15 ВИПРЯМЛЯЧІ ЗМІННОГО СТРУМУ

15.1 Загальні відомості про випрямлячі та їх призначення.

Випрямляч – напівпровідниковий перетворювач енергії, призначений для перетворення електричної енергії змінного струму на енергію постійного струму. Випрямляч використовується тоді, коли для живлення споживача постійного струму необхідно використати енергію з джерела змінного струму (промислової або побутової мережі змінного струму). У такому випадку випрямляч вмикають між джерелом змінного струму та споживачем постійного струму. Випрямлячі використовуються в блоках живлення комп'ютерів, агрегатах безперебійного живлення, зарядних пристроях для мобільних телефонів та ноутбуків, на перетворювальних підстанціях електричного транспорту, в електроприводах постійного струму, різноманітних електронних схемах.

Рисунок 15.1 – Зварювальний випрямляч ВД-502 на 80-500А

Рисунок 15.2 – Залізничний випрямляч з вихідною напругою 24 В

Випрямлячі характеризуються:

- **кількістю фаз джерела живлення**: однофазного і трифазного струму;

- **випрямленою напругою** – середня за період напруга на навантаженні (див. рис. 15.3);

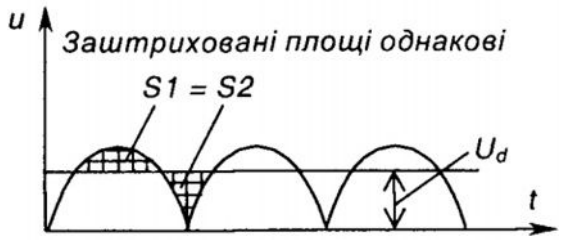

Рисунок 15.3 – Ілюстрація середнього значення напруги

– **частотою пульсацій**. Якщо період випрямленої напруги дорівнює періоду напруги мережі, то випрямляч називають **однопівперіодним**. Якщо частота пульсацій вдвічі більша за частоту напруги мережі, то випрямляч називають **двопівперіодним** (рис. 15.4);

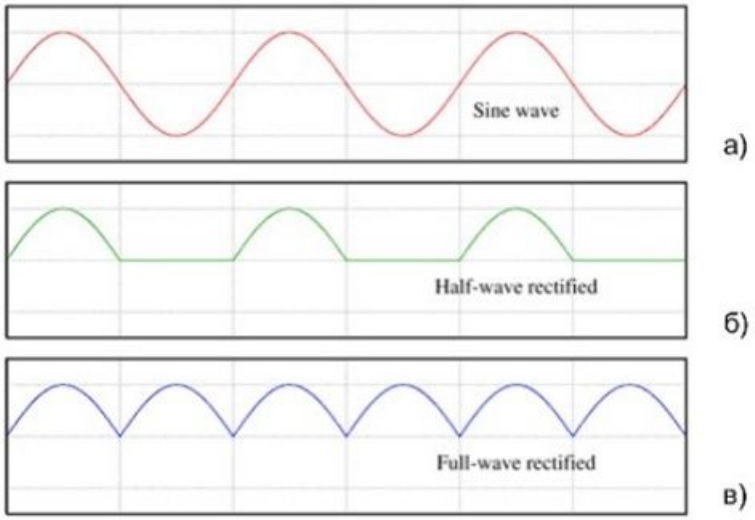

Рисунок 15.4 –До пояснення частоти пульсацій: вхідна синусоїдна напруга (а); однопівперіодне випрямлення (б); двопівперіодне випрямлення (в)

- схемою вмикання вентилів і схеми з'єднання обмоток трансформатора: одно- та двохтактні. Однотактні – у яких через вторинні обмотки трансформатора струм іде в одному напрямі. У таких схемах відношення частоти пульсації випрямленої напруги до частоти мережі – **кратність пульсації** $m = \frac{f_{пульсацій}}{f_{мереж}}$ – дорівнює кількості фаз вторинної обмотки трансформатора. Двохтактні – (мостові) у яких вторинний струм трансформатора протягом періоду змінює

напрям. Кратність пульсації в двохтактних схемах дорівнює подвійній кількості фаз;

- **наявністю регулювання**: некеровані (на діодах) і керовані (на тиристорах).

На рис. 15.5 наведена структурна схема випрямляча.

Рисунок 15.5 – Структурна схема випрямляча

Трансформатор призначений для перетворення значення напруги мережі промислової частоти до значення, необхідного для випрямлення. Трансформатор також забезпечує гальванічну розв’язку навантаження від мережі та перетворення кількості фаз мережі. Трансформатор не є обов'язковим елементом схеми випрямляча.

Вентильна схема – це основна ланка випрямляча, що забезпечує односпрямований струм у навантаженні, тобто напруга на виході вентильної схеми – пульсуюча однополярна. Сучасні вентильні схеми виконують на напівпровідникових приладах, раніше на електровакуумних і газорозрядних приладах.

Згладжуючий фільтр зменшує пульсації випрямленої напруги (струму) до значення, допустимого для роботи навантаження. Фільтруючий пристрій є фільтром нижніх частот. Розрізняють пасивні фільтри, що виконані на реактивних елементах (конденсаторах, дроселях), та активні фільтри, до складу яких входять транзистори, операційні підсилювачі та інші. Найпростіший варіант фільтра – це просто конденсатор.

Стабілізатор напруги підтримує напругу на навантаженні на незмінному рівні при змінах напруги мережі, температури навколишнього середовища,

навантаження у заданих межах. Найпростіший варіант стабілізатора – це просто стабілітрон.

Для забезпечення нормальної роботи джерела вторинного електроживлення до складу випрямлячів, окрім основних блоків, входять інші блоки, які забезпечують надійну роботу пристрою: вузли контролю і діагностики працездатності, вузли захисту від короткого замикання, перенавантаження або зниження напруги мережі. У складі керованих випрямлячів обов'язково **є схема керування.**

Перевагами **лінійних джерела електроенергії** є простота побудови і обслуговування під час експлуатації, надійність та низький рівень високочастотних шумів.

До недоліків відносяться:

- порівняно велика вага і габарити, особливо для потужних джерел, через наявність силового трансформатора, що працює на промисловій частоті, та згладжувального фільтра;

- низький ККД і необхідність резервування потужності практично у всіх елементах пристрою, тобто потрібна установка компонентів, що допускають більші навантаження, ніж номінальні для джерела у цілому. Причиною цього є розсіювання деякої потужності на регулюючому елементі стабілізатора напруги. Чим більша різниця між вхідною і вихідною напругами, тим більшу потужність необхідно розсіювати у вигляді теплоти на стабілізуючому елементі, що іноді вимагає використання радіаторів.

15.2 Однофазні випрямлячі змінного струму

Однофазні випрямлячі – це перетворювачі однофазної змінної напруги на знакопостійну пульсуючу напругу. Однофазними зазвичай виконують мікро- і малопотужні випрямлячі. **Некеровані** випрямлячі живлять пристрої навантаження напругою, середнє значення якої не можна змінювати без конструктивних змін самого випрямляча. Вентильні схеми таких випрямлячів побудовані на діодах без схеми керування. Як приклад, на рис. 15.6 наведена діаграма роботи лінійного випрямляча від промислової мережі.

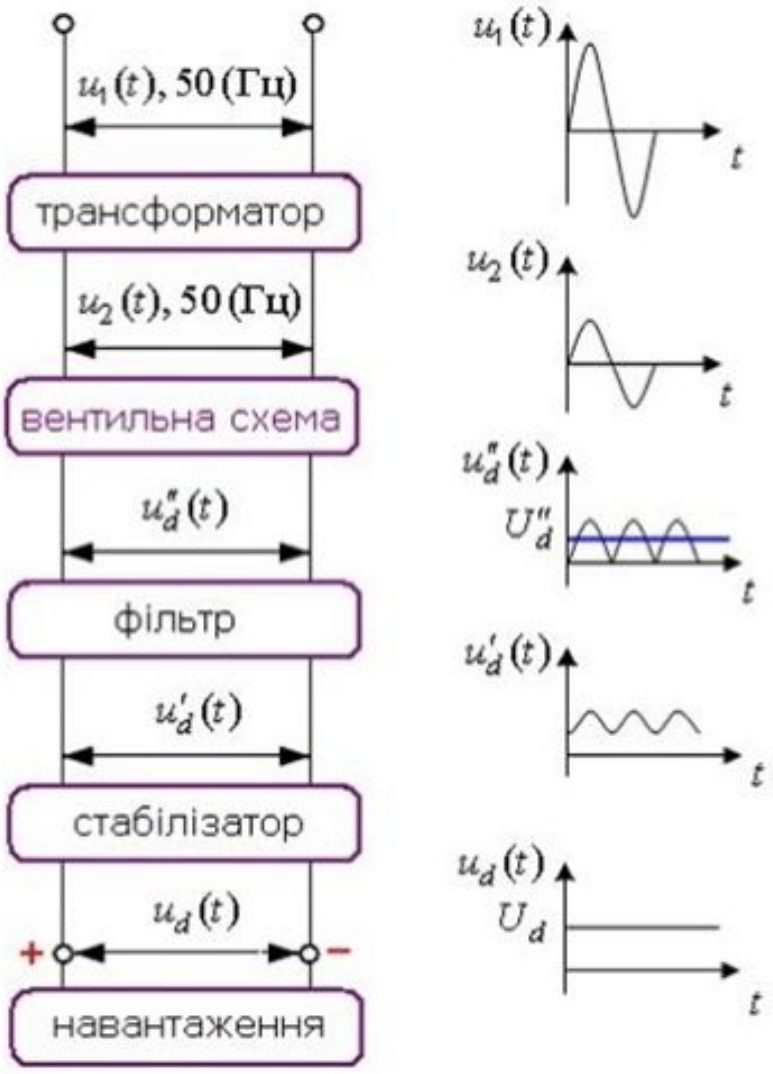

Рисунок 15.6 – Робота однофазного низькочастотного лінійного випрямляча

Напруга однофазної мережі живлення $u_1(t)$ подається на первинну обмотку трансформатора. Напруга на вторинній обмотці $u_2(t)$ має таку саму синусоїдну форму і частоту 50 Гц, але іншу діючу величину U_2, яка залежить від коефіцієнта трансформації $k_т$. Саме від величини U_2 залежить величина постійної напруги на навантаженні. При приєднанні навантаження на виході вентильної схеми напруга $u''_d(t)$ має пульсуючу форму середньою величиною U_d. Струм, який протікає через навантаження, та напруга, прикладена до нього, позначаються **d** (від англ. Direct – постійний). Форма випрямленої напруги може згладжуватися за допомогою фільтра, який виділяє постійну складову із знакопостійної пульсуючої напруги. Фільтри застосовують у тих випадках, коли пульсації напруги на виході вентильної схеми перевищують допустимі для даного навантаження. Напруга на виході фільтра $u'_d(t)$ більш наближена до постійної. На виході схеми зазвичай

вмикають стабілізатор, який зменшує амплітуду пульсацій і забезпечує стабільність вихідної напруги $u_d(t)$ (струму) випрямляча у випадку зміни (у певних межах) навантаження, напруги мережі, температури.

Найпростіший з вентилів **– діод** – є некерованим. Він має два виводи (анод А та катод К, див. рис. 15.7) та може проводити струм лише в одному напряму – від аноду до катоду. Якщо до аноду прикласти додатний потенціал, а до катоду – від'ємний (див. рис. 15.7,а), діод буде відкритий та через нього протікатиме струм. Якщо поміняти напрям вмикання діода (див. рис. 15.7,б) або джерела живлення *U*, діод буде закритий та струм буде відсутній. Будемо вважати, що діод – ідеальний вентиль (тобто його внутрішній опір у відкритому стані дорівнює нулю, а у закритому – незкінечності). Графічне позначення діода на електричних схемах схоже на стрілку, яка показує єдиний можливий напрямок протікання струму. Аби відрізнити на схемі один діод від інших, поряд із їх графічним позначенням пишуть букви *VD* та поточний номер діода (наприклад, *VD1*).

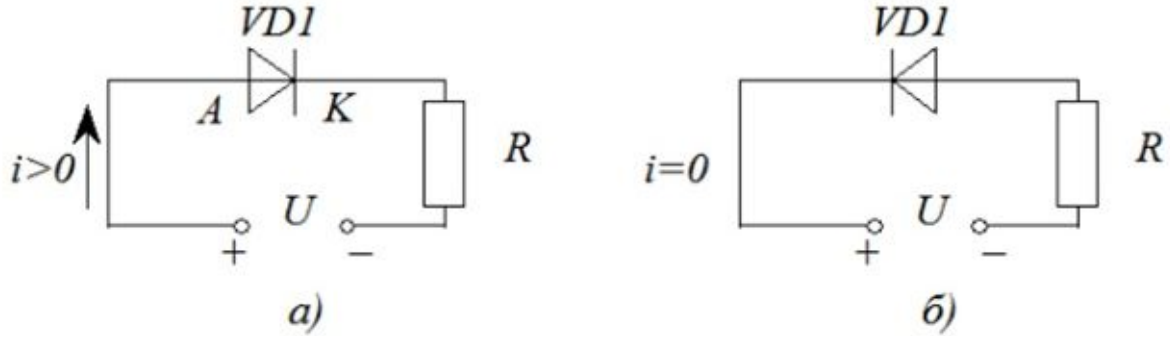

Рисунок 15.7 – Способи вмикання діода (а – прямий, б – зворотній)

Конструкція діодів малої потужності показана на рис. 15.8. У верхнього діода (потужнішого за нижні) катод розташований з лівого боку. Знизу зображено діодний місток.

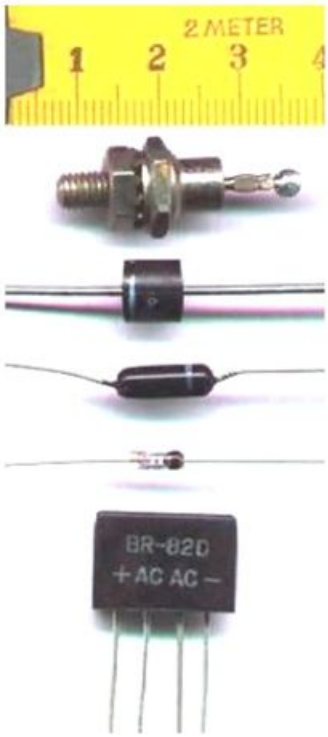

Рисунок 15.8 –Діоди

Більш потужні діоди та тиристори зображено на рис.15.9. Катод звичайно має різьбу, якою закріплюється на охолоджувачі, анод – гнучкий вивід. Найбільш потужні прилади мають таблеткову конструкцію (див. нижню частину рис. 15.9), яка забезпечує відвід тепла назовні від обох торців (праворуч на рис. 15.13). Охолоджувачі (рис. 15.13), відводячи тепло від вентиля, запобігають їх перегріванню.

Рисунок 15.9 – Потужні діоди та тиристори

Найпростіший випрямляч складається лише з одного діода. Будемо вважати, що навантаження випрямляча – споживач із суто активним внутрішнім опором *R*. Діод відкритий лише тоді, коли до анода прикладається позитивний потенціал (напруга джерела позитивна, перший півперіод на рис. 15.10,б).

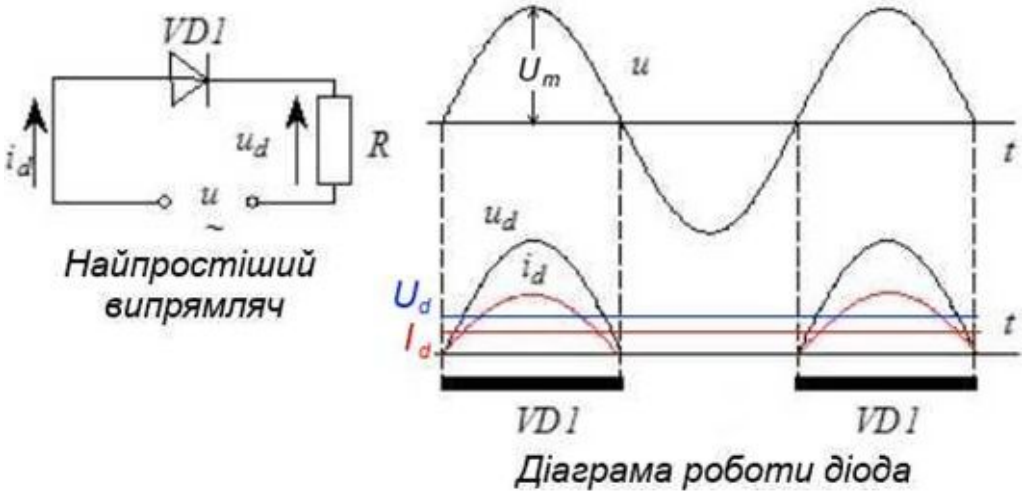

Рисунок 15.10 – Процеси у найпростішому випрямлячі

До навантаження через відкритий діод подається напруга від джерела. Струм, який протікає через коло «джерело *u*– діод – навантаження» у випадку суто активного навантаження повторює за формою напругу $i_d = \frac{u}{R}$. Тому із зменшенням напруги до нуля зникає і струм, а діод закривається. На наступному півперіоді, коли напруга джерела від'ємна, струм відсутній, напруга на навантаженні дорівнює нулю. Після того, як напруга джерела знову стає позитивною, відкривається діод, і до навантаження знову прикладається напруга. Таким чином, завдяки випрямлячеві напруга на навантаженні (**випрямлена напруга**) u_d містить у собі лише позитивні півперіоди напруги живлення *u*, а **випрямлений струм** i_d повторює за формою випрямлену напругу. У нижній частині рис. 15.10,б зображена діаграма роботи діода (чорна лінія показує інтервали часу, коли діод відкритий).

Така схема використовується лише для живлення споживачів малої потужності (до 100 Вт). Більш розповсюджена мостова схема (рис.15.11,а).

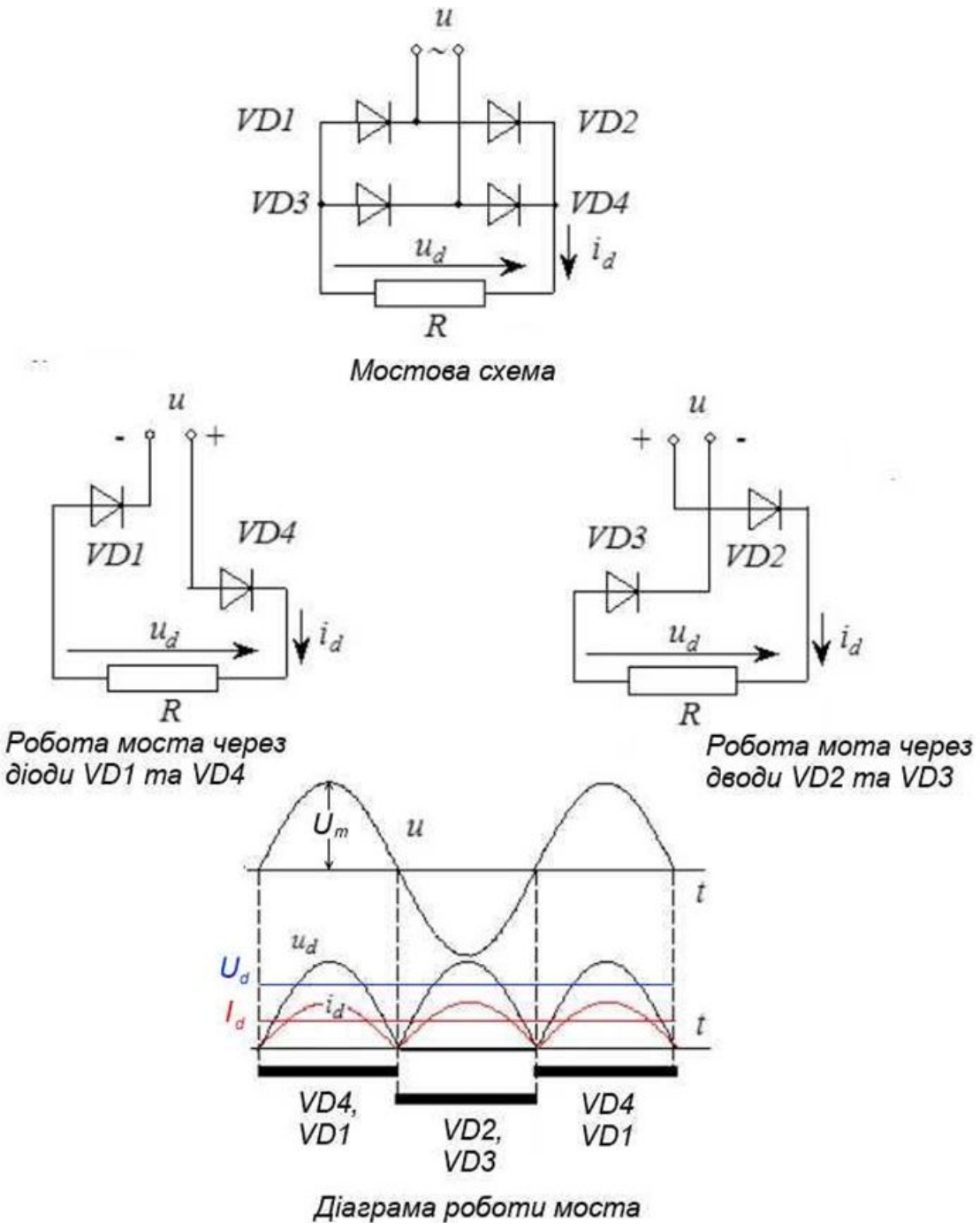

Рисунок 15.11 – Мостовий випрямляч

До її складу входять чотири діоди, які працюють попарно-почергово. На першому півперіоді живильної напруги (права клема джерела має позитивний потенціал) відкриті діоди *VD1* та *VD4*, утворюється шлях протікання струму, зображений на рис. 15.11,б. До навантаження прикладається позитивна напруга. На другому півперіоді відкриті *VD2* та *VD3*, а струм протікає, як показано на рис. 15.11,в (у навантаженні – у тому ж напрямку). До навантаження знову прикладена позитивна напруга. Випрямлені напруга та струм у часі змінюються згідно рис. 15.11,г. Оскільки обидва півперіоди напруги живлення є робочими, середнє

значення випрямленої напруги вдвічі більше порівняно зі схемою рис. 15.10,а. Мостові діодні випрямлячі невеликої потужності випускають у вигляді так званих «діодних містків» (див. рис. 15.8 знизу).

Тиристор є керованим вентилем. Окрім анода та катода, він має третій вивід (керуючий електрод КЕ на рис 15.12). Він також проводить струм лише в одному напрямку (від анода до катода). Для його відкривання необхідно, щоб одночасно виконувалися дві умови:

1) до анода подавався додатній відносно катода потенціал (як для діода);

2) в колі між керуючим електродом та катодом протікав струм керування i_k, в напрямку як показано на рис. 15.12,а.

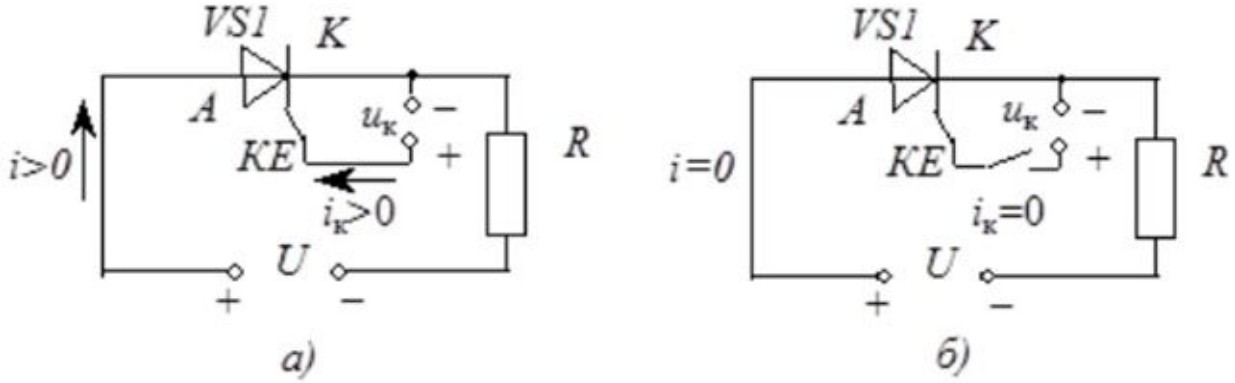

Рисунок 15.12 – Два стани тиристора (а – відкритий та б – закритий)

Рисунок 15.13 – Тиристори з охолоджувачами

Для протікання струму керування використовують додаткове джерело напруги керування u_K. Величина струму керування набагато менша, ніж струм між анодом та катодом (тобто силового струму). Якщо коло керуючого електрода розімкнути (як на рис. 15.12,б), струм керування буде відсутній, і тиристор не відкриється. Графічне позначення тиристора подібне до позначення діода, проте

має третій вивід КЕ. Нумерацію тиристорів на схемах здійснюють із використанням букв VS. Завдяки наявності керуючого електрода тиристор стає керованим вентилем. Він відкриється лише тоді, коли буде виконана не лише перша умова, а й друга. Тому струм керування можуть подавати не одразу після виконання першої умови, а дещо пізніше. Цей струм подається від спеціальної системи керування.

Тиристор має одну особливість: він відкривається за допомогою керуючого електрода, але закривається лише тоді, коли струм між анодом та катодом зникне. За допомогою керуючого електрода тиристор закрити неможливо. Тому тиристор іноді називають напівкерованим вентилем.

Якщо потрібно не тільки випрямляти напругу, а й змінювати її середнє значення (для регулювання зварювального струму, швидкості електродвигуна), замість діодів у випрямлячах використовують тиристори (рис. 15.14,а). Якщо тиристори отримують струм керування одразу, коли напруга на їх анодах стає додатною, тиристори працюють як діоди, і процеси протікання струму в схемі нічим не відрізняються від розглянутих раніше. Якщо ж затримати подачу струму керування, тиристори відкриються пізніше (на рис. 15.14,б – після закінчення **часу затримки** $t_З$). Доки тиристори закриті, струм відсутній, і напруга до навантаження не прикладається. З кривої випрямленої напруги «вирізається» певна ділянка, і середнє цієї значення напруги зменшується. Чим більша затримка $t_З$, тим менша середня випрямлена напруга.

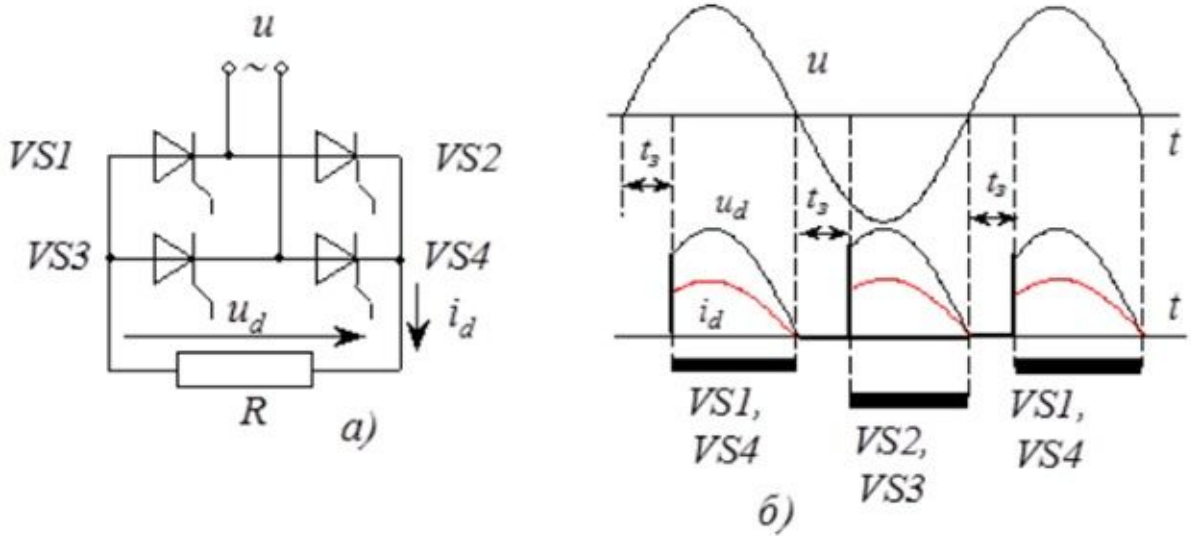

Рисунок 15.14 – Тиристорний мостовий випрямляч

Тиристорні випрямлячі використовуються в електроприводах постійного струму для живлення обмоток якоря та збудження електродвигунів постійного струму. На рис. 15.15 показаний зовнішній вигляд подібного електропривода. Окрім суто випрямляча, до його складу входять мікропроцесорні системи керування тиристорами та швидкістю і моментом електричного двигуна, дисплей та пульт керування для діалогу з користувачем, а також додаткові елементи, які забезпечують функціонування електропривода.

Рисунок 15.15 – Сучасний електропривод постійного струму на базі тиристорного випрямляча

Випрямлячі великої потужності розташовуються в електричних шафах (рис. 15.16).

Рисунок 15.16 – Потужний випрямляч