

**Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»**



Кафедра електроенергетики

**СУЧАСНА ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА.
КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

Дніпро
2022

Рекомендовано до видання навчально-методичним відділом (протокол № __ від _____) за поданням методичної комісії спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (протокол № 22/23-04 від 23.12.22).

Рогоза М.В.

Сучасна перетворювальна техніка. Конспект лекцій для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / М.В. Рогоза, Н.Ю. Рухлова, Є.В. Кошеленко, В.А. Бородай; Нац. техн. ун-т. «Дніпровська політехніка». – Д.: НТУ «ДП», 2022. – 84 с.

Автори:

Рогоза М.В., канд. техн. наук, проф.;

Рухлова Н.Ю., канд. техн. наук, доц.;

Кошеленко Є.В., канд. техн. наук, доц.;

Бородай В.А., канд. техн. наук, доц.

Конспект лекцій призначено для підготовки студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», які здобувають кваліфікаційний рівень магістра.

Дані матеріали стануть у пригоді під час підготовки до модульного контролю за результатами із вибіркової дисципліни «Сучасна перетворювальна техніка».

Досліджено будову, характеристики, принципи роботи та галузь застосування елементів сучасної перетворювальної техніки, що використовується в електроенергетиці.

Конспект лекцій орієнтовано на активізацію виконавчого етапу навчальної діяльності студентів.

Зміст

Вступ.....	4
Глава 1. Загальні відомості.....	5
1.1. Загальні питання сучасної перетворювальної техніки.....	5
1.2. Деякі методи аналізу перетворювальних пристроїв.....	6
Глава 2. Випрямлячі.....	10
2.1. Загальні відомості	10
2.2. Основні схеми випрямлення.....	11
2.3. Гармонічні складові випрямленої напруги та первинних струмів в схемах випрямлення.....	22
2.4. Зовнішні характеристики випрямлячів.....	26
2.5. Аварійні режими роботи і захист випрямлячів.....	27
Глава 3. Згладжувальні фільтри на RLC пасивних елементах.....	31
3.1. Індуктивний фільтр.....	31
3.2. Ємнісний фільтр.....	32
3.3. Г-подібний фільтр.....	33
3.4. П-подібний фільтр.....	33
3.5. Резонансні фільтри.....	34
Глава 4. Інвертори.....	36
4.1. Інвертори, ведені мережею.....	36
4.2. Автономні інвертори.....	39
4.3. Перетворювачі частот.....	45
Глава 5. Імпульсні перетворювачі змінної та постійної напруги.....	50
5.1. Широтно-імпульсні перетворювачі постійної напруги.....	52
5.2. Широтно-імпульсні перетворювачі змінної напруги.....	57
Глава 6. Схемні реалізації напівпровідникових обмежувачів струмів короткого замикання.....	68
6.1. Особливості напівпровідникових обмежувачів струмів КЗ.....	68
6.2. Розробки напівпровідникових обмежувачів струму короткого замикання останніх років.....	71
6.3. Практичні випробування напівпровідникових обмежувачів струму короткого замикання.....	74
Висновки.....	82
Літературні джерела інформації.....	83

Вступ

Дисципліна «Сучасна перетворювальна техніка» формує систему знань в області електроенергетики, що дозволяє визначати варіанти підвищення енергоефективності експлуатації електроенергетичного, електротехнічного та електромеханічного обладнання й відповідних комплексів і систем.

Головним завданням курсу є формування у студентів системного сприйняття знань в області експлуатації електрообладнання відповідних комплексів і систем:

- Знаходити варіанти підвищення енергоефективності експлуатації електроенергетичного, електротехнічного та електромеханічного обладнання й відповідних комплексів і систем.
- Реконструювати існуючі електричні мережі, станції та підстанції, електротехнічні і електромеханічні комплекси та системи з метою підвищення їх надійності, ефективності експлуатації та продовження ресурсу.
- Здійснювати налагодження, оперативний контроль та підтримання у робочому стані систем автоматизації нижнього рівня, використовуючи спеціалізовані мови програмування.

Глава 1. Загальні положення

1.1. Загальні питання сучасної перетворювальної техніки

Силові напівпровідникові перетворювальні пристрої призначені для перетворення електричного струму та напруги: змінного струму в постійний, постійного струму в змінний, змінного струму однієї частоти в змінний струм другої частоти, низької постійної напруги у високу постійну напругу та ін. Більше 35% генеруємої в Україні електричної енергії споживається в перетвореному вигляді – у вигляді постійного або змінного струму з частотою, що відрізняється від промислової (50 Гц). У діючий час спостерігається постійна тенденція подальшого зростання використання перетвореної електроенергії у багатьох областях техніки, де раніш використовувався виключно трифазний струм промислової частоти. Основними характеристиками перетворювальних пристроїв є коефіцієнт корисної дії, коефіцієнт потужності, масогабаритні показники та інші характеристики.

Сучасні напівпровідникові перетворювальні обладнання володіють високими регульовальними характеристиками та енергетичними показниками, мають малі габарити та масу, прості та надійні в експлуатації, забезпечують безконтактну комутацію струмів в (тиристри, силові транзистори). Такі прилади силових колах, а також регулювання струму і напруги.

Завдяки вказаним перевагам напівпровідникові перетворювальні пристрої отримують все більше застосування в різноманітних областях народного господарства.

Розробка нових напівпровідникових перетворювачів в більшості визначається успіхами в розвитку силових напівпровідникових приладів. Особлива увага приділяється розробці та удосконаленню потужних приладів, які працюють як перемикачі електричного струму (тиристри, силові транзистори). Такі прилади при малих внутрішніх втратах можуть управляти великими потужностями, що підводяться до навантаження, що відкриває широкі перспективи їх використання в різних областях техніки, де потребується високоефективне регулювання режимів роботи споживача.

В перетворювальній техніці знаходять широке застосування:

- ❖ випрямлячі, які перетворюють одно- чи трифазний змінний струм в постійний;
- ❖ інвертори, що перетворюють постійний струм в одно- чи трифазний струм незмінної чи регульованої частоти;
- ❖ перетворювачі частоти, що перетворюють одно- чи трифазний струми однієї частоти в одно- чи трифазні струми іншої частоти – незмінної чи регульованої;
- ❖ широтно-імпульсні перетворювачі постійної та змінної напруги, що перетворюють постійну або змінну напругу одного рівня в постійну або змінну напругу іншого рівня – незмінного чи змінного;

❖ перетворювачі числа фаз, що перетворюють одно- чи трифазний струм заданої частоти в три- або однофазний струм тієї ж частоти.

Напівпровідникові перетворювальні пристрої знаходять також широке застосування в якості безконтактної комутаційної апаратури та статичних регуляторів реактивної потужності.

1.2. Деякі методи аналізу перетворювальних пристроїв

Розглядаючи особливості та характеристики окремих складових елементів перетворювальних пристроїв, можна переконатися, що всі ці елементи характеризуються нелінійними вольт-амперними характеристиками (ВАХ). Тому аналіз і розрахунок таких пристроїв необхідно проводити на основі методів аналізу нелінійних електричних кіл, що пов'язано із значними математичними труднощами. Зазвичай рішення отримують з певними припущеннями відносно виду нелінійності характеристик. Крім того, при аналізі процесів зневажають деякими другорядними факторами, що не чинять особливого впливу на протікання електромагнітних процесів.

До основних, найбільш частіше використовуваних, методів аналізу силових кіл перетворювальних пристроїв відносяться:

- кусково-припасувальний метод;
- метод еквівалентних джерел;
- метод основної гармоніки;
- метод гармонічного аналізу;
- метод фазової плоскості;
- метод, заснований на використанні безперервного перетворення Лапласа;
- метод, заснований на складанні різницевих рівнянь і вирішення їх за допомогою дискретного перетворення Лапласа;
- метод перемикаючих функцій;
- метод змінних станів.

Кусково-припасувальний метод заснований на заміні реальної ВАХ нелінійного елемента характеристикою, що апроксимована кусково-лінійною функцією. Це дає можливість скласти для окремих інтервалів часу, відповідних роботі нелінійного елемента в лінійному режимі, лінійні диференціальні рівняння з постійними коефіцієнтами. При інтегруванні таких рівнянь постійні інтегрування визначають за допомогою умов безперервності струмів в індуктивностях і напруг в конденсаторах в моменти переходу з однієї лінійної ділянки на іншу.

Метод еквівалентних джерел. Закономірності змінень струмів і напруг в перетворювальних пристроях на окремих інтервалах як квазівстановленого так і

перехідного процесу можна визначити, замінивши перетворювач на основі теореми про еквівалентне джерело спрощеною схемою заміщення, яка складається з джерела ЕРС або джерела струму та лінійних елементів для кожного характерного інтервалу режиму перетворювача, що розглядається.

Такий підхід заснований на тому, що нелінійні елементи – напівпровідникові вентиля перетворювача – на підставі принципу компенсації замінюють еквівалентними джерелами ЕРС чи струму.

В результаті перетворювач можна представити у вигляді схеми, що складається з набору зовнішніх джерел і внутрішніх, які з'являються взамін вентилів. Причому закономірності змінності напруг останніх джерел повинні повторювати закономірності змінності напруг на вентилях перетворювача.

Метод основної гармоніки. В інженерних розрахунках перетворювальних пристроїв застосовується метод основної гармоніки, який полягає в тому, що з гармонічного складу еквівалентної несинусоїдальної ЕРС, що впливає, враховується тільки основна гармоніка. При цьому струми і напруги в еквівалентній схемі будуть синусоїдальними величинами, тому для розрахунку можуть бути використані відомі методи розрахунку кіл синусоїдального струму – такі як символічний метод, векторні діаграми, метод геометричних місць.

Метод основної гармоніки найбільш часто використовується при дослідженнях автономних інверторів струму. Інвертори струму мають практично синусоїдальну вихідну напругу. Похибка розрахунку отримується невелика.

Метод гармонічного аналізу. Несинусоїдальну періодичну функцію, що впливає, можна представити більш точно – у вигляді суми гармонічних складових. Розрахунок при цьому виконується так, як і розрахунок електричних лінійних кіл несинусоїдального струму.

Застосування безперервного перетворення Лапласу. За допомогою безперервного перетворення Лапласу рішення можна отримати як у розімкненій, так і у замкненій формі, у вигляді суми декількох складових частин. Безперервне перетворення Лапласу базується на формулі звернення Рімана-Мелліна та теоремі Коши про відрахування.

Дискретне перетворення Лапласу. Для перетворювальних пристроїв характерні режими, що визначаються впливом періодичних імпульсів на задане навантаження. В цьому випадку система реагує на ЕРС, що впливає протягом визначених інтервалів, які починаються в рівновідстаючі один від одного дискретні моменти часу. При вирішенні задач такого типу зручні методи аналізу кіл з решітчатими функціями, що впливають. Отримали назву D-перетворення та Z-перетворення.

Метод фазової площини. Одним з графічних методів аналізу перетворювальних пристроїв є метод фазової площини.

Цей метод дає можливість досліджувати процес, що описується диференціальними рівняннями першого чи другого порядку, представити у вигляді графіку на координатній площині x, y , де x – величина, що досліджується (відкладається по осі абсцис) наприклад струм i або напруга u , а $y = dx/dt$ – швидкість змінення величини, що досліджується (відкладається по осі ординат). Це будуть значення di/dt та du/dt .

Така координатна площина називається фазовою площиною. Точка на площині, що визначається миттєвими значеннями x та y у даний момент часу, називається точкою, що зображується.

Лінія, котру викреслює на фазовій площині точка, що зображує, при протіканні процесу у часі, називається фазовою траєкторією.

Вид фазової траєкторії залежить від параметрів, конфігурації кола та характеру нелінійності.

Метод фазової площини дає представлення о якісному характері процесу кола без повного рішення диференціальних рівнянь.

По сімейству фазових характеристик, або фазовому портрету процесу, можна судити про сталість чи несталість режиму, про екстремальні значення величини, що досліджується, та її похідної у перехідному режимі чи режимі, що установився, та ін.

Метод перемикаючих функцій. В перетворювальних пристроях силові напівпровідникові прибори виконують роль елементів, що перемикають. При низьких частотах перемикання час перемикання невеликий у порівнянні з проміжками між перемиканнями. Тому з метою спрощення аналізу, не роблячи великої похибки, час перемикання вважають рівним нулю. В результаті напруги і струми можуть описуватись стрибкоподібними функціями.

Стрибкоподібну функцію $f(t)_z$ можна розглядати як добуток безперервної функції $f(t)$ (на вході чи виході перетворювача) і одиничної стрибкоподібної функції, яку називають комутаційною або перемикаючою функцією $F_k(t)$.

Метод змінних станів. Цей метод дозволяє аналізувати перетворювальні пристрої як системи автоматичного керування з єдиних позицій у загальній формі. Переваги даного методу розкриваються більш повно при аналізі перетворювальних пристроїв за допомогою комп'ютерної техніки, коли можна використовувати кількісні методи рішення систем диференціальних рівнянь першого порядку, що приведені до нормальної форми.

Математичне моделювання перетворювальних пристроїв.

При проектуванні перетворювальних пристроїв за допомогою математичного моделювання необхідно виконати такі наступні операції:

1. скласти електричну схему заміщення перетворювального пристрою;

2. скласти систему диференційних рівнянь, які описують поведінку схеми заміщення;
3. диференційні рівняння перетворити до виду, зручного для їх рішення;
4. диференційні рівняння проінтегрувати (вирішити);
5. розрахувати по отриманим рішенням усі необхідні параметри та характеристики початкової схеми;
6. результати аналізу оптимізувати з метою приведення їх до заданих (оптимальних) значень шляхом варіації параметрів початкової схеми;
7. результати аналізу привести до форми, яка зручна для практичного використання (побудування таблиць, графіків тощо).

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Силові напівпровідники.
2. Призначення силових напівпровідникових перетворювальних пристроїв.
3. Назвіть основні характеристики силових напівпровідникових перетворювальних пристроїв.
4. Назвіть основні види силових напівпровідникових перетворювальних пристроїв.
5. Назвіть найбільш частіше використовуємі методи аналізу силових кіл перетворювальних пристроїв.
6. У чому полягає кусково-припасувальний метод аналізу силових кіл перетворювальних пристроїв.
7. У чому полягає метод еквівалентних джерел аналізу силових кіл перетворювальних пристроїв.
8. У чому полягає метод основної гармоніки аналізу силових кіл перетворювальних пристроїв.
9. У чому полягає метод перемикаючих функцій аналізу силових кіл перетворювальних пристроїв.

Глава 2. Випрямлячі

2.1. Загальні відомості.

Випрямляч – це пристрій, що призначений для перетворювання змінної напруги в постійну.

Основними елементами випрямляча є трансформатор та вентилі, за допомогою яких забезпечується одностороннє протікання струму в колі навантаження, в результаті чого змінна напруга перетворюється в пульсуючу.

Для згладжування пульсацій випрямленої напруги до вихідних затисків випрямляча підключають електричний згладжувальний фільтр. Для регулювання або стабілізації випрямленої напруги і струму споживача до його вхідних затисків підключають регулятор або стабілізатор. (стабілізатор може бути підключений і на стороні змінного струму випрямляча).

Основна задача теорії випрямних пристроїв зводиться до визначення розрахункових співвідношень, що дозволяють по заданому режиму роботи споживача визначити електричні параметри елементів стабілізатора, регулятора, фільтру, а також вентилів і трансформатора випрямляча і потім виробити вибір цих елементів по каталогу або, якщо це необхідно, розрахувати їх.

У випрямному режимі, що характеризується віддачею потужності в коло навантаження, напруга вторинної обмотки трансформатора і анодний струм вентилів мають однаковий напрям (це відповідає роботі мережі змінного струму в якості генератора енергії), а напруга і струм кола навантаження протилежні (це відповідає споживачеві електричної енергії).

Класифікація випрямлячів за потужністю і напругою досить умовна:

- - малопотужні – до 1 кВт; - низька до 250 В;
- - середньої потужності до 100 кВт; - середня до 1000 В;
- - потужні понад 100 кВт; - висока більше 1000 В;

По числу фаз первинної обмотки трансформатор випрямлячі поділяються на однофазні і трифазні. Незалежно від потужності випрямлячів всі схеми поділяють на однокатні та двукатні.

За схемою випрямлення поділяються на схеми з одним вентиляем; схеми з середньою точкою; мостові; багатofазні.

За способом регулювання (в залежності від призначення) випрямлячі поділяють на керовані і некеровані.

Керовані випрямлячі можуть мати:

- - регулювання на стороні змінного струму;
- - регулювання на стороні постійного струму;
- - регулювання безпосередньою дією на вентиляльні елементи.

Основними величинами, що характеризують експлуатаційні властивості випрямлячів, є:

1. середнє значення випрямленої напруги і струму U_d та I_d ;
2. коефіцієнт корисної дії χ ;
3. коефіцієнт потужності η ;
4. зовнішня характеристика, що являє собою залежність напруги на виході від струму навантаження, $U_d = f(I_d)$;
5. регульовальна характеристика, що являє собою залежність випрямленої напруги від кута управління $U_{d\alpha} = f(\alpha)$;
6. коефіцієнт пульсацій, що являє собою відношення амплітуди даної гармонічної складової випрямленої напруги (струму) к середньому значенню випрямленої напруги (струму):

$$K_n(q) = U_{m(q)} / U_d.$$

2.2. Основні схеми випрямлячів

Від схеми випрямлення залежать:

- - форма кривої випрямленої напруги;
- - форма кривої змінного струму, споживаного з живлячої мережі;
- - середні значення випрямленої напруги і струму U_d, I_d ;
- - зовнішня (або навантаження) характеристика, тобто залежність середнього значення випрямленої напруги U_d від середнього значення струму навантаження I_d ;
- - регульовальна характеристика, що представляє залежність випрямленої напруги від кута управління $U_{d\alpha} = f(\alpha)$;
- - коефіцієнт потужності випрямляча η ;
- - коефіцієнт корисної дії χ ;
- - коефіцієнт пульсацій, що представляє відношення амплітуди даною гармонійною складовою випрямленої напруги або струму до середнього значення випрямленого струму $K_n(q) = U_{m(q)} / U_d$.

Форма кривих випрямленої напруги характеризується їх гармонійним складом.

При порівнянні різних схем випрямлення використовують коефіцієнт схеми K_{cx} , що характеризує зв'язок в некерованих випрямлячах між значенням змінної напруги U_2 , що діє, поступає на вентильні елементи, і середнім значенням випрямленої напруги U_d : $K_{cx} = u_d / u_2$.

Основними елементами, параметри яких підлягають розрахунку в схемах випрямлення, є вентильні елементи і трансформатор. Вихідні дані: - випрямлена напруга U_d і струм I_d (або потужність P_d) – значення змінної напруги живлячої мережі, що діє.

Для вибору типу вентильного елемента необхідно визначити:

- - максимальне, середнє і таке, що діє значення струму, яке протікає через вентиль в прямому напрямі (виражається зазвичай через значення випрямленого струму I_d , що діє);
- максимальні значення напруги на вентилі (виражається через значення вторинної обмотки, що діє).

Оцінка ефективності використання вентиля в схемі виражається через коефіцієнт використання вентиля по напрузі K_u і струму K_i , які визначаються як відношення відповідних максимальних і діючих значень до середніх.

Параметри трансформатора в основному визначаються його повною розрахунковою потужністю S_T і коефіцієнтом трансформації K_T .

При проведенні аналізу схем випрямлення необхідно враховувати, що на їх роботу робить істотний вплив характер навантаження: активна, активно-індуктивна, активно-ємкісна, з проти-ЕРС. Крім того, при комплексному аналізі розрізняють статичне і динамічне навантаження.

Допущення при аналізі випрямлячів:

- - вентиляльні елементи ідеальні;
- - тривалість вмикання і вимикання вентилів дорівнює нулю;
- - опір електричних кіл, що сполучають елементи схеми, дорівнюють нулю;
- - опори обмоток трансформатора, втрати енергії в його магнітопроводі і струм, що намагнічує, також дорівнюють нулю.

Основні схеми випрямлячів та часові діаграми струмів та напруг:

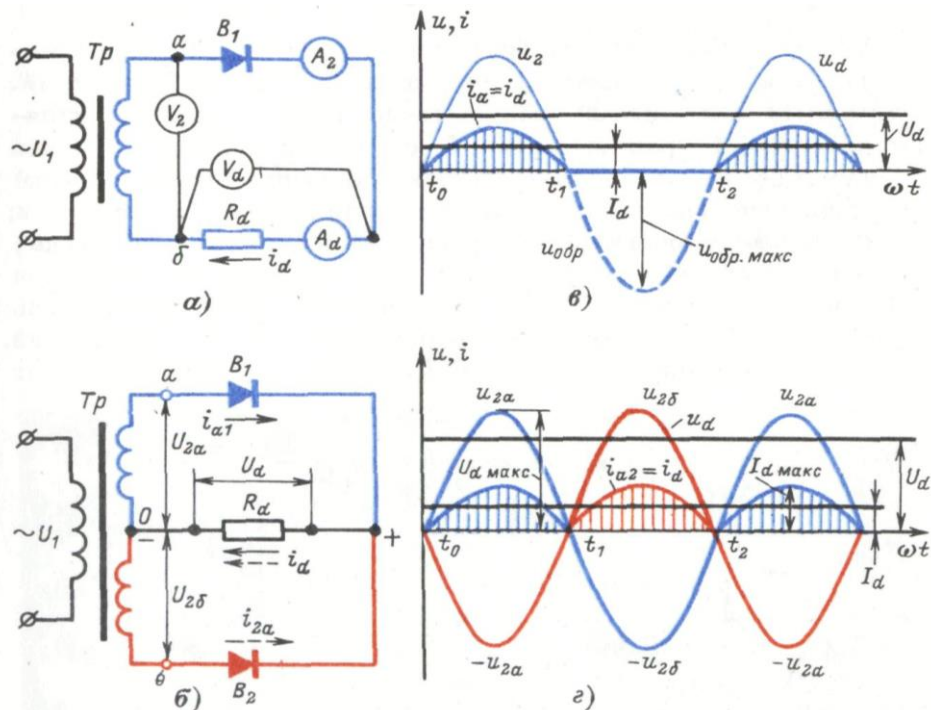


Рис. 2.1 – Однофазний випрямляч: а) однонапівперіодна схема; б) двонапівперіодна схема; в, г) діаграми напруг і струмів на елементах схем випрямлення.

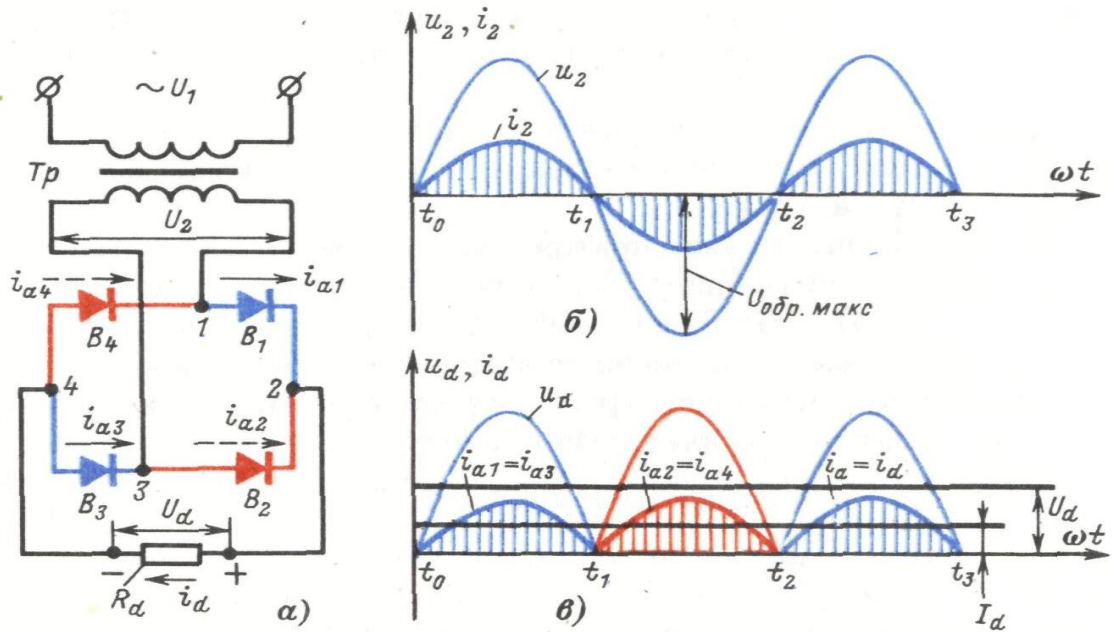


Рис. 2.2 – Однофазний мостовий випрямляч: а) схема; б, в) діаграми напруг і струмів на елементах схеми.

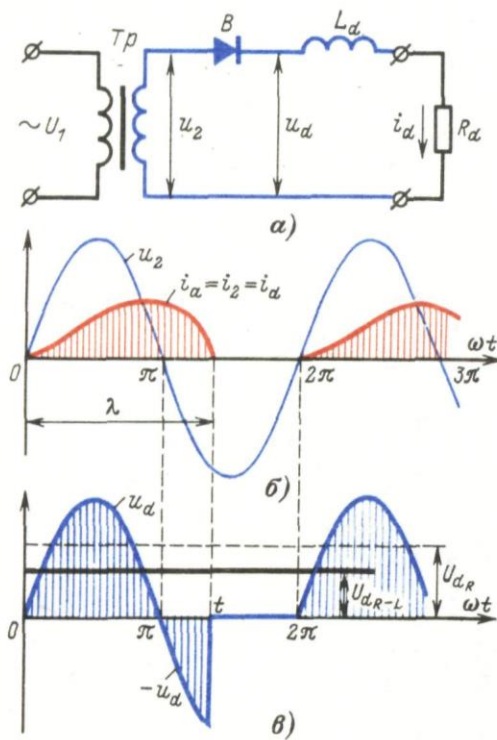


Рис. 2.3 – Однонапівперіодне випрямлення при активно-індуктивному навантаженні: а) схема; б, в) криві струму та напруг на елементах.

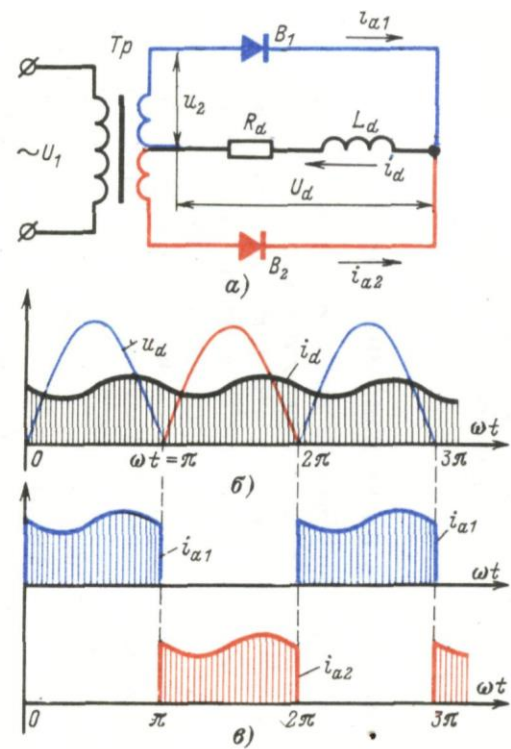


Рис. 2.4 – Двонапівперіодне випрямлення при активно-індуктивному навантаженні: а) схема; б, в) криві напруги та струмів на елементах.

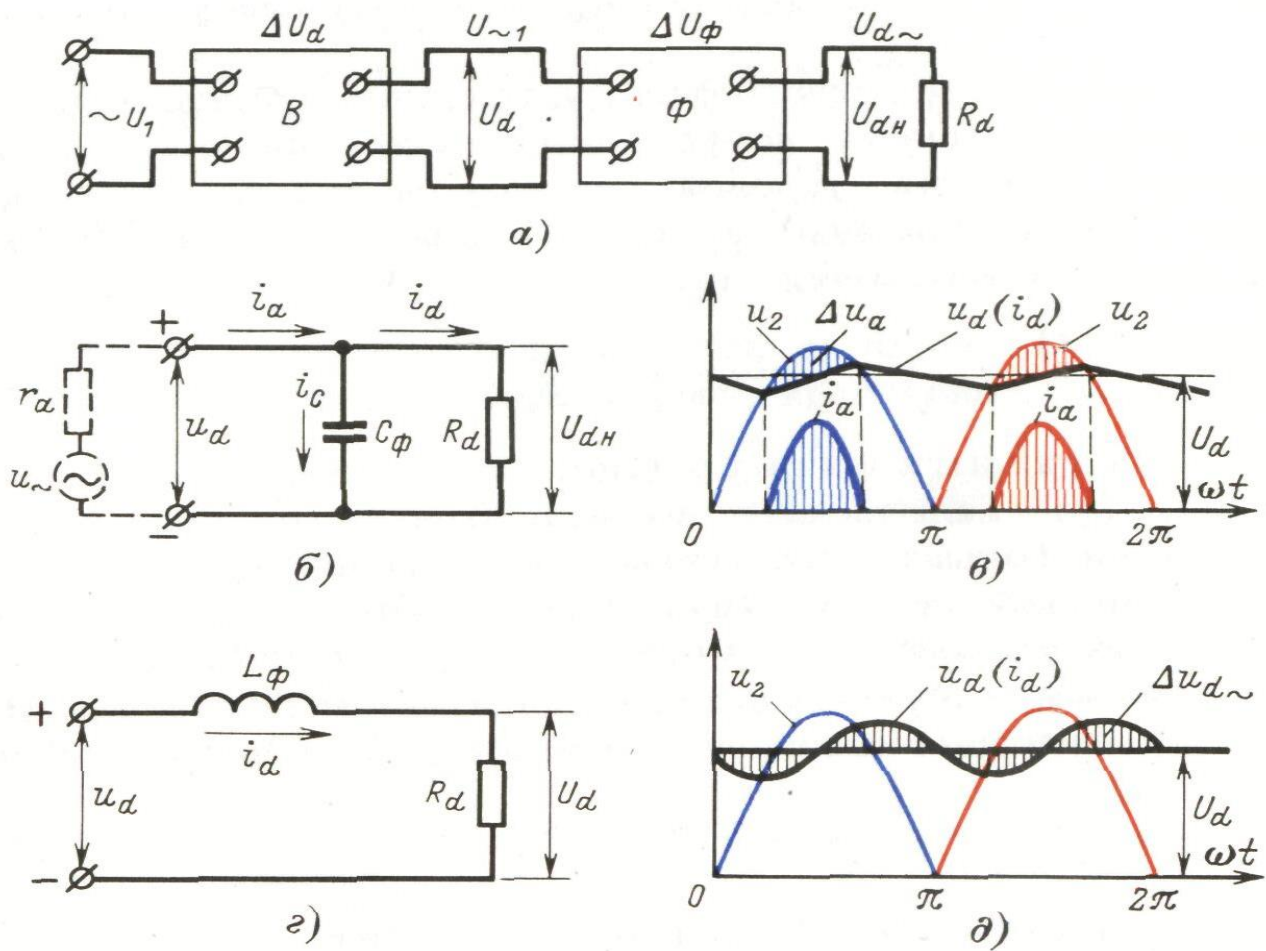


Рис. 2.5 – Схеми вмикання фільтрів: а) блок-схема випрямляча із фільтром; б) ємнісний фільтр; в) індуктивний фільтр; г) криві напруг і струмів.

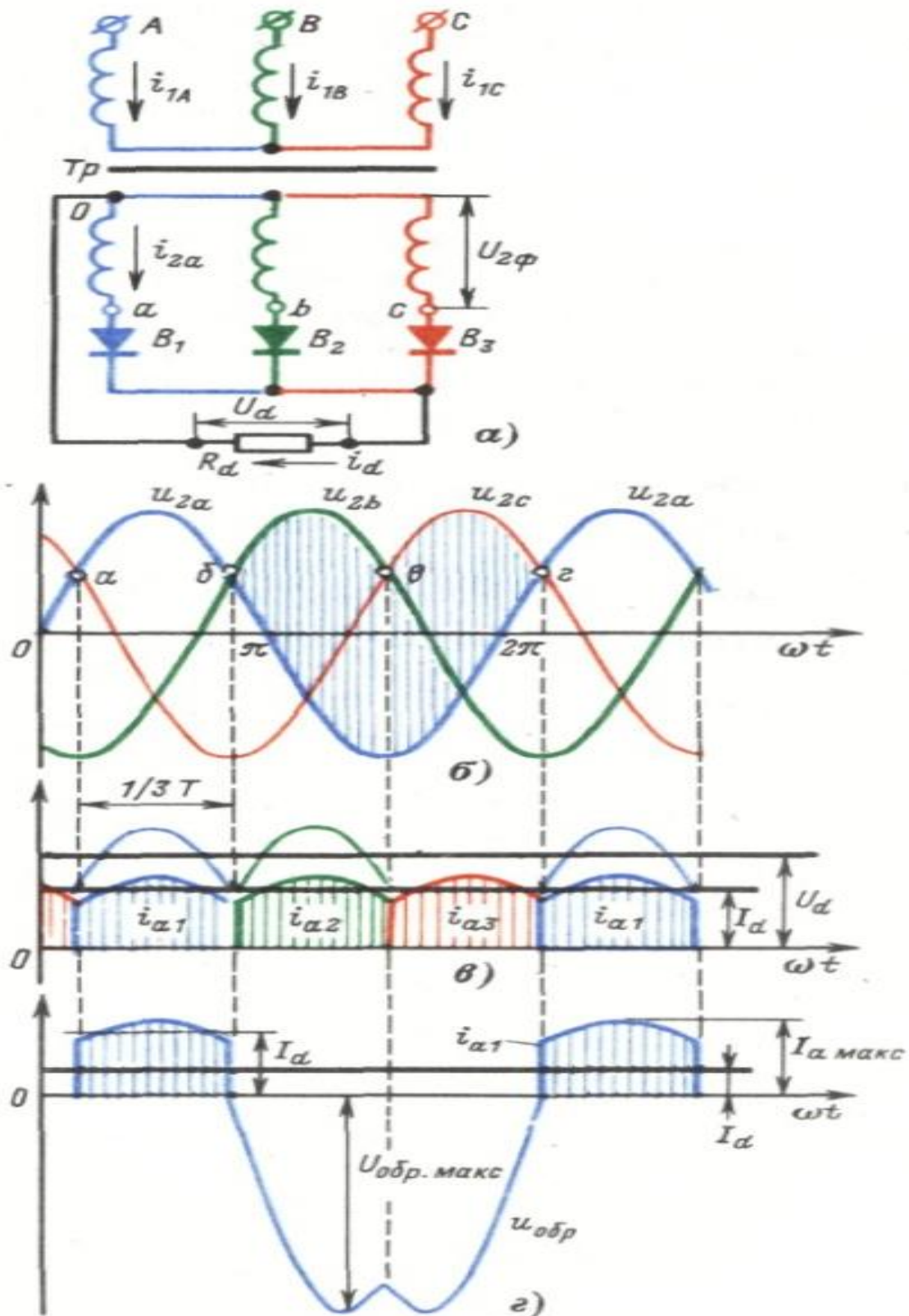


Рис. 2.6 – Трифазний випрямляч з нульовою точкою: а) схема; б, в, г) діаграми напруг і струмів на елементах.

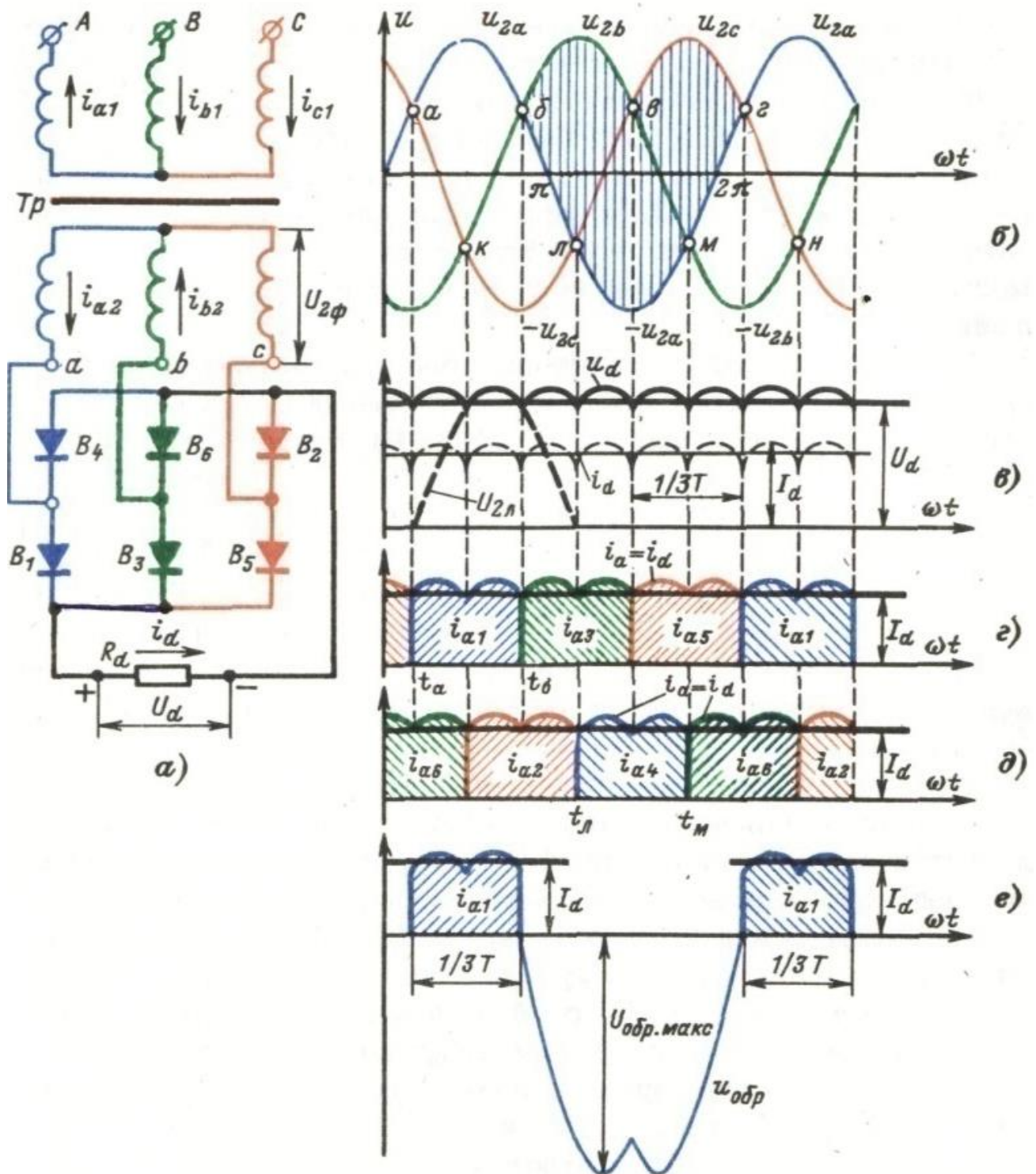


Рис. 2.7 – Трифазна мостова схема випрямляча: а) з'єднання елементів; б, в, г, д, е) діаграми напруг і струмів.

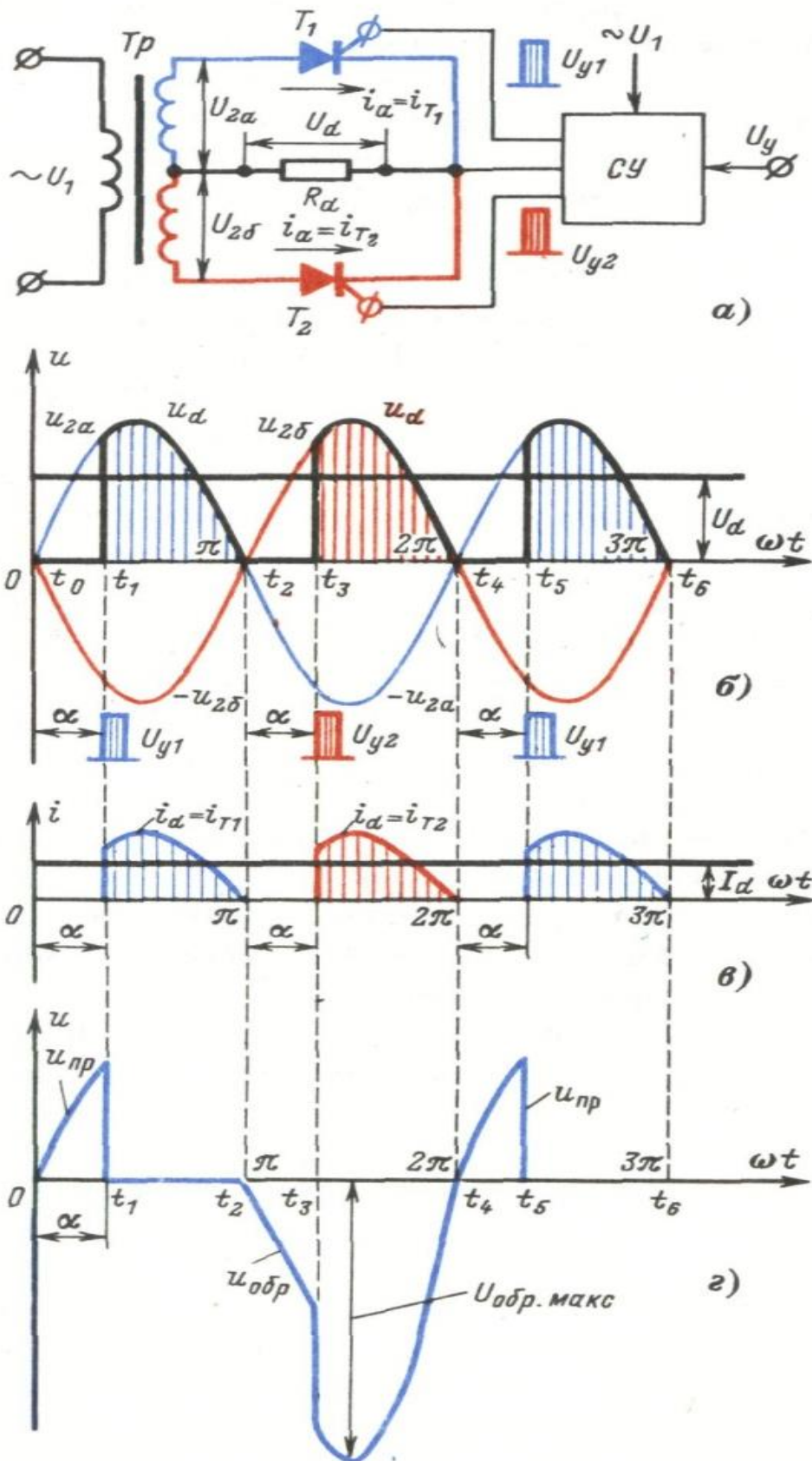


Рис. 2.8 – Однофазний керований випрямляч: а) схема; б, в, г) діаграми напруг і струмів на елементах.

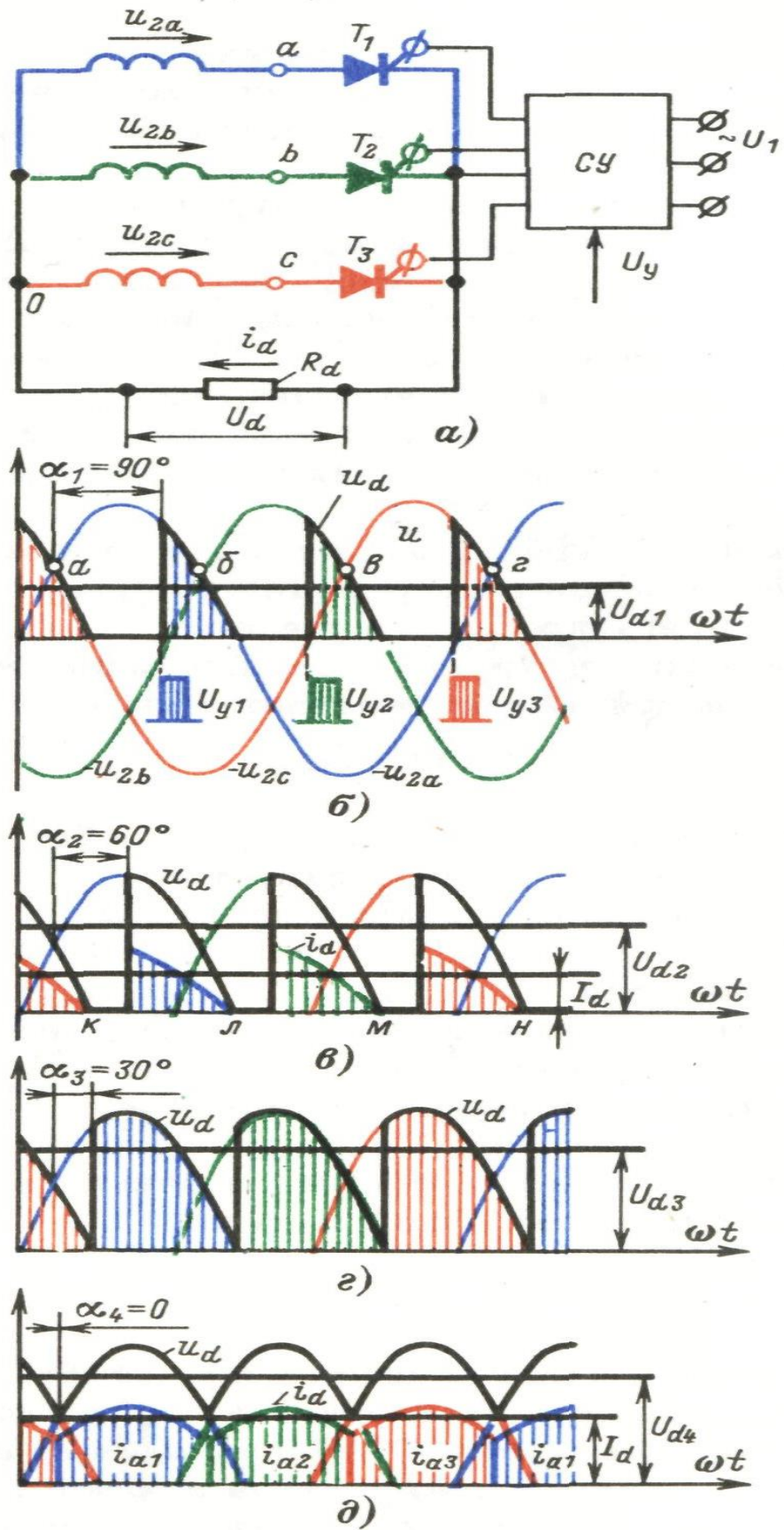


Рис. 2.9 – Трифазний керований випрямляч з нульовою точкою: а) схема; б, в, г) діаграми напруг і струмів на елементах.

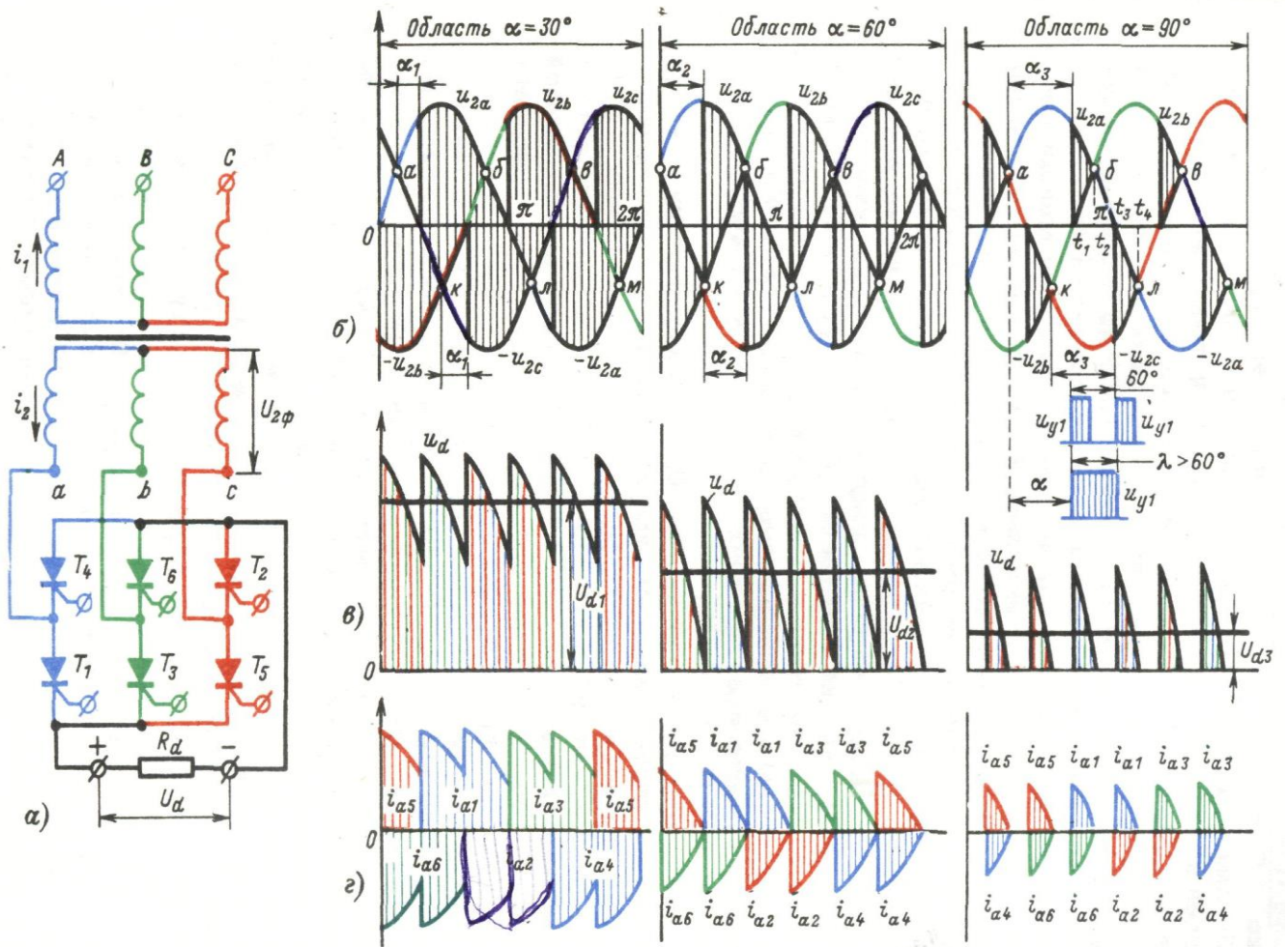


Рис. 2.10 – Трифазна мостова схема на керованих вентилях:
 а) з'єднання елементів;
 б, в, г) діаграми напруг і струмів при різних кутах α .

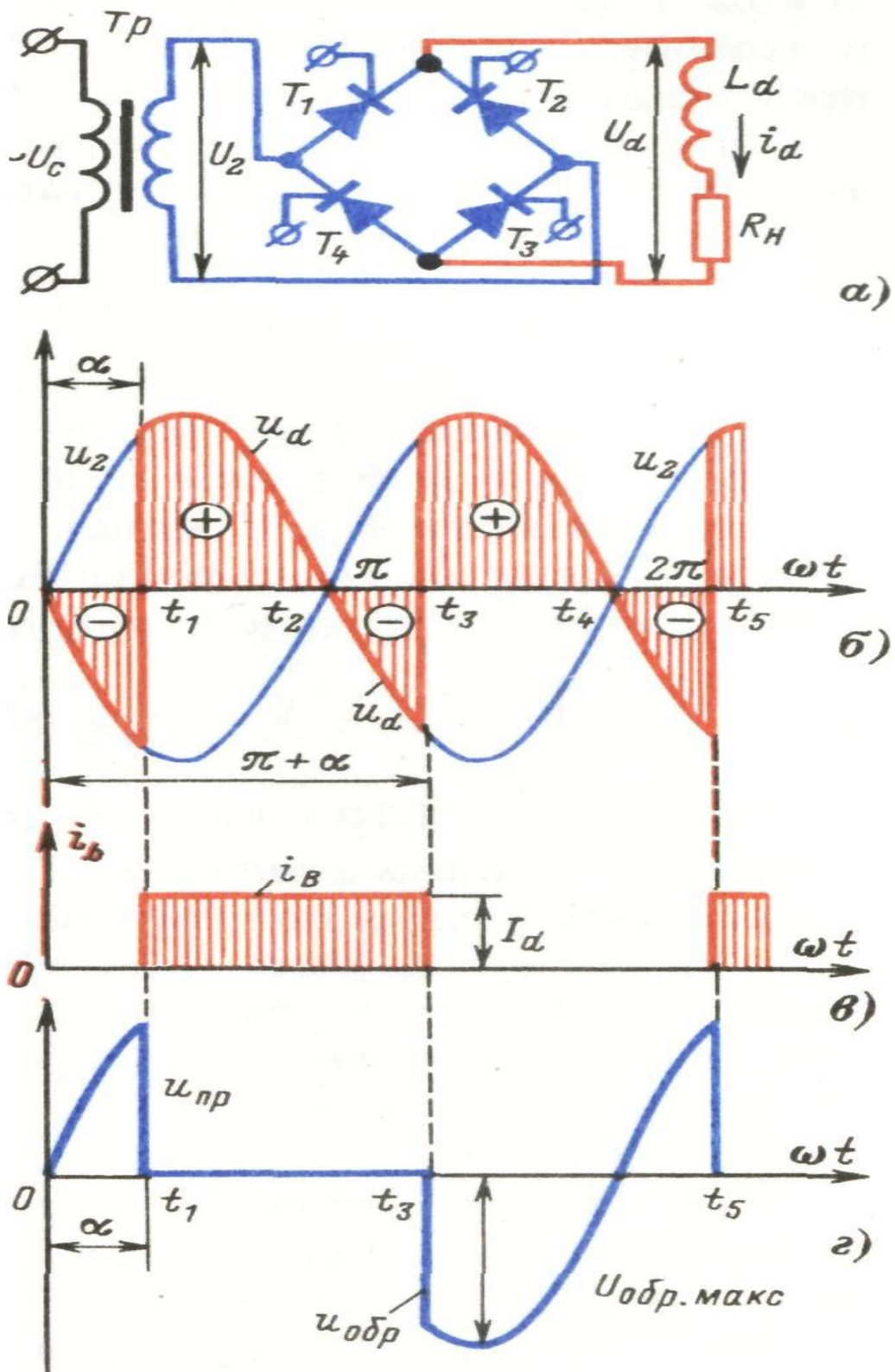


Рис. 2.11 – Робота керованого однофазного мостового випрямляча на активно-індуктивне навантаження.

Основні параметри схем некерованих випрямлячів та співвідношення U , I та P в перетворювачах надані в табл. 2.1, 2.2.

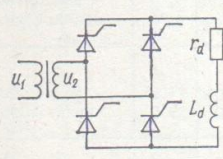
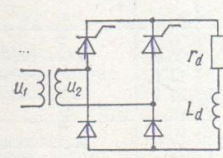
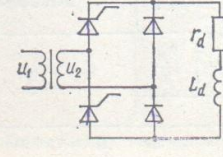
Таблица 2.1

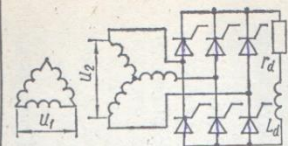
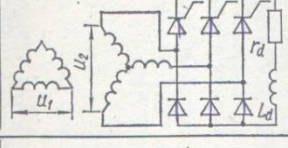
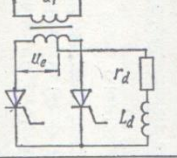
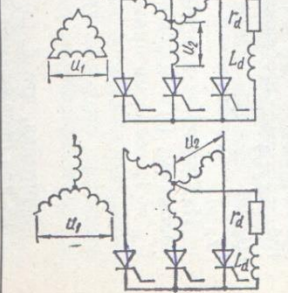
Основные параметры схем неуправляемых выпрямителей

Схема выпрямителя	Реакция нагрузки	Трансформатор						Вентили			Нагрузка		
		$\frac{E_2}{U_d}$	$\frac{I_2}{I_d}$	$\frac{I_1}{nI_d}$	$\frac{S_1}{P_d}$	$\frac{S_2}{P_d}$	$\frac{S_T}{P_d}$	$\frac{U_{обр max}}{U_d}$	$\frac{I_a}{I_d}$	$\frac{I_{a,эфф}}{I_d}$	m_n	i_1	$K_{п(1)}$
Однофазная мостовая	активная	1,11	1,11	1,11	1,23	1,23	1,23	1,57	0,5	0,785	2	100	0,667
	индуктивная	1,11	1	1	1,11	1,11	1,11	1,57	0,5	0,71	2	100	0,667
	емкостная	0,71	1,63	1,63	1,51	1,51	1,51	1,32	0,5	1,15	2	100	—
Однофазная двухполупериодная с нулевым выводом	активная	1,11	0,785	1,11	1,23	1,73	1,48	3,14	0,5	0,785	2	100	0,667
	индуктивная	1,11	0,707	1	1,11	1,57	1,34	3,14	0,5	0,71	2	100	0,667
	емкостная	0,93	0,15	1,63	1,51	2,14	1,83	2,63	0,5	1,15	2	100	—
Однофазная симметричная схема удвоения напряжения	емкостная	0,35	2,95	2,95	1,57	1,57	1,57	1	1	2,09	2	100	—
Трехфазная мостовая (соединение обмоток трансформатора λ/λ)	индуктивная	0,43	0,82	0,82	1,05	1,05	1,05	1,05	0,333	0,58	6	300	0,057
	емкостная	0,41	0,92	0,92	1,28	1,28	1,28	1	0,333	0,65	6	300	—
Трехфазная мостовая (соединение обмоток трансформатора λ/Δ)	индуктивная	0,74	0,47	0,47	1,05	1,05	1,05	1,05	0,33	0,58	6	300	0,057
	емкостная	0,71	0,53	0,53	1,28	1,28	1,28	1	0,33	0,65	6	300	—
Трехфазная с нулевым выводом	активная	0,855	0,583	0,476	1,22	1,48	1,35	2,11	0,33	0,59	3	150	0,25
	индуктивная	0,855	0,58	0,47	1,21	1,48	1,35	2,1	0,33	0,58	3	150	0,25
	емкостная	0,71	0,8	0,77	2,06	2,1	2,08	2	0,33	0,8	3	150	—
Двойная трехфазная с уравнительным реактором	индуктивная	0,855	0,29	0,405	1,05	1,48	1,26	2,1	0,167	0,29	6	300	0,057

Таблица 2.2

Соотношение U , I и P в преобразователях

Название схем	Схемы	Активная нагрузка		Индуктивная нагрузка (непрерывный режим)	$\frac{U_{d0}}{U^*}$	$\frac{U_{обр}}{U_{d0}}$	$\frac{I_a}{I_d}$	$\frac{I_2}{I_d}$	$\frac{S_T}{P_d}$
		непрерывный режим	прерывистый режим						
Однофазная симметричная мостовая		$U_{d0} \frac{1 + \cos \alpha}{2}$		$U_{d0} \cos \alpha$	0,9	1,57	0,5	1,0	1,11
Однофазная несимметричная мостовая					0,9	1,57	0,5	1,0	1,11
		$U_{d0} \frac{1 + \cos \alpha}{2}$				0,9	1,57		1,0

Трёхфазная симметричная мостовая		$U_{d0} \cos \alpha$ при $\alpha < \pi/3$	$U_{d0} \left[1 + \sin \alpha \times \left(\frac{\pi}{6} - \alpha \right) \right]$ при $\alpha > \frac{\pi}{3}$	$U_{d0} \cos \alpha$	1,35	1,05	0,33	0,82	1,045	
Трёхфазная несимметричная мостовая		$U_{d0} \frac{1 + \cos \alpha}{2}$				1,35	1,05	0,33	0,82	1,045
Однофазная двухполупериодная со средней точкой		$U_{d0} \frac{1 + \cos \alpha}{2}$			$U_{d0} \cos \alpha$	0,9	3,14	0,5	0,71	1,34
Трёхфазная со средней точкой		$U_{d0} \cos \alpha$ при $\alpha < \frac{\pi}{6}$	$\frac{U_{d0}}{\sqrt{3}} \left[1 + \sin \alpha \times \left(\frac{\pi}{3} - \alpha \right) \right]$ при $\alpha > \frac{\pi}{6}$	$U_{d0} \cos \alpha$	1,17	2,09	0,33	0,58	1,35	
					1,17	2,09	0,33	0,58	1,46	

2.3. Гармонійний склад випрямленої напруги і первинних струмів в схемах випрямлення

Форма кривих випрямленої напруги характеризується їх гармонійним складом. У загальному вигляді, випрямлена напруга можна представити у вигляді суми двох складових: постійної, тобто середнього значення U_d , і змінної u_{\sim} . Постійна складова являє собою середнє значення випрямленої напруги

$$U_d = \frac{1}{T} \int_0^T U_d(t) dt,$$

де: $U_d(t)$ – миттєве значення випрямленої напруги;

T – період повторюваності форми випрямленої напруги.

Змінна складова u_{\sim} є змінна напруга несинусоїдної форми. Несинусоїдальну напругу в свою чергу можна представити у вигляді суми гармонійних (синусоїдальних) напруг:

$$u_{\sim} = \sum U_{nm} \sin(n \cdot m \cdot \omega \cdot t + \vartheta_n),$$

де: n – номер вищої гармоніки;

m – число пульсацій в випрямленій напрузі за один період змінної напруги мережі живлення;

ω – кутова частота напруги мережі живлення;

U_{nm} – амплітуда n -ї гармоніки;

n – початкова фаза n -ї гармоніки.

З формули видно, що частоти складових випрямленої напруги можна записати у вигляді:

$$f_n = n f_1 = m n f,$$

де: f – частота напруги мережі живлення;

f_1 – частота першої гармоніки пульсації.

Наприклад, при частоті мережі живлення $f = 50$ Гц частота першої гармоніки пульсації ($n = 1$) буде мати наступні значення:

1) 100 Гц для однофазної мостової схеми ($m = 2$);

2) 150 Гц для трифазної схеми з нульовим виводом ($m = 3$);

3) 300 Гц для трифазної мостової схеми ($m = 6$);

$$U_{nm} = U_d \frac{2}{m^2 \cdot n^2 - 1}.$$

Амплітуда n -ої гармоніки напруги для схем, що працюють з кутом управління $\alpha = 0$, визначається за формулою згідно з якою, найбільше значення має амплітуда першої гармоніки, а решта зменшуються обернено пропорційно квадрату порядкового номера гармонійної складової.

Чинне значення змінної складової випрямленої напруги можна виразити формулою:

$$U = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2},$$

де U_n – чинна напруга n -ї гармонійної складової.

На практиці пульсація або вміст змінної складової в випрямленій напрузі оцінюється значенням коефіцієнта пульсації K_n . Існують різні способи визначення K_n , використання яких залежить від типу вимірювальної апаратури і вимог, що пред'являються до джерела випрямленої напруги. Найбільш поширеними є наступні:

$$k_n = \frac{U_{1m}}{U_d},$$

$$k'_n = \frac{u_{d.max} - u_{d.min}}{2U_d},$$

$$k''_n = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2}{U_d},$$

де: U_{1m} – амплітуда першої гармоніки випрямленої напруги;

$u_{d.max}$, $u_{d.min}$ – максимальне і мінімальне миттєве значення випрямленої напруги.

Різниця в значеннях коефіцієнтів пульсацій буде тим менше, ніж більш плавним є випрямлена напруга. Наприклад, для трифазної мостової схеми $K_n = 5.7\%$; $K_n \approx 7\%$; $K_n \ll 4.2\%$.

Затримка подачі на вентилі відчиняючих імпульсів щодо моментів природної комутації на кут призводить до зміни гармонійних складових в випрямленій напрузі: з ростом кута збільшується змінна складова (пульсація зростає). У той же час період повторюваності пульсацій не залежить від кута.

За умови безперервності випрямленого струму (що відповідає найбільш поширеній режиму роботи з активно-індуктивним навантаженням) залежність між амплітудами гармонійних складових і кутом управління однакова для різних схем і визначається формулою:

$$U_{nm} = U_{d0} \cdot \cos\alpha \frac{2}{m^2 \cdot n^2 - 1} \sqrt{1 + m^2 n^2 \tan^2 \alpha},$$

де: U_d – середнє значення випрямленої напруги при $\alpha = 0$;

З розглянутого вище впливає, що випрямлячі в більшості випадків споживають з мережі живлення несинусоїдальний струм і містить крім основної гармоніки (першої), вищі, найменший номер яких тим вище, чим більше кратність пульсацій випрямленої напруги m .

Згідно із загальним законом для порядку вