентів спеціальності 050702.01 „Електричні машини та апарати”.

Іл. 23. Табл. 6. Бібліогр.: 4 назв.

ISBN

УДК 621.316.5

ББК 31.264

© О.Г. Серета,

О.О. Сєдова, 2013 р.

Навчальне видання

СЕРЕДА Олександр Григорійович
СЄДОВА Олена Олександрівна

**ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ НА КЕРОВАНИХ ВЕНТИЛЯХ
(ТИРИСТОРАХ)**

конспект лекцій з курсу

«Теорія і розрахунок

безконтактних електричних апаратів»

для студентів усіх форм навчання
спеціальності 050702.01 «Електричні машини та апарати»

Роботу до видання рекомендував проф. В.Т. Долбня

Відповідальний за випуск проф. Б.В. Клименко

Редактор О.І. Шпільова

План 2012 р., поз. 135 /

Підп. до друку __.__.13 р. Формат 60×84 1/16. Папір офсетний №2. Riso-друк.
Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 1,8. Наклад 50 прим. Зам. № __. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 3657 від 24.12.2009 р.

61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

Друкарня НТУ «ХПІ». 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

ВСТУП

Широка автоматизація виробничих процесів і впровадження систем автоматичного керування в промисловості, на транспорті й у побуті підвищують вимоги до швидкодії та довговічності електричних апаратів автоматики, а також до мінімізації робіт з обслуговування електричних апаратів у процесі експлуатації. У свою чергу інтенсивний розвиток напівпровідникової техніки визначив появу цілого ряду нових науково-технічних напрямків у розвитку електротехнічної промисловості. Якісно нові зміни відбулись і в електроапаратобудуванні. З'явилася можливість створення комутаційних і захисних апаратів зі швидкістю та комутаційним ресурсом, недосяжним для традиційних електромеханічних апаратів. Ці переваги, пов'язані з відсутністю рухомих частин і дугових явищ, обумовили широке використання напівпровідникових (електронних) апаратів у мережах низької напруги в якості апаратів керування і захисту.

Тиристор – це напівпровідникові прибори, вольт-амперні характеристики яких мають ділянку з від'ємним диференціальним опором $du/di < 0$. Тиристори виконуються на основі чотиришарової напівпровідникової структури *p-n-p-n* типу; як на малі номінальні струми й напруги, так і на великі, та здатні вмикати й відключати устаткування потужністю до сотень кіловат. Таким чином, тиристори виконують функції силових вимикачів, перемикачів, контакторів, пускачів тощо.

Тиристорні електричні апарати є одними з перспективних і таких, що швидко розвиваються, напрямів в електроапаратобудуванні, яке базується на сучасних досягненнях напівпровідникової технології. На базі тиристорів виконуються комутаційні й захисні електричні апарати постійного і змінного струму в широкому діапазоні зміни номінальних струмів і напруг. Щоб підкреслити універсальність застосування і різноманітність варіантів виконання тиристорних апаратів, розділимо їх на види за принципом дії.

1. *Апарати з природною комутацією* – це апарати, призначені для роботи в мережах змінного струму. Відключення їх здійснюється шляхом зміни полярності напруги джерела живлення, внаслідок чого до тиристора прикладається зворотна напруга і він вимикається. Тут не вимагається яких-небудь додаткових схемних рішень, окрім блокування надходження керуючих імпульсів на вхід тиристора.

2. *Апарати з штучною комутацією* – це апарати, призначені для роботи в мережах постійного струму. Процес відключення цих апаратів також пов'язаний із зміною полярності напруги на тиристорі та підтримкою сигналу зворотного зміщення на визначений час, достатній для вимикання. В даному випадку це досягається допоміжними схемними засобами, за допомогою яких забезпечується зниження анодного струму тиристора до нуля.

3. *Апарати з фазовим регулюванням*. До цієї групи належать апарати змінного струму з природною і штучною комутацією, що виконують додатково функцію регулювання вихідної потужності. Режим регулювання забезпечується системою керування, за допомогою якої здійснюється затримка вмикання тиристора на заданий кут відносно нуля струму.

1. РЕЛЕЙНИЙ ПІДСИЛЮВАЧ З ДИНІСТОРОМ У ВИХІДНОМУ КОЛІ

Тиристор, що не має керуючого електрода, називається *диністор*. Диністор має чотиришарову структуру, зображену на рис. 1. При прийнятій полярності джерела живлення $U_{ж}$, крайні переходи Π_1 та Π_3 зміщаються в прямому напрямку, а перехід Π_2 у зворотному.

Чотиришарову структуру диністора можна подати у вигляді еквівалентної моделі (рис. 2), що складається з двох транзисторів $p-n-p$ та $n-p-n$ типу відповідно. При цьому переходи Π_1 і Π_3 є емітерними, а перехід Π_2 – колекторним. Зона B_1 бази транзистора VT_1 одночасно є колекторною зоною транзистора VT_2 , а зона B_2 бази транзистора VT_2 є колекторною зоною транзистора VT_1 . Відповідно струм колектора VT_1 є струмом бази VT_2 , а струм бази VT_1 є струмом колектора VT_2 : $I_{к1} = I_{б2}$; $I_{к2} = I_{б1}$. Таке вмикання забезпечує внутрішній додатний зворотний зв'язок. Якщо хоча б один з транзисторів переходить у провідний стан, то далі обидва транзистори підтримують один одне увімкненими.

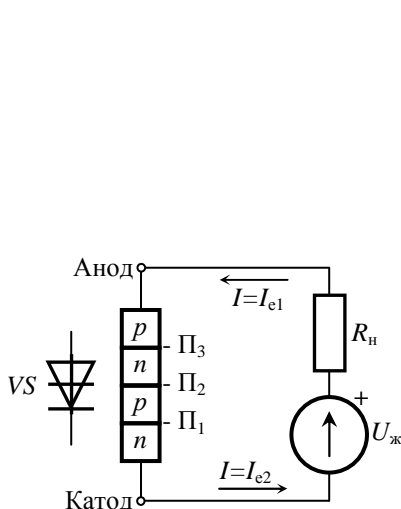


Рисунок 1 – Структура, умовна позначка та вмикання диністора

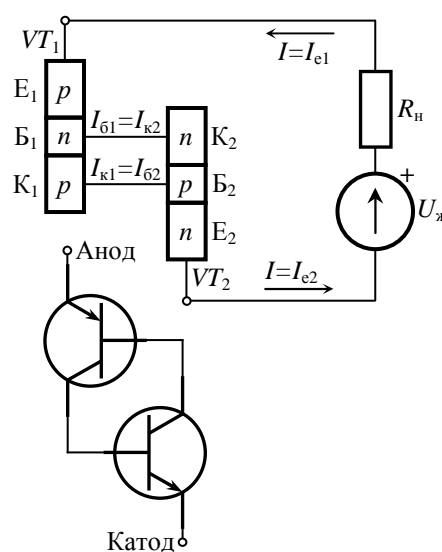


Рисунок 2 – Модель диністора у вигляді двох транзисторів

Струм диністора є струмом емітера транзистора VT_1 та одночасно струмом емітера VT_2 : $I_{VS} = I_{e1} = I_{e2}$. У той же час:

$$I_{к1} = h_{2161} \cdot I_{e1}; \quad (1)$$

$$I_{к2} = h_{2162} \cdot I_{e2}, \quad (2)$$

де h_{2161} , h_{2162} – відповідно коефіцієнти передачі струму емітера транзисторів VT_1 та VT_2 .

Для струму диністора отримаємо:

$$\begin{aligned} I_{VS} &= I_{к1} + I_{к2} + I_{к0} = h_{2161} \cdot I_{e1} + h_{2162} \cdot I_{e2} + I_{к0} = \\ &= (h_{2161} + h_{2162}) I_{VS} + I_{к0}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$I_{VS} = \frac{I_{к0}}{1 - (h_{2161} + h_{2162})}, \quad (4)$$

де $I_{к0}$ – зворотний тепловий струм колекторного переходу.

Вольт-амперна характеристика (ВАХ) диністора подана на рис. 3. Ділянка 0–1 відповідає закритому стану прибору. Ділянка 1–2 відповідає лавиноподібному перемиканню диністора (ділянка з від’ємним опором). Ділянка 2–3 відповідає відкритому стану, аналогічно ВАХ діода (режим насичення). Ділянка 2–3 є робочою ділянкою характеристики диністора.

Основні параметри диністора:

- напруга вмикання U_{BM} ;
- струм вмикання I_{BM} ;
- час вмикання;
- гранично припустимий струм у прямому напрямку $I_{пр}$;
- струм утримання $I_{утр}$ – мінімальний прямий струм ввімкненого стану, при подальшому зменшенні якого диністор переходить у непровідний стан;
- максимально припустиме амплітудне значення зворотної напруги $U_{зв\ max}$.

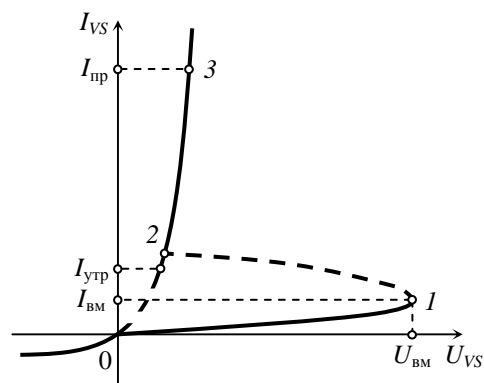


Рисунок 3 – ВАХ диністора

Принцип дії найпростішого релейного елемента на диністорі пояснимо наступним прикладом. Нехай послідовно з вентилям включені навантаження R_H та джерело напруги живлення $U_{ж}$ (рис. 4, а). Тоді струм у навантаженні $I_H = I_{ут}$ визначиться точкою 3 перетинання вольт-амперної характеристики диністора та вольт-амперної характеристики опору R_H (рис. 4, б). Характеристики побудовані з урахуванням того, що струм через навантаження та вентиль спільний, а сума падінь напруг на вентилю й навантаженні дорівнює напрузі живлення $U_{ж}$.

Як видно з рисунка, струм у навантаженні при напрузі живлення $U_{ж}$ буде дорівнювати струму утікання $I_{ут}$. При підвищенні напруги живлення струм у

навантаженні спочатку буде змінюватися незначно $I_H = I_{yT} \leq I_{BM}$, а при напрузі спрацьовування, що дорівнює U_c , зміниться стрибком (точки $1 \square 1'$) від I_{BM} до $I_{HC} \approx U_c / R_H$. Вентиль увімкнеться. Тепер при зниженні напруги живлення до колишнього значення $U_{ж}$ струм у навантаженні буде визначатися точкою 4 перетинання характеристики диністора та опору R_H . При зниженні напруги до напруги відпускання U_B струм через навантаження та вентиль стане менше струму утримання $I_H = I_{HB} < I_{yT}$, вентиль вимкнеться (точки $2-2'$). Струм у навантаженні буде визначатися точкою $2'$. Як видно, залежність вихідних параметрів (I_H, U_H) від вхідного $U_{ж}$ має релейний характер.

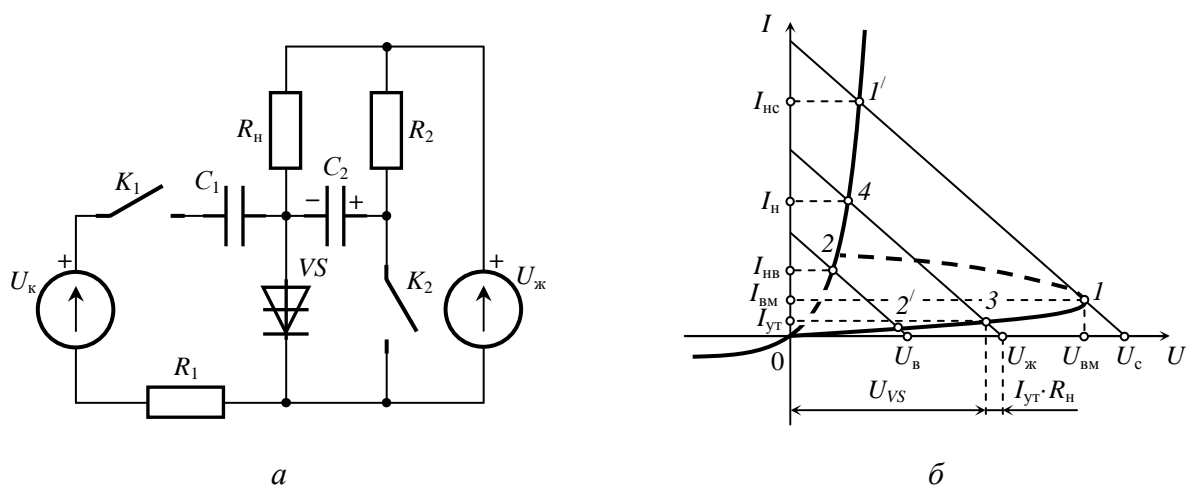


Рисунок 4 – Принцип дії релейного елемента на диністорі

Вмикання диністора здійснюється підвищенням напруги на ньому до $U_{VS} > U_{BM}$. Підвищення напруги може бути здійснено або за рахунок підвищення напруги живлення до $U_{ж} > U_c$ (рис. 4, б), що при живленні силових устаткувань незручно, або подачею спеціального імпульсу напруги керування U_k при замиканні ключа K_1 (рис. 4, а). Вмикання диністора відбудеться за умови $U_k > U_{BM} - U_{ж}$. Конденсатор C_1 призначений для гальванічної розв'язки кіл керування та навантаження. Ключ K_1 звичайно виконується безконтактним (напівпровідниковим, магнітним). Джерелом напруги вмикання може бути або постійна напруга, що подається на диністор на час вмикання, або імпульсний трансформатор. Вимкнення здійснюється зниженням напруги на вентилі до $U_{VS} < U_{вим}$. Зниження напруги може бути здійснено або за рахунок зниження напруги живлення до $U_{ж} < U_B$ (рис. 4, б), або шунтуванням перемикального

вентиля ключем K_2 (рис. 4, а), при цьому в коло K_2 звичайно вмикається джерело імпульсу запірної напруги. Подача запірної напруги зменшує час вимикання. Як джерело запірної напруги звичайно використовується комутуючий конденсатор C_2 . При ввімкненому вентилі VS конденсатор C_2 заряджається через резистор R_2 . Полярність напруги зарядженого конденсатора позначена на рис. 4. При замиканні K_2 полярність на перемикальному вентилі змінюється і він вмикається. Ємність комутуючого конденсатора визначається мінімальним зарядом, який повинен накопичитися, щоб призупинити струм через вентиль на час вимикання, і приблизно підраховується за співвідношенням:

$$C_2 \geq (1 - 1,4) \frac{I_H \cdot \tau_{\text{вим}}}{U_{C_2}}, \quad (5)$$

де I_H – струм навантаження під час комутації; U_{C_2} – напруга на конденсаторі C_2 ; $\tau_{\text{вим}}$ – час вимикання U_{VS} .

При активному навантаженні потрібно приймати коефіцієнт 1,4; при активно-індуктивному – 1. Через малість часу вимикання навіть при великих струмах відключення ємність конденсатора виходить відносно невеликою. Ключ K_2 звичайно безконтактний.

Контрольні запитання

1. Поясніть, у чому полягає принцип підсилення сигналу?
2. Як класифікуються підсилювачі і які основні параметри і характеристики вони мають?
3. Наведіть і поясніть напівпровідникову структуру диністора.
4. Який вигляд має вольт-амперна характеристика диністора?
5. Що таке зона від'ємного опору?
6. Як увімкнути і як вимкнути диністор?

2. РЕЛЕЙНИЙ ПІДСИЛЮВАЧ ІЗ ТИРИСТРОМ У ВИХІДНОМУ КОЛІ

Тиристор, у якому від однієї з базових зон зроблено відгалуження у вигляді керуючого електрода, називається триністор, або просто тиристор. Структура й умовна позначка триністора (далі тиристора) показані на рис. 5. Якщо між керуючим електродом і катодом подати пряму напругу на *p-n-перехід*, то можна регулювати значення напруги вмикання тиристора. Цю особливість тиристора легко простежити за вольт-амперною характеристикою, показаною на рис. 6. Такі ВАХ дозволяють виконувати на базі тиристорів різні релейні підсилювачі та безконтактні комутаційні апарати.

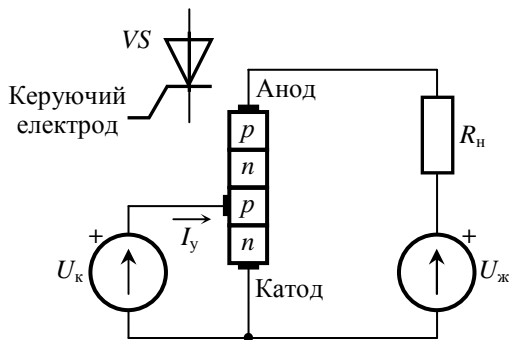


Рисунок 5 – Структура, умовна позначка та вмикання тиристора

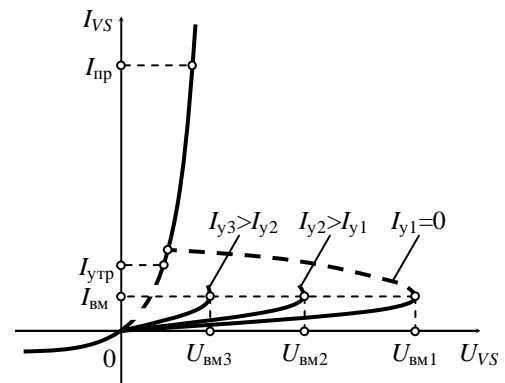


Рисунок 6 – ВАХ тиристора

Основні параметри тиристора:

- струм вмикання $I_{вм}$;
- струм утримання $I_{утр}$ – мінімальний прямий струм включеного стану, при подальшому зменшенні якого тиристор переходить у непровідний стан;
- падіння напруги у провідному стані U_0 ;
- гранично припустимий струм у прямому напрямку $I_{пр}$;
- максимально припустиме амплітудне значення зворотної напруги $U_{зв\max}$;
- час вмикання $t_{вм}$;
- час вимикання $t_{вим}$;
- припустима швидкість зростання прямої напруги, що не призводить до мимовільного вмикання прибору за рахунок ємнісного струму зміщення структури та додатному внутрішньому зворотному зв'язку $(du/dt)_{доп}$;
- припустима швидкість зростання прямого струму, що не призводить до

виходу з ладу прибору за рахунок локального перегріву структури $(di/dt)_{\text{доп}}$;

- значення постійного та імпульсного струму кола керування I_y при напрузі джерела $U_k = 12 \text{ В}$.

Слід зазначити, що тривалість імпульсу керування має бути більше часу вмикання тиристора та звичайно становить $t_k = 15 - 20 \text{ мкс}$.

Вмикання керованого тиристора значно простіше, ніж некерованого, тому що звичайно здійснюється подачею сигналу керування через керуючий електрод. Коло керування та коло навантаження при цьому виявляються досить розв'язаними. Потужність, необхідна для вмикання тиристора набагато менша номінальної потужності в навантаженні. Коефіцієнт підсилення потужності такого релейного підсилювача звичайно становить $10^4 - 10^5$. Схема подачі керуючого сигналу на тиристор показана на рис. 7.

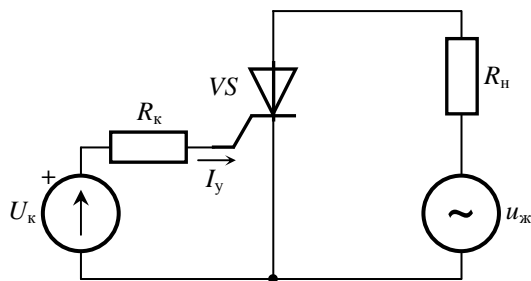


Рисунок 7 – Найпростіша схема керування тиристором

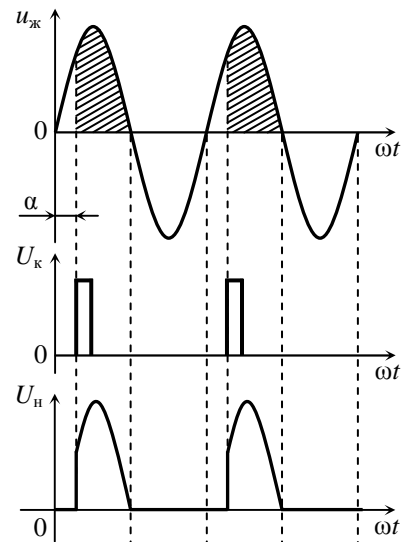


Рисунок 8 – Робота найпростішого регулятора змінної напруги

При імпульсному керуванні, що переважніше, способи формування та подачі керуючого сигналу в принципі такі ж, як і створення імпульсу керування диністора. При цьому як джерело керуючої напруги можна використати безпосередньо напругу живлення. Вимикання тиристора здійснюється у такий же спосіб, що і вимикання диністора. Як видно, керований вентиль у порівнянні з некерованим має явні переваги. Тому в електроапаратобудуванні для створення комутаційних апаратів використовуються головним чином керовані тиристори. Розглянемо деякі основні принципи побудови релейних підсилювачів на тиристорах.

Якщо подати в коло керування імпульс прямої напруги U_k (рис. 8), тиристор

увімкнеться та залишиться ввімкненим після припинення дії U_k . Вимкнути тиристор можливо тільки зниженням струму нижче $I_{yтр}$ (див. рис. 6). У колах змінного струму не потрібні спеціальні прилади для вимикання тиристора. Вимикання прибору здійснюється природно в момент переходу струму через нуль (рис. 8). Із закінченням позитивного півперіоду, коли струм зменшиться нижче $I_{yтр}$, тиристор автоматично вимикається. Тому підсилювачі з живленням від змінного струму набули найбільшого поширення.

Однопівперіодний підсилювач застосовується для керування навантаженням невеликої потужності і є основним структурним осередком для побудови більш складних схем. У схемі найпростішого однопівперіодного підсилювача (рис. 9) напруга живлення змінна, синусоїдальна $u_{ж} = U_m \sin \omega t$, частотою $f = \omega/2\pi$ (рис. 8). Характерною рисою кола керування є подача керуючого сигналу на вхід тиристора за допомогою ключа. При цьому джерело сигналу керування виробляє напругу U_k , свідомо достатню для утворення струму керування такого рівня, при якому характеристика тиристора вироджується в характеристику звичайного діода. Подача U_k на вхід здійснюється тільки тоді, коли потрібно увімкнути тиристор.

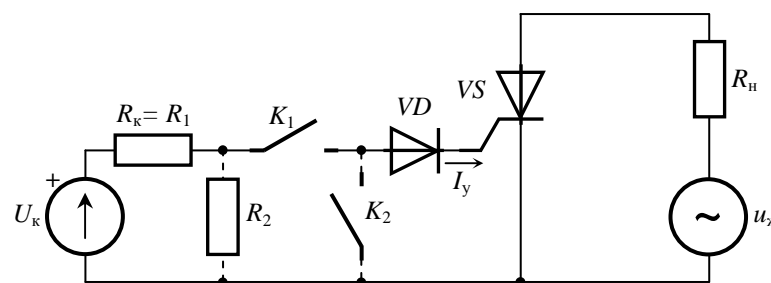


Рисунок 9 – Схема однопівперіодного регулятора змінної напруги

Ключ може бути ввімкнений послідовно входу K_1 або паралельно K_2 . Ключ K_1 при цьому закорочений. Послідовний ключ переважніший тому, що потужність від джерела керування споживається тільки при замкненому ключі. Перевага паралельного ключа полягає в тому, що він може працювати при малій напрузі на ключі. Тиристор вмикається в позитивний півперіод після замикання ключа K_1 (або розмикання ключа K_2). Діод VD захищає керуючий перехід тиристора від зворотної напруги та коло керування від зворотного струму, що може утворитись через падіння напруги від прямого струму на відкритому тиристорі. Резистор R_1 обмежує струм керування. «Відбирання» керуючої напруги можна здійснити через подільник, що складається з резисторів R_1 та R_2 . Цей випадок

зводиться до першого, тобто до одного послідовного опору, шляхом заміни двох паралельних гілок R_2 та $R_1 - U_y$ однією еквівалентною:

$$R_{ке} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}; \quad (6)$$

$$U_{ке} = U_k \frac{R_{ке}}{R_1}. \quad (7)$$

Напруга джерела керування може бути постійною, змінною, випрямленою та імпульсною.

Залежно від методу керування ключами K_1 і K_2 можливі два режими роботи тиристорного підсилювача:

1. *Режим вимикача.* Такий режим використовується для вмикання та відключення навантаження від напруги живлення аналогічно контактору або реле. Ключ K_1 або увесь час розімкнений – і тиристор не вмикається, практично не пропускаючи струму у навантаження (холостий хід), або K_1 замкнений – і тиристор кожен позитивний півперіод відкритий і пропускає струм у навантаження (максимальна віддача).

2. *Режим регулятора середньої напруги в навантаженні.* Тут можливо не тільки вмикання та відключення навантаження, але й плавне регулювання потужності. Регулювання середньої напруги досягається шляхом вмикання ключа K_1 у кожен позитивний півперіод, але в різні, відраховуючи від початку півперіоду, моменти часу. Змінюючи величину кута керування α (рис. 8), змінюємо момент вмикання тиристора, то ж змінюється середнє за період значення напруги в навантаженні.

Для керування тиристором у режимі вимикача використовують тривалі сигнали керування $t_k = T/2$, що перекривають позитивний півперіод напруги живлення, і сигнали керування у вигляді імпульсів. Перший спосіб реалізується дуже просто, але пов'язаний з помітним виділенням потужності на керуючому переході. Другий – вимагає створення генератора імпульсів, але через високу шпаруватість імпульсів потужність, що виділяється на керуючому переході, невелика.

При використанні тривалих сигналів керування як джерело керуючої напруги використовується безпосередньо напруга живлення (рис. 10). При замкненому ключі K_1 через керуючий перехід протікає однопівперіодний струм $i_y = u_{ж}/R_1$.

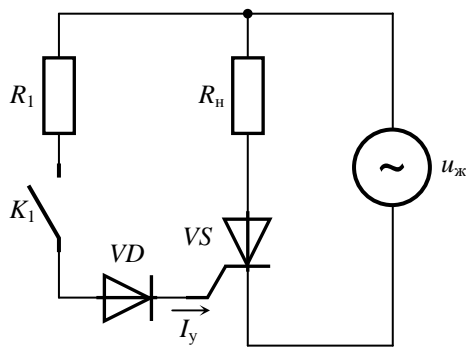


Рисунок 10 – Схема керування тиристором при $t_k = T/2$

Тиристор вмикається в перший позитивний півперіод після замикання K_1 і пропускає струм кожен позитивний півперіод поки K_1 замкнений. Після розмикання K_1 тиристор вимикається в перший негативний півперіод і залишається закритим, поки K_1 розімкнений. Як K_1 звичайно використовують або магнітокерований герметизований контакт (геркон), що відрізняється високою надійністю й швидкодією, або напівпровідниковий безконтактний ключ у вигляді транзистора, диністора, стабілітрона або двобазового діода.

При імпульсному керуванні керуючий електрод тиристора підключається до виходу генератора імпульсів. Широкого розповсюдження набули генератори імпульсів, зібрані на двобазовому діоді та диністорі (рис. 11).

Генератор на двобазовому діоді (рис. 11, а) виконується за схемою реле часу. Коло керування та навантаження двобазового діода VT живляться від спільного джерела напруги E . Вхід двобазового діода VT зашунтований зарядним конденсатором C_1 . У початковому стані ключ K_1 розімкнений, конденсатор не заряджений, вхідна напруга діода $u_{вх} = u_C = 0$, діод відключений, імпульсний трансформатор TT знеструмлений.

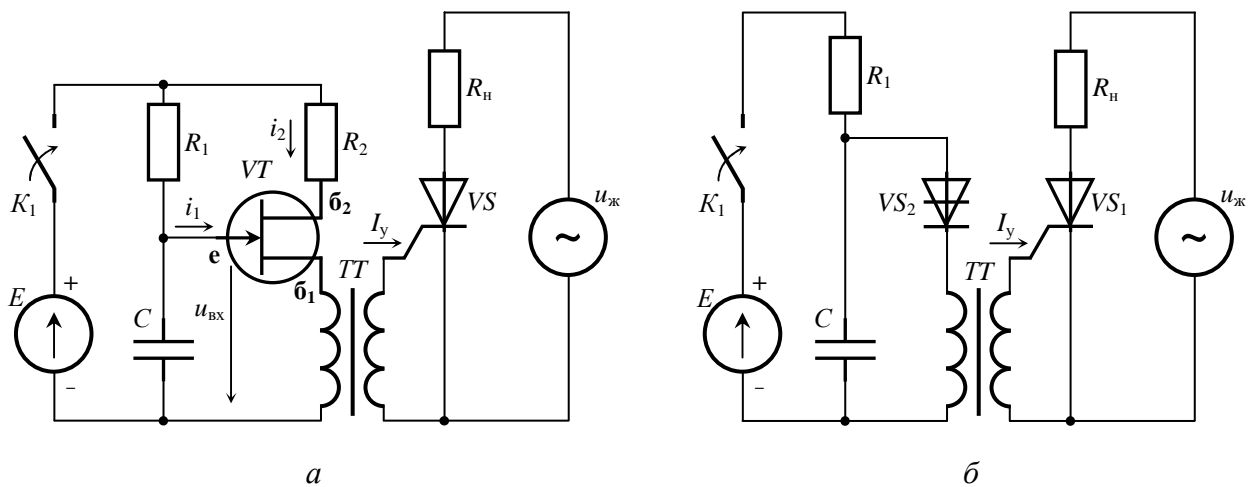


Рисунок 11 – Схеми імпульсного керування тиристором

Струм i_2 створює всередині бази VT , між емітером і базою b_1 , падіння напруги u_{BH} , що закриває p - n -перехід. Тому при $u_{BH} > u_{BX}$ перехід закритий. При $u_{BX} \geq u_{BH}$ перехід відкривається. У базу з емітера інжектуються неосновні носії. Опір ділянки e - b_1 різко падає. Зменшується запірна напруга u_{BH} , струм i_1 збільшується, ще більше відкриваючи p - n -перехід ($du_1/di_1 < 0$). Розвивається лавиноподібний процес, що закінчується повним відкриттям переходу.

Напруга вмикання [1]

$$u_{BM} = u_{BH}|_{i_1=0} + u_{10} \approx u_{BH}|_{i_1=0} = u_{\delta\delta} \frac{R_{\delta 1}}{R_{\delta\delta}} = \eta_R u_{\delta\delta}, \quad (8)$$

де $\eta_R = R_{\delta 1}/R_{\delta\delta}$ – внутрішній параметр; $R_{\delta\delta}$, $R_{\delta 1}$ – опори бази при $i_1 = 0$ відповідно між выводами b_1 - b_2 і ділянки e - b_1 ; u_{10} – напруга відкритого p - n -переходу.

При напрузі на конденсаторі, що дорівнює напрузі спрацьовування, діод VT вмикається, реле спрацьовує, струм у навантаженні максимальний. Нехтуючи струмом замкненого переходу, спрацьовування релейного елемента відбувається при $u_{BX} = u_C = u_{BM} \approx u_{BH}|_{i_1=0}$, тобто практично при закритому діоді:

$$u_{\delta\delta} \approx E. \quad (9)$$

Витримка часу починається із замикання ключа K_1 . Ємність заряджається

$$u_C(t) = E \left(1 - e^{-\frac{t}{R_1 C}} \right). \quad (10)$$

Коли напруга на конденсаторі дорівнюватиме напрузі вмикання $u_{BX} = u_C = u_{BM}$, діод VT увімкнеться, реле спрацює, через трансформатор на керуючий електрод тиристора надійде імпульс струму вмикання.

З рівняння (10) у момент спрацьовування з урахуванням (8) та (9) визначаємо витримку часу

$$t_{\text{спр}} = R_1 C \cdot \ln \frac{1}{1 - \eta_R} = \frac{\alpha}{\omega}. \quad (11)$$

Регулювання кута керування α здійснюється зміною R_1 та C .

Опір R_1 обмежений зверху. Щоб конденсатор міг зарядитися до напруги спрацьовування $u_C = u_{BM}$, необхідне виконання умови

$$E \geq u_{BM} + I_{BM} R_1,$$

де I_{BM} – струм вмикання двобазового діода.

Звідки

$$R_1 < \frac{E - u_{\text{ВМ}}}{I_{\text{ВМ}}} \approx (1 - \eta_R) \frac{E}{I_{\text{ВМ}}}. \quad (12)$$

При досить великому опорі R_1 після розряду конденсатора струм i_1 зменшиться до $i_1 \approx E/R_1 \leq I_{\text{ВМ}}$. При цьому діод вимикається і починається повторна витримка часу. Схема переводиться в автогенераторний режим при

$$R_1 > \frac{E}{I_{\text{ВМ}}}. \quad (13)$$

де $I_{\text{ВМ}}$ – струм вимикання двобазового діода.

У технічній літературі двобазовий діод часто називають одноперехідним транзистором. У табл. 1 наведені параметри найпоширеніших одноперехідних транзисторів [2].

Таблиця 1 – Транзистори одноперехідні з n -базою малої потужності

Тип прибора	$I_e \text{ max,}$ мА	$U_{\text{б1б2 max,}}$ В	$U_{\text{б1е max,}}$ В	$P \text{ max,}$ мВт	$I_{\text{еб0 max,}}$ мкА	η_R	$U_{\text{бе нас,}}$ В	$I_{\text{вкл,}}$ мкА	$I_{\text{вим,}}$ мкА	$R_{\text{б1б2,}}$ кОм
КТ119А	10	20	20	25	1	0,5÷0,65	2,5	0,5÷5	1÷6	4÷12
КТ119Б	10	20	20	25	1	0,6÷0,75	2,5	0,5÷5	1÷6	4÷12
2Т117А	50	30	30	300	1	0,5÷0,7	5	20	1	4÷7,5
2Т117Б	50	30	30	300	1	0,65÷0,85	5	20	1	4÷7,5
2Т117В	50	30	30	300	1	0,5÷0,7	5	20	1	6÷9
2Т117Г	50	30	30	300	1	0,65÷0,85	5	20	1	6÷9
КТ117А	50	30	30	300	1	0,5÷0,7	5	20	1	4÷9
КТ117Б	50	30	30	300	1	0,65÷0,9	5	20	1	4÷9
КТ117В	50	30	30	300	1	0,5÷0,7	5	20	1	8÷12
КТ117Г	50	30	30	300	1	0,65÷0,9	5	20	1	8÷12
2Т117А-5	50	30	30	30	1	0,5÷0,9	4	20	1	4÷12

Найпростіший генератор на диністорі (рис. 11, б) працює аналогічно схемі реле часу на двобазовому діоді. Диністор вмикається при (рис. 3)

$$u_C(t) = U_{\text{ВМ}}. \quad (14)$$

Витримка часу на вмикання диністора VS_2 , а отже й тиристора VS_1 визначається як

$$t_{\text{спр}} = R_1 C \cdot \ln \frac{1}{1 - \frac{U_{\text{ВМ}}}{E}} = \frac{1}{f_i} = \frac{\alpha}{\omega}. \quad (15)$$

де f_i – частота проходження вихідних імпульсів.

Конденсатор C разом з обмоткою трансформатора TT утворюють коливальний контур. Умова виникнення автогенераторного режиму:

$$\frac{E - U_{\text{ВМ}}}{I_{\text{ВМ}}} > R_1 > \frac{E}{I_{\text{УТР}}}, \quad (16)$$

де $U_{\text{ВМ}}$, $I_{\text{ВМ}}$, $I_{\text{УТР}}$ – параметри диністора (рис. 3).

При виконанні умови (16) розряд конденсатора має коливальний характер і диністор вимикається при першому переході струму через нуль.

Середнім між тривалим та імпульсним керуванням тиристорним вимикачем є схема, наведена на рис. 12, де сигнал керування знімається з робочих електродів тиристора. Від схеми на рис. 10 вона відрізняється тим, що коло керування підключене після навантаження R_n до анода тиристора.

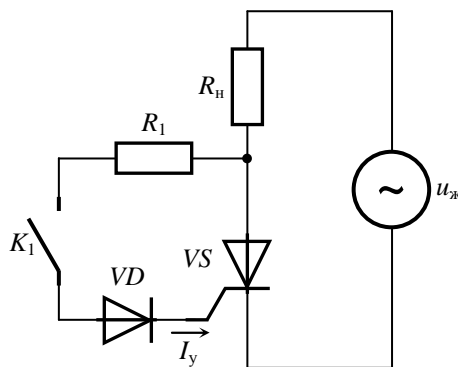


Рисунок 12 – Схема керування тиристором при $t_k = t_{\text{ВМ}}$

Тому що $R_n \ll R_1$, при вмиканні $U_k = u_{\text{ж}}$ (рис. 12), то принципової відмінності від схеми рис. 10 немає. Однак, як тільки тиристор вмикається, U_k знижується до залишкової напруги на тиристорі і живлення кола керування припиняється. Отже, тиристор керується коротким імпульсом, тривалість якого дорівнює часу вмикання тиристора $t_k = t_{\text{ВМ}}$. При цьому зменшується потужність, виділена в керуючому переході, і полегшується режим роботи ключа K_1 .

Режим плавного регулювання середньої напруги в навантаженні здійснюється подачею керуючого сигналу (замикання ключа K_1 на рис. 9) у різні моменти часу α , відраховуючи від початку позитивного півперіоду. Для цього необхідний синхронний комутатор з регульованим кутом комутації α протягом півперіоду. Широкого розповсюдження набула схема фазового керування на двобазовому діоді, наведена на рис. 13. Живлення в схему надходить від джерела живлення тиристора безпосередньо, або через погоджувальний трансформатор. Це забезпечує синхронізацію генератора: до закінчення позитивного півперіоду двобазовий діод VT відкритий і конденсатор C розряджається, так що до початку чергового позитивного півперіоду конденсатор завжди розряджений. Стабілітрон VD_1 стабілізує напругу на схемі на рівні $U_{ст}$ в позитивний півперіод і шунтує схему в негативний півперіод.

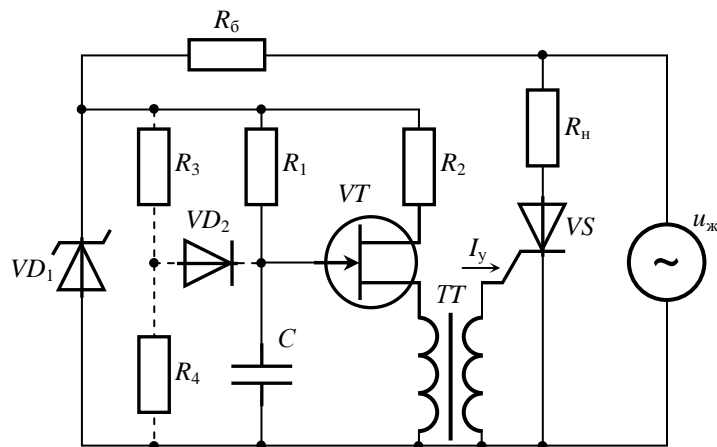


Рисунок 13 – Схема плавного регулювання середньої напруги в навантаженні

З початку позитивного півперіоду конденсатор починає заряджатися, напруга u_C на ньому зростає, прагнучи до напруги стабілізації $U_{ст}$ стабілітрона VD_1 (рис. 14, а). При зарядженні конденсатора до напруги спрацьовування двобазового діода $u_C = u_{вм}$, діод VT вмикається, на вході тиристора VS з'явиться керуючий імпульс U_k .

При зміні величини резистора R_1 зміниться постійна часу зарядження конденсатора, нахил характеристики u_C та кут керування (фаза вмикання) α (11). Діапазон регулювання напруги в навантаженні визначається моментом початку стабілізації напруги живлення на рівні $U_{ст}$. При діапазоні регулювання кута α у межах $10 - 180^\circ$ опір R_1 змінюється приблизно в 20 разів, що важко реалізувати в системах автоматики. Цей недолік усувають введенням подільника

$R_3 - R_4 - VD_2$. Опір подільника досить малий, так що конденсатор майже миттєво заряджається до напруги U_{R4} на резисторі R_4 (рис. 14, б), утворюючи основу вхідного імпульсу двобазового діода. Змінюючи R_4 в невеликих межах, за рахунок зміни висоти основи кут α регулюється у всьому робочому діапазоні. Чутливість легко можна регулювати, змінюючи величину резистора R_1 , змінюючи тим самим нахил «пилки». Якщо як опір R_4 використати терморезистор або фоторезистор, то схему рис. 13 можна використовувати як автоматичний регулятор температури або освітлення.

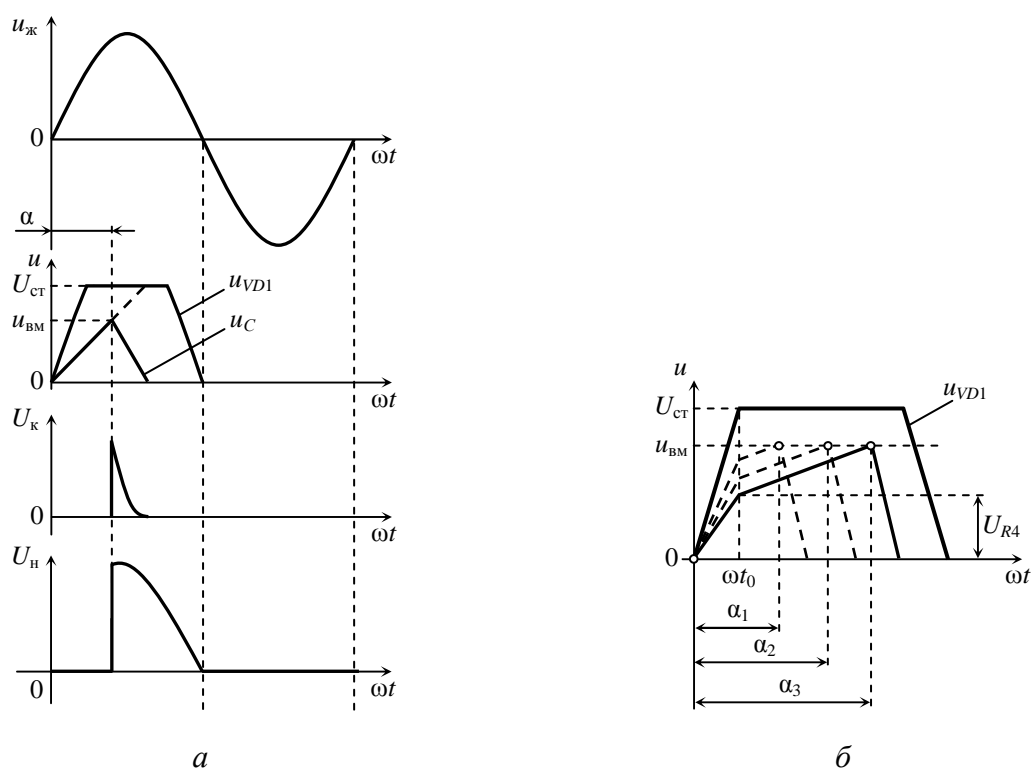


Рисунок 14 – Робота регулятора змінної напруги

Більшу чутливість регулювання середньої напруги в навантаженні можна досягти, якщо як комутатор з регульованим протягом півперіоду кутом комутації α використати операційний підсилювач DD_1 , включений за схемою компаратора (рис. 15, а). На неінвертуючий вхід операційного підсилювача подається еталонна $U_{ет} = U_{VD3}$ напруга, що знімається зі стабілітрона VD_3 . На інвертуючий вхід подається напруга з конденсатора C . При $U_C < U_{VD3}$ підсилювач буде у відсіканні, напруга керування тиристором VS дорівнює нулю, тиристор закритий (рис. 15, б).

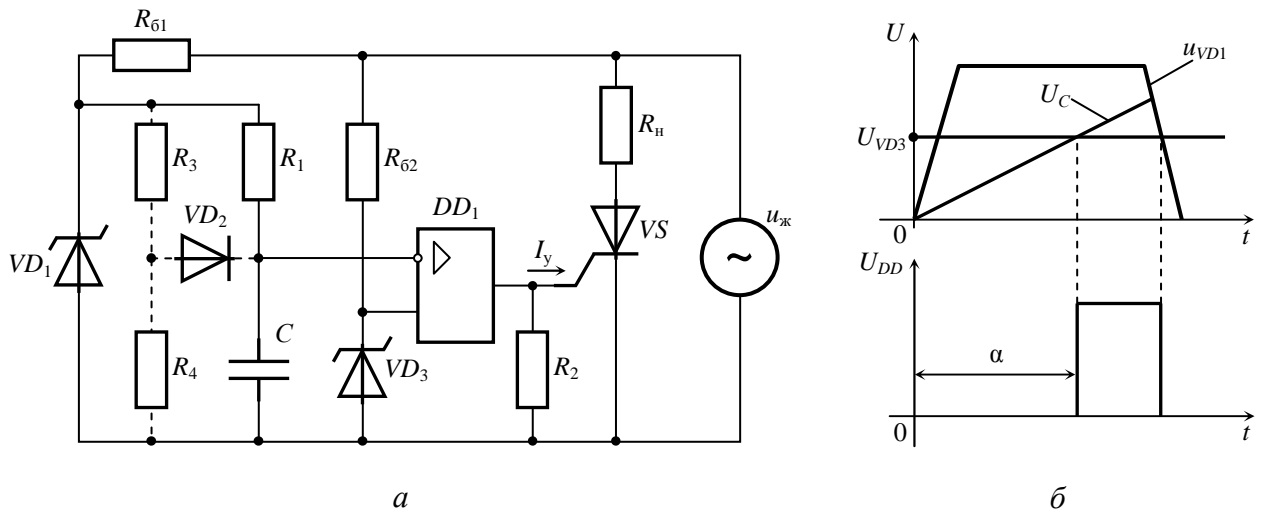


Рисунок 15 – Схема плавного регулювання середньої напруги в навантаженні

При $U_C > U_{VD3}$ між виводами підсилювача буде напруга з додатною полярністю на неінвертуючому вході, що виведе підсилювач у режим насичення, створюючи на виході напругу позитивної полярності (див. рис. 15, б). Ця напруга прикладається до керуючого електрода тиристора VS і тиристор вмикається. Процеси повторюються на початку наступного періоду. Регулювання величини кута комутації α здійснюють зміною величини резистора R_1 , як у схемі рис. 13, або використанням резистора змінного опору замість стабілітрона VD_3 . У випадку використання резистора змінного опору замість VD_3 можливо змінювати величину еталонної напруги та, як наслідок, момент рівності напруг на інвертуючому та неінвертуючому входах операційного підсилювача.

Релейний підсилювач постійного струму, виконуваний на звичайних тиристорах, вмикається струмом керування та відключається зменшенням напруги на силових електродах. Поширена схема підсилювача наведена на рис. 16. Напруга живлення $U_{ж}$ подається в навантаження R_n із вмиканням силового тиристора VS_1 від сигналу керування I_{y1} . Аналогічно схемі рис. 4, а як джерело запірної напруги звичайно використовується комутуючий конденсатор C . При ввімкненому вентилі VS_1 конденсатор C заряджається через резистор R_1 . Полярність напруги зарядженого конденсатора позначена на рис. 16 без дужок. При подачі сигналу I_{y2} вмикається допоміжний тиристор VS_2 , заряджений конденсатор підключається паралельно тиристорі VS_1 , напруга на електродах VS_1 стає від'ємною і він вимикається. Необхідна ємність конденсатора визначається рівнянням (5). Максимальна пряма напруга на тиристорах дорівнює $U_{ж}$.

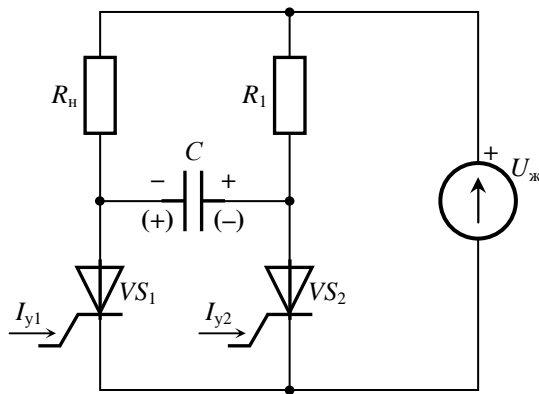


Рисунок 16 – Релейний підсилювач постійного струму

Струм у навантаженні

$$I_{\text{н}} = I_{\text{VS1}} \approx \frac{U_{\text{ж}}}{R_{\text{н}}}. \quad (17)$$

Тиристор VS_2 вимикається за рахунок зменшення струму I_{VS2} до $I_{\text{VS2}} < I_{\text{утр}}$, при досить великому опорі R_1 .

$$R_1 > \frac{U_{\text{ж}}}{I_{\text{утр}VS_2}}.$$

У випадку коли необхідно реалізувати двопозиційний вимикач, обидва тиристори використовуються як силові. Навантаження включається послідовно з кожним з тиристорів: $R_{\text{н1}} = R_1$, $R_{\text{н2}} = R_{\text{н}}$. Тиристор VS_2 після вмикання сам не вимикається, і конденсатор перезаряджається (полярність у дужках). При вмиканні VS_1 конденсатор розряджається через VS_2 і вимикає його. Таким чином, з подачею сигналу керування I_{y1} вмикається навантаження $R_{\text{н2}} = R_{\text{н}}$, а з подачею сигналу керування I_{y2} вмикається навантаження $R_{\text{н1}} = R_1$. Керування тиристорами здійснюється у такий же спосіб, що й при змінному струмі.

До спеціальних типів тиристорів належать симістори, двоопераційні тиристори та оптронні тиристори.

Симістор (симетричний тиристор) – це прибор, що являє собою п’ятишарову структуру, який керується як при позитивній, так і при негативній напрузі на ньому. ВАХ симістора, умовна позначка, схема вмикання та осцилограми, що ілюструють роботу двопівперіодного регулятора змінної напруги, наведені на рис. 17.

Змінюючи затримку подачі імпульсу керування U_k через кут керування α щодо переходу напруги живлення через нуль, можна регулювати напругу в навантаженні U_H від максимального значення до нуля.

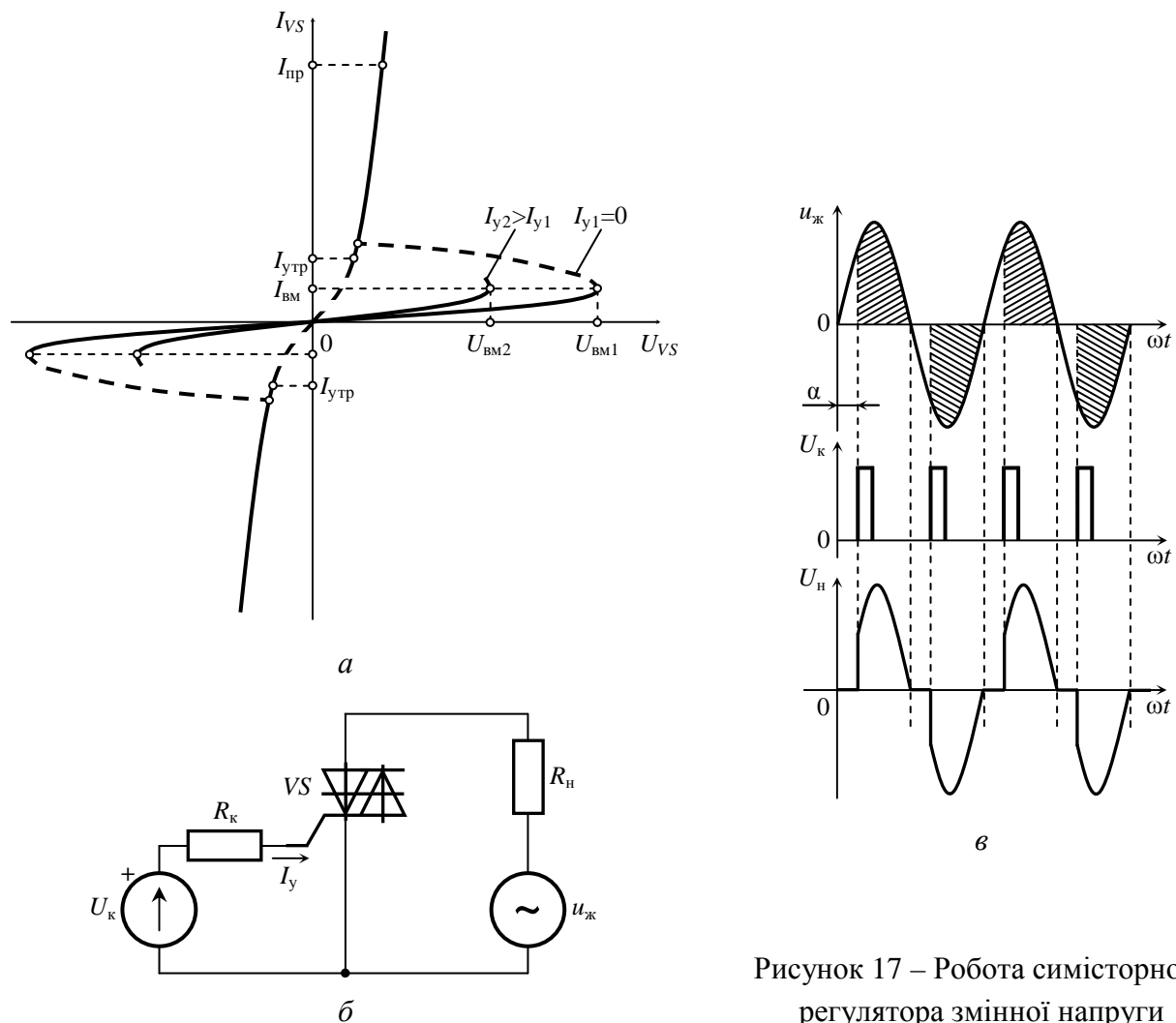


Рисунок 17 – Робота симісторного регулятора змінної напруги

Двоопераційний тиристор – це прибор, що не тільки вмикається, але й вимикається сигналом керування. Вмикання відбувається аналогічно звичайному тиристорі, а вимикання забезпечується подачею в коло керування імпульсу від’ємної напруги. При цьому переривання струму в структурі відбувається за рахунок виведення об’ємного заряду з бази.

Фототиристор – це прибор, що керується світловим потоком.

Оптронний тиристор (оптрон) являє собою поєднання світлодіода та фототиристора в одному корпусі. Якщо під дією напруги керування U_k через світлодіод пропустити струм, то генерується світловий потік. Світловий потік концентрується в зоні керуючого *p-n-переходу* фото тиристора, тиристор вмикається. Основна перевага фототиристорів та оптронів полягає у відсутності гальванічного зв’язку силового кола та кола керування.

Умовні позначки двоопераційного тиристора, фототиристора та оптрона наведені на рис. 18.

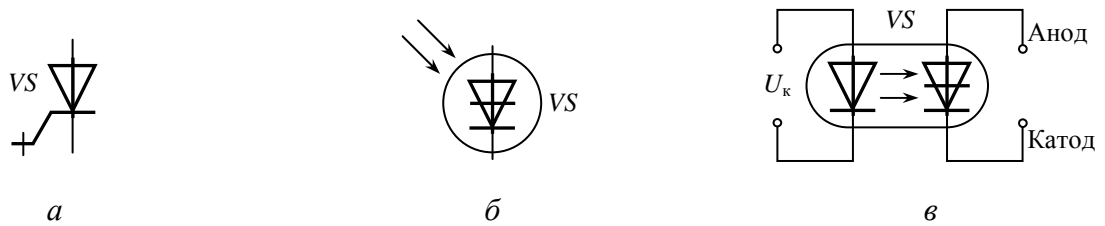


Рисунок 18 – Умовна позначка спеціальних тиристорів:
a – запірний тиристор; *б* – фототиристор; *в* – оптрон

Наявність у тиристорів внутрішнього зворотного зв'язку (зони від'ємного диференційного опору) обумовлює ряд особливостей цих приборів. Для вмикання тиристора досить у коло керування подати короткий імпульс невеликої потужності. Далі ввімкнений стан підтримується внутрішнім зворотним зв'язком. Тому тиристри мають більший коефіцієнт підсилення потужності. У порівнянні із транзисторами тиристри стійкіші до перевантажень.

Вихідними даними при розрахунку тиристорного підсилювача є:

- Вихідні параметри: опір навантаження R_n ; номінальна потужність у навантаженні P_n або напруга U_n та струм I_n у навантаженні в стані «ввімкнене».
- Напруга живлення $U_{ж}$ при живленні підсилювача від джерела постійного струму, або $u_{ж} = U_m \sin(\omega t)$ при живленні від джерела змінного струму.
- Схема підсилювача.
- Максимальна температура навколишнього середовища t_{nc} .

Конкретні вимоги до величини коефіцієнтів підсилення звичайно не ставляться. Якщо ж вони задані, то реалізуються за рахунок комутаторів, керуючих тиристорами. Параметри кола керування тиристором є в цьому випадку вихідними для розрахунку комутатора.

Якщо у вихідних даних заданий опір навантаження R_n , то напруга живлення визначається при розрахунку та погоджується з мережею через трансформатор або подільник напруги.

Необхідно визначити номінальні параметри навантаження; вибрати тиристри, що відповідають умовам експлуатації; визначити параметри кола керування тиристором.

Розрахунок підсилювача проводиться в наступній послідовності [3].

1. Визначення номінальних параметрів навантаження.

При живленні від джерела постійного струму (рис. 4, 16), нехтуючи струмами утікання вимкненого та залишковою напругою відкритого тиристора, отримуємо номінальні значення:

$$U_{\text{н}} = U_{\text{ж}}; \quad (18)$$

$$R_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}^2}{P_{\text{н}}}; \quad (19)$$

$$I_{\text{н}} = \frac{U_{\text{ж}}}{R_{\text{н}}}. \quad (20)$$

При живленні підсилювача від джерела змінного синусоїдального струму (рис. 7, 10, 12) через середнє значення напруги живлення U

$$U = U_m \frac{2}{\pi}, \quad (21)$$

визначаємо номінальні значення:

$$U_{\text{н}} = \frac{U}{2} = \frac{U_m}{\pi}; \quad (22)$$

$$R_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}^2}{P_{\text{н}}} = \frac{U_m^2}{\pi^2 \cdot P_{\text{н}}}; \quad (23)$$

$$I_{\text{н}} = \frac{U}{2 \cdot R_{\text{н}}} = \frac{U_m}{\pi \cdot R_{\text{н}}}, \quad (24)$$

де U_m – амплітудне значення напруги живлення.

Якщо при живленні підсилювача від мережі змінного струму заданим є діюче значення номінальної потужності в навантаженні $P_{\text{нД}} = P_{\text{н}}$, то номінальне значення потужності в навантаженні, підраховане за діючим струмом в навантаженні, дорівнює

$$P_{\text{нД}} = P_{\text{н}} \cdot k_{\text{ф}}^2. \quad (25)$$

де $k_{\text{ф}} = \frac{\pi}{2}$ – коефіцієнт форми струму в навантаженні при синусоїдальній напрузі живлення та активному навантаженні.

При заданому номінальному опорі навантаження R_H :

$$U_H = \sqrt{P_H \cdot R_H}; \quad (26)$$

$$I_H = \frac{U_H}{R_H}. \quad (27)$$

2. Вибір тиристорів

Визначаємо:

- максимальний струм відкритого тиристора:

$$I_{VS_{\max}} = I_H; \quad (28)$$

- максимальна амплітудна пряма $U_{(VS_{\max})_{\text{пр}}}$ та зворотна $U_{(VS_{\max})_{\text{зв}}}$ напруга на закритому тиристорі:

$$U_{VS_{\max}} = U_{(VS_{\max})_{\text{пр}}} = U_{(VS_{\max})_{\text{зв}}} = U_m. \quad (29)$$

Тиристиори вибираємо за номінальними параметрами, передбачивши запас за напругою приблизно в 1,5 рази:

$$I_{VS_{\text{ном}}} \geq I_{VS_{\max}}; \quad (30)$$

$$U_{VS_{\text{ном}}} \approx 1,5 \cdot U_{VS_{\max}}, \quad (31)$$

де $I_{VS_{\text{ном}}}$ та $U_{VS_{\text{ном}}}$ – для малопотужних тиристорів відповідно граничні значення середнього струму та прямої і зворотної напруги тиристора.

Для розширення меж комутованих струмів і напруг тиристиори можуть з'єднуватися послідовно й паралельно один одному з дотриманням правил з рівномірною розподілу напруги і вирівнювання струмів тиристорів [4].

3. Перевірка теплового режиму тиристорів

Завдання полягає у визначенні найбільшої температури кристала напівпровідника $t_{\text{п}}^0$ і порівнянні її із припустимою $t_{\text{п max}}^0$, або температури перегріву кристала $\Theta_{\text{п}}$ відносно температури навколишнього середовища $t_{\text{нс}}^0$, при цьому перегрів не повинен перевершувати припустимих значень $\Theta_{\text{п max}}$. До того ж необхідно виконання умови

$$\Theta_{\text{п}} \leq \Theta_{\text{п max}}, \quad (32)$$

де $\Theta_{\text{п max}} = t_{\text{п max}}^0 - t_{\text{нс}}^0$.

Порядок розрахунку наступний.

Визначається найбільша потужність, розсіювана в *p-n-переході*:

$$P_{\Pi} = P_{\text{осн}} + P_{\text{дод}}, \quad (33)$$

де $P_{\text{осн}}$ та $P_{\text{дод}}$ – основна та додаткова потужності переходу.

Основна потужність обумовлена прямим струмом відкритого тиристора

$$P_{\text{осн}} = \frac{1}{T} \int_0^T i_{VS}(t) \cdot u_{VS}(t) \cdot dt. \quad (34)$$

У практичних розрахунках $P_{\text{осн}}$ визначають за формулою

$$P_{\text{осн}} = U_0 I_{VS \text{max}} + I_{\text{Д}}^2 R_{\text{д}} = U_0 I_{\text{н}} + k_{\text{ф}}^2 I_{\text{н}}^2 R_{\text{д}}, \quad (35)$$

де $I_{\text{Д}} = k_{\text{ф}} I_{\text{н}}$ – діюче значення струму через тиристор; U_0 – напруга на тиристорі у ввімкненому стані; $R_{\text{д}} = du_{VS}/di_{VS}$ – динамічний опір ділянки вольт-амперної характеристики відкритого тиристора.

Додаткова потужність $P_{\text{дод}}$ виділяється в керуючому переході тиристора й складається із прямого та зворотного анодного струмів у вимкненому стані та втрат, що виділяються під час перемикання:

$$P_{\text{дод}} = \frac{1}{T} \int_0^T i_y(t) \cdot u_y(t) \cdot dt. \quad (36)$$

При керуванні від джерела постійного струму (рис. 4, 16) додаткова потужність визначається як:

$$P_{\text{дод}} = \frac{1}{T} (I_y \cdot U_{\text{к}} \cdot t_{\text{к}}), \quad (37)$$

де $t_{\text{к}}$ – тривалість прямокутного імпульсу керування.

Імпульси потужності довільної або складної форми, у тому числі й півсинусоїди при живленні підсилювача від джерела змінного струму, замінюються еквівалентними прямокутними [3] за умови рівності амплітуди й середнього значення потужності реального та еквівалентного імпульсів.

Далі порівнюється розсіювана потужність з максимально припустимою з довідника для даного тиристора при найвищій температурі навколишнього середовища. Якщо виконується умова

$$P_{\Pi} \leq P_{\Pi \text{max}}, \quad (38)$$

то виконується й умова $\Theta_{\Pi} \leq \Theta_{\Pi \text{max}}$, і температура переходу не перевищить максимально припустиму.

Якщо потужність P_{Π} , виділювана в p - n -переході, виявиться вище за припустиме, то необхідно визначити температуру перегріву

$$\Theta_{\Pi} = \Delta t_{\Pi-K}^0 + \Delta t_{K-P}^0 + \Delta t_{P-C}^0 = P_{\Pi} \cdot R_T, \quad (39)$$

де $\Delta t_{\Pi-K}^0$, Δt_{K-P}^0 , Δt_{P-C}^0 – різниці температур відповідно між переходом і корпусом тиристора, корпусом і радіатором, радіатором і навколишнім середовищем; $R_T = R_{\Pi-K} + R_{K-P} + R_{P-C}$ – повний сталий тепловий опір системи перехід–корпус–радіатор–середовище; $R_{\Pi-K}$, R_{K-P} , R_{P-C} – теплові опори відповідно між переходом і корпусом тиристора, корпусом і радіатором, радіатором і навколишнім середовищем.

Значення $R_{\Pi-K}$, R_{K-P} , R_{P-C} наводяться в довіднику при номінальних умовах охолодження і з вказівкою необхідних коректив при відхиленні умов охолодження від номінальних.

Температуру перегріву зменшують зменшенням теплового опору R_T за рахунок зміни умов охолодження. Наприклад, якщо радіатор був відсутній, то його варто застосувати, або від природного охолодження перейти до примусового, щоб збільшити швидкість охолоджувального потоку. У крайньому випадку варто перейти до тиристора з більшою припустимою потужністю розсіювання (більший номінальний струм).

4. Визначення параметрів кола керування

Завдання полягає у виборі таких значень ЕРС керування e_k та опору R_k , при яких було б забезпечене вмикання всіх тиристорів даного типу. При цьому напруга U_H та струм I_y керування, а також потужність P_k розсіювана на керуючому переході, не повинні перевищувати припустимих значень. Тут необхідно скористатися діаграмою керування тиристором (рис. 19).

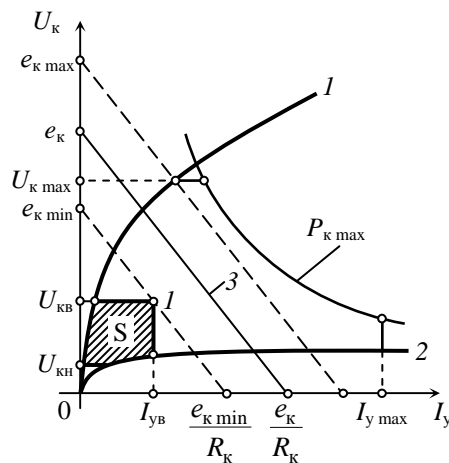


Рисунок 19 – Діаграма керування тиристором

При деякій e_k вольт-амперна характеристика резистора R_k (пряма 3) перетинає вольт-амперні характеристики керуючого переходу тиристорів (криві 1 і 2, що відповідають найбільшому розкиду параметрів) вище області гарантованого вмикання **S**. У той же час пряма 3 у діапазоні між характеристиками 1 і 2 проходить нижче забороненої зони, обмеженої припустимими значеннями U_k , I_y , P_k . Зі зміною e_k навантажувальна пряма 3 зміщується паралельно самій собі. Якщо пряма 3 перетинає крайній виступ пускової області **S** (точка 1), то напруга керування буде мінімально припустимою:

$$e_{k \min} = U_{kв} + I_{yв} R_k. \quad (40)$$

При цьому джерело керування повинне мати потужність, достатню для вмикання тиристора з мінімальним вхідним опором (крива 2). Падіння напруги на керуючому переході тиристора в цьому випадку забагато менше гранично припустимої і потужністю на переході можна знехтувати. Тоді дорівнявши нулю похідну dP_k/dR_k , одержимо оптимальне значення величини R_k :

$$R_k \approx \frac{U_{k \max}}{I_{y \max}}, \quad (41)$$

де $U_{k \max}$, $I_{y \max}$ – максимальні значення вмикальної напруги і струму керуючого електрода тиристора, які відповідають найбільшій температурі перегріву переходів та найбільш інтенсивній роботі підсилювача.

Максимально припустиме значення e_k визначається за співвідношеннями:

$$\begin{aligned} e_{k \max} &= 2\sqrt{P_{k \max} R_k}; \\ e_{k \max} &= U_{k \max} + I_{yв} R_k; \\ e_{k \max} &= I_{y \max} R_k, \end{aligned} \quad (42)$$

з яких приймається мінімальне із трьох значень. Якщо задано один з параметрів кола керування e_k або R_k (або діапазон зміни параметра), то значення іншого параметра визначається з діаграм (рис. 19) шляхом проведення граничних ліній навантаження. Діаграми керування або граничні параметри керування тиристором наводяться в довідниках.

Напруга спрацьовування визначається виразом

$$e_{кс} = U_{k \max} + I_{y \max} R_k. \quad (43)$$

При керуванні від постійної напруги обмежуючим фактором є припустима потужність розсіювання на переході. При імпульсному керуванні $P_{k \max}$ значно зростає. Амплітуда імпульсів E_{km} не повинна перевершувати $U_{k \max}$, а тривалість імпульсів має бути достатньою для вмикання тиристорів $t_k > t_{BM}$. У довідниках наводяться залежності амплітуди імпульсу керування у функції його тривалості. За цими залежностями необхідно скорегувати тривалість імпульсів керування тиристора відповідно до реальних умов.

Контрольні запитання

1. Поясніть принцип дії реле часу на диністорі. Як здійснюється регулювання витримки часу?
2. Який вигляд має вольт-амперна характеристика тиристора?
3. Як увімкнути і вимкнути тиристор?
4. Поясніть принцип дії простішого релейного тиристорного підсилювача з живленням від джерела змінного струму.
5. Які режими роботи тиристорного підсилювача можливі залежно від методу керування у вхідному колі?
6. Які існують основні способи керування тиристорним підсилювачем у режимі вимикача? Наведіть типові схеми.
7. Чому комутаційний конденсатор прискорює вимикання тиристора?
8. Які типові елементи можуть бути застосовані в якості ключів керування тиристорним підсилювачем? Поясніть їх роботу, зробіть порівняльне оцінення.
9. Яким вимогам повинні задовольняти керуючі імпульси при імпульсному керуванні станом тиристора?
10. Поясніть роботу простішого тиристорного підсилювача, керованого генератором на дворазовому діоді? Як здійснюється синхронізація генератора?
11. Як здійснюється фазове керування тиристором? Поясніть роботу схеми фазового керування на диністорі.
12. Які вихідні дані потрібні для розрахунку релейного елемента на тиристорі? Що необхідно визначити?
13. Як з діаграми керування визначити опір кола керування тиристором?
14. Як з діаграми керування визначити мінімально необхідне і максимально припустиме значення ЕРС керування?
15. Чим відрізняється реле часу на диністорі від реле на двобазовому діоді?

3. ТИРИСТОРНИЙ РЕЛЕЙНИЙ ПІДСИЛЮВАЧ ІЗ ТРАНЗИСТОРОМ У ВХІДНОМУ КОЛІ

У ряді випадків потужності джерела керуючого сигналу e_k недостатньо для надійного вмикання тиристора навантаження. У цьому випадку керуючий імпульс вимагає попереднього підсилення. Оптимальним вважається застосовувати підсилювальний каскад на біполярному транзисторі VT , включений за схемою зі спільним емітером (рис. 20).

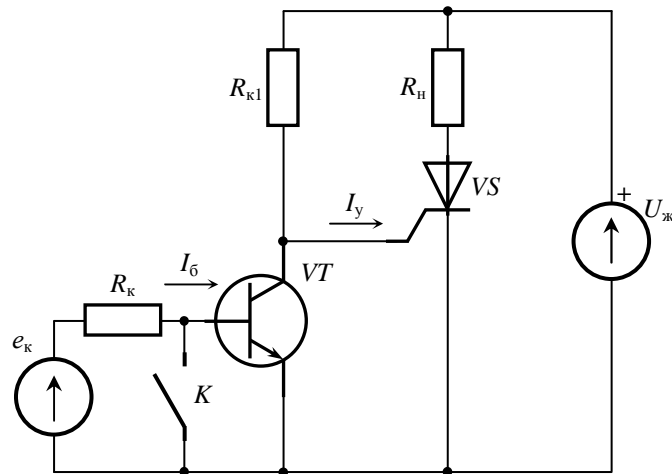


Рисунок 20 – Релейний підсилювач

У вихідному стані керуючий перехід тиристора шунтований відкритим транзистором VT . У режим насичення транзистор переводиться струмом $I_{\text{б}} = I_{\text{бн}}$ при виборі досить малого опору R_k . При замиканні ключа K шунтується базове коло транзистора. Транзистор переходить в активний режим, близький до режиму відсікання. Шунтування керуючого переходу тиристора транзистором VT припиняється, через керуючий перехід тиристора протікає струм керування I_y і тиристор вмикається. У навантаженні R_n протікає струм, що сигналізує про відсутність вхідної напруги e_k . Подібні релейні елементи широко використовуються в реле мінімальної напруги або струму, якщо вхідний сигнал e_k пропорційний струму. У цьому випадку ключ K відсутній, а перехід транзистора в активний режим відбувається при зменшенні контрольованого e_k нижче граничного рівня.

Визначення параметрів навантаження й типу тиристора VS здійснюється за рівняннями (18–39) відповідно до методики, викладеної в розд. 2. Для керуючого кола тиристора за довідковими даними, або скориставшись діаграмою керування (рис. 19), необхідно визначити наступні параметри:

$$U_{k \max}; I_{y \max}; U_{\text{кв}}; I_{\text{ув}}.$$

Вибір транзистора VT у входному колі тиристора VS .

Визначаємо найбільший можливий струм колектора $I_{к\max}$ при насиченні транзистора та найбільшу напругу на колекторі $U_{ке\max}$ при його відсіканні:

$$I_{к\max} = I_{кн} \approx \frac{U_{ж}}{R_{н}}; \quad (44)$$

$$U_{ке\max} = U_{ке20} \approx U_{ж}. \quad (45)$$

При визначенні величини $U_{ке\max}$ звичайно приймають $U_{ке\max} \approx U_{ж}$. Обираємо транзистор за максимально припустимими параметрами, передбачивши запас за напругою приблизно в $1,5 \div 2$ рази:

$$I_{к\text{ доп}} > I_{к\max}; \quad U_{к\text{ доп}} \approx (1,5 \div 2)U_{ке\max},$$

де $I_{к\text{ доп}}$, $U_{к\text{ доп}}$ – відповідно максимально припустимі струм колектора та зворотна напруга на колекторі.

Струм транзистора $I_{к\max}$ в режимі насичення має бути на 1–2 порядки більше зворотного струму колекторного переходу $I_{к0\max}$. Варто уникати створення надмірних запасів за напругою та струмом. Використання потужних транзисторів при малих робочих струмах призводить до зниження стабільності їхньої роботи в діапазоні температур. Для підсилювача, що працює при температурі до 70°C , застосовуються германієві, а при температурі $100\text{--}120^\circ\text{C}$ – кремнієві транзистори.

Якщо поставленим вимогам задовольняють кілька типів транзисторів, то необхідно вибирати тип, що має найбільше значення h_{21e} й найменше $I_{к0}$.

Далі визначаємо струм бази транзистора VT_2 на межі насичення:

$$I_{бн} = \frac{(1 + \delta_{U_{ж}}) U_{ж}}{(1 - \delta_{R_{н}}) R_{н} h_{21ep}}, \quad (46)$$

де h_{21ep} – розрахунковий коефіцієнт підсилення струму бази в режимі насичення; $\delta_{U_{ж}}$, $\delta_{R_{н}}$ – сумарне відхилення $U_{ж}$ та $R_{н}$ від номінальних значень.

Згідно з [3]:

$$h_{21ep} = h_{21emin} \cdot k_{\Theta} \cdot k_c \cdot k_i, \quad (47)$$

де h_{21emin} – мінімальне значення h_{21e} (з довідника) при $\Theta = 20^\circ\text{C}$ і визначеному значенні струму колектора; k_{Θ} – коефіцієнт, що враховує зміну h_{21e} при зміні

температури; k_c – коефіцієнт, що враховує зміну h_{21e} через старіння транзистора; k_i – коефіцієнт, що враховує зміну h_{21e} при відхиленні струму колектора від величини, що наведена у довіднику.

Коефіцієнт k_Θ визначається довідковими даними. Якщо такі відсутні, можна приблизно прийняти $k_\Theta = 0,6$ при $\Theta = -40^\circ\text{C}$ і $k_\Theta = 1,2$ при $\Theta = 50^\circ\text{C}$.

Коефіцієнт старіння k_c відповідно до рекомендацій центрального бюро застосування й нормалізації напівпровідникових приборів приймається 0,7.

Значення k_i визначається за довідковими даними.

Для надійного насиченого стану транзистора опір резистора R_k визначають за формулою

$$R_k = \frac{e_k}{k_H \cdot I_{\text{бн}}}, \quad (48)$$

де $k_H = I_{\text{б}}/I_{\text{бн}}$ – коефіцієнт насичення, що характеризує ступінь насичення транзистора; $I_{\text{бн}}$ – струм бази, що відповідає межі насичення транзистора

Завдання розрахунку полягає в забезпеченні в колі керування тиристора значень U_k ; I_y , що гарантують надійне вмикання тиристора VS :

$$I_{\text{ув}} < I_y < I_{y \text{ max}}; U_{\text{кв}} < U_k < U_{\text{к max}}. \quad (49)$$

Для керуючого кола тиристора справедливі наступні співвідношення:

$$U_{\text{ж}} = I_{y \text{ max}} R_{\text{к1}}; \quad (50)$$

$$U_{\text{ж}} = U_{\text{к max}} + I_{\text{ув}} R_{\text{к1}}; \quad (51)$$

$$U_{\text{ж}} = U_{\text{кв}} + I_{\text{ув}} R_{\text{к1}}. \quad (52)$$

З виразів (49–52) отримаємо:

$$R_{\text{к1}} > \frac{U_{\text{ж}}}{I_{y \text{ max}}}; \quad (53)$$

$$R_{\text{к1}} > \frac{U_{\text{ж}} - U_{\text{к max}}}{I_{\text{ув}}}.$$

З виразів (49) і (52) необхідно:

$$R_{к1} < \frac{U_{ж} - U_{кв}}{I_{ув}}. \quad (54)$$

Тоді $R_{к1}$ визначається одною з нерівностей:

$$\frac{U_{ж}}{I_{у\max}} < R_{к1} < \frac{U_{ж} - U_{кв}}{I_{ув}};$$
$$\frac{U_{ж} - U_{к\max}}{I_{ув}} < R_{к1} < \frac{U_{ж} - U_{кв}}{I_{ув}}. \quad (55)$$

Контрольні запитання

1. Наведіть схеми та поясніть принцип дії підсилювальних каскадів?
2. Який вигляд має вольт-амперна характеристика біполярного транзистора, що включено за схемою зі спільним емітером?
3. Опишіть характеристику керування однокаскадного підсилювального каскаду, який виконаний за схемою зі спільним емітером. Які переваги має схема зі спільним емітером?
4. Який стан транзистора називається активним, який – насиченням, який – відсіканням?
5. Які значення основних параметрів транзистора відповідають межам насичення і відсікання?
6. У якому режимі роботи однокаскадний підсилювач називають безконтактним ключем?
7. Які вихідні дані потрібні для розрахунку реле? Що потрібно визначити?
8. Як визначити напругу живлення, напругу базового зміщення, тип вхідного транзистора?
9. Як визначити опір кола керування?
10. Як здійснюється регулювання параметрів спрацьовування та відпускання безконтактного напівпровідникового реле?

4. РОЗРАХУНОК РЕЛЕЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ НА ТИРИСТОРАХ

4.1. Для тиристорного регулятора постійного струму (рис. 4, 16) визначити ємність комутуючого конденсатора для надійної комутації струму навантаження I_H , якщо конденсатор заряджається через активний опір, навантаження абсолютно активне, напруга джерела живлення $U_{ж}$, час вимикання тиристора $\tau_{вим}$. Вихідні дані для розрахунку наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Вихідні дані до розрахунку

Варіант	Напруга джерела живлення $U_{ж}$, В	Струм навантаження I_H , А	Час вимикання тиристора $\tau_{вим}$, мкс
1	60	10	30
2	127	20	40
3	220	30	50
4	380	40	60
5	110	50	70
6	160	60	80
7	400	70	90
8	500	80	100
9	180	90	110
10	600	100	65

4.2. У схемі плавного регулювання середньої напруги в навантаженні (рис. 13) знайти опір баластового резистора параметричного стабілізатора напруги на стабілітроні VD_1 [5]. Вихідні дані для розрахунку наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Вихідні дані до розрахунку

Варіант	Напруга на вході $U_{вх}$, В	Напруга на виході $U_{вих}$, В	Опір навантаження R_H , Ом
1	220	150	5000
2	110	60	1000
3	440	180	4000
4	36	15	500
5	24	10	400
6	18	7	600
7	63	24	900
8	48	18	800
9	150	40	500
10	220	120	7500
11	440	130	8000
12	30	12	2500

4.3. Найпростіший генератор імпульсів зібраний на диністорі (див. рис. 11, б). Джерело живлення має напругу E . Необхідна частота проходження вихідних імпульсів f_i . Навести схему генератора. Розрахувати опір R_1 та ємність конденсатора C . Вихідні дані для розрахунку наведені в табл. 4.

Таблиця 4 – Вихідні дані до розрахунку

Варіант	Напруга джерела живлення E , В	Частота проходження вихідних імпульсів f_i , Гц	Тип диністора
1	60	50	КН102А
2	100	100	КН102Б
3	120	150	КН102В
4	80	200	КН102Г
5	140	250	КН102Д
6	160	300	КН102Ж
7	220	250	КН102И
8	60	200	КН102А
9	80	150	КН102Б
10	100	100	КН102В

4.4. В однопівперіодному регуляторі середньої напруги в навантаженні (рис. 21) визначити середнє $I_{VS_{\text{ср}}}$ й максимальне $I_{VS_{\text{max}}}$ значення струму через тиристор, максимальну зворотну напругу на тиристорі $U_{зв\text{ max}}$, коефіцієнт трансформації $k_{\text{тр}}$, якщо на навантажувальному резисторі з опором $R_H = 3 \text{ кОм}$ середнє значення випрямленої напруги $U_d = 180 \text{ В}$. Напруга мережі $U_1 = 220 \text{ В}$. Опір вентилля в прямому напрямку й величину зворотного струму вважати рівними нулю.

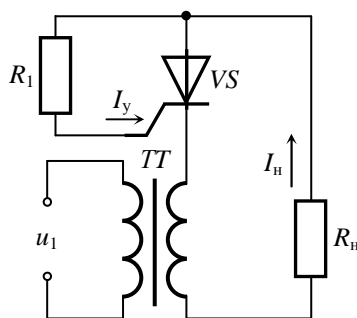


Рисунок 21 – Схема однопівперіодного регулятора середньої напруги в навантаженні

Приклад розрахунку

Основною характеристикою напруги в навантаженні є його середнє значення U_d . Середнє значення напруги (або струму) за період повторюваності дорівнює висоті прямокутника, площа якого дорівнює площі, обмеженою кривою

напруги (див. рис. 8). У розглянутій схемі період повторюваності вихідної напруги дорівнює 2π , тому

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} U_{dm} \sin \Theta d\Theta = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} E_2 \sin \Theta d\Theta = \frac{2\sqrt{2}}{2\pi} E_2 = 0,45 E_2, \quad (52)$$

де $U_{dm} = E_{2m} = \sqrt{2} E_2$; U_{dm} – амплітудне значення напруги в навантаженні; E_{2m} – амплітуда ЕРС вторинної обмотки трансформатора TT ; E_2 – діюче значення ЕРС вторинної обмотки трансформатора.

Максимальна зворотна напруга на тиристорі:

$$U_{зв\ max} = E_{2m} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} E_2 = \pi U_d. \quad (53)$$

Відповідь: $I_{VScp} = 60\text{ мА}$; $I_{VS\ max} = 188\text{ мА}$; $U_{зв\ max} = 565\text{ В}$; $k_{тр} = 1,82$.

4.5. Визначити параметри симістора та залежність діючої напруги в навантаженні від величини кута керування однофазного регулятора змінної напруги (див. рис. 17) на симісторі.

Вихідні дані для розрахунку наведені в табл. 5.

Таблиця 5 – Вихідні дані для розрахунку регулятора змінної напруги на симісторі

Вариант	Напруга живлення силового кола $U_{ж}$, В	Частота мережі живлення $f_{ж}$, Гц	Опір навантаження $R_{н}$, Ом	Кут керування α , град	Напруга кола керування $U_{у}$, В
1	127	50	6,3	10	9
2	220	50	10	20	12
3	380	50	18	35	15
4	660	50	30	40	17
5	127	50	3,1	50	9
6	220	50	5,1	65	10
7	380	50	9,1	70	12
8	660	50	15	80	17
9	220	50	4,7	95	9
10	380	50	8,2	100	12

Приклад розрахунку

Вихідні данні: $U_{ж} = 380\text{ В}$; $f_{ж} = 50\text{ Гц}$; $R_{н} = 7,5\text{ Ом}$; $\alpha = 45^\circ$; $U_{к} = 12\text{ В}$.

Порядок розрахунку

Знайдемо необхідні значення параметрів симістора:

- амплітуда напруги на симісторі

$$U_m = \sqrt{2}U_{ж}k_3 = \sqrt{2} \cdot 380 \cdot 1,25 = 671,75 \text{ В},$$

де $k_3 = 1,25$ – коефіцієнт запасу, що враховує можливі перенапруги в мережі;

- діюче значення струму через симістор

$$I_S = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \left(\frac{\sqrt{2}U_{ж}}{R_H} \right)^2 \sin^2 \Theta d\Theta} = \frac{U_{ж}}{R_H} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}};$$

$$I_S = \frac{380}{7,5} \sqrt{1 - \frac{1}{4} + \frac{1}{2\pi}} = 50,67 \sqrt{0,909} = 48,31 \text{ А};$$

- амплітудне значення струму через симістор

$$I_m = \frac{\sqrt{2}U_{ж}}{R_H} = \frac{\sqrt{2} \cdot 380}{7,5} = 71,65 \text{ А}.$$

Знайдемо вираз для розрахунку залежності діючої напруги в навантаженні у функції кута керування симістором:

$$U_H(\alpha) = I_S(\alpha) \cdot R_H = U_{ж} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}. \quad (54)$$

Для $\alpha = 45^\circ$ маємо

$$U_H = 48,31 \cdot 7,5 = 362,325 \text{ В}.$$

За формулою (54) розраховуємо залежність діючої напруги в навантаженні регулятора в функції кута керування. Результати розрахунку заносимо до табл. 6 та будуємо графік – рис. 22.

Таблиця 6 – Результати розрахунку діючої напруги

Кут керування α , град	0	30	60	90	120	150	180
Діюча напруга в навантаженні U_H , В	380	374,48	340,84	268,7	168	64,6	0
Відносне значення $\frac{U_H}{U_{ж}}$	1	0,985	0,897	0,707	0,442	0,17	0

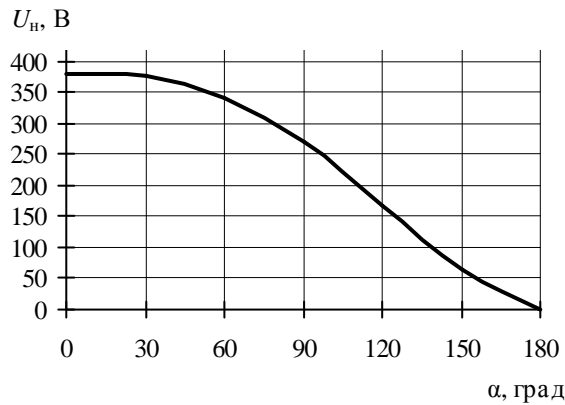


Рисунок 22 – Залежність діючої напруги в навантаженні у функції кута керування

4.6. У двопівперіодному регуляторі середньої напруги в навантаженні на тиристорах (рис. 23) необхідно отримати напругу $U_{d\alpha} = 71,5 \text{ В}$. Визначити кут зміщення фази α між напругами живлення й керування (див. рис. 8), а також коефіцієнт трансформації трансформатора $k_{\text{тр}}$, якщо відомо, що $U_1 = 127$, а припустима зворотна напруга на тиристорі $U_{\text{зв max}} = 300 \text{ В}$.

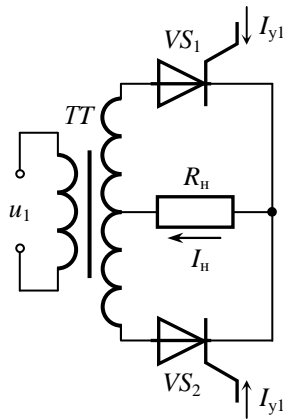


Рисунок 23 – Двопівперіодна схема плавного регулювання середньої напруги в навантаженні

Середнє значення напруги в розглянутій схемі

$$U_{d\alpha} = U_{d0} \frac{1 + \cos \alpha}{2}, \quad (55)$$

де U_{d0} – середнє значення напруги в навантаженні при $\alpha = 0^\circ$ (рис. 21).

Відповідь: $\alpha = 60^\circ$, $k_{\text{тр}} = 1,67$.

4.7. Чи можна регулювати вихідну напругу однофазного регулятора зміною амплітуди керуючих імпульсів?

4.8. Як повинна змінюватися частота комутації, щоб на виході однополярного імпульсного регулятора пульсація струму залишалася постійною? Визначити максимальну й мінімальну частоти комутації.

4.9. Чи можливо керувати роботою комутатора на тиристорах магнітним полем постійного магніту? Якщо ні, то чому, якщо так, то яким чином?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Серета О.Г. Безконтактні елементи автоматики в електрообутовій техніці [Текст] : навч. посібник / О.Г. Серета. – Х.: НТУ „ХПІ”, 2008. – 224 с.
2. Полупроводниковые приборы: Транзисторы: справочник / В.А. Аронов, А.В. Баюков, А.А. Зайцев и др.; под ред. Н.Н. Горюнова. – М.: Энергоиздат, 1982. – 904 с.
3. Шопен Л.В. Бесконтактные электрические аппараты автоматики. Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Электрические аппараты» / Л.В. Шопен. – М.: Энергия, 1976. – 568 с.
4. Долбня В.Т. Електроніка і мікросхемотехніка: Навч. посібник / В.Т. Долбня, Ю.Д. Сакара Ю.Д., Т.В. Миланіч – Х.: НТУ „ХПІ”, 2006. – 204 с.
5. Полупроводниковые приборы: Диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы: справочник / А.В. Баюков, А.Б. Гитцевич, А.А. Зайцев и др.; под общ. ред. Н.Н. Горюнова. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 744 с.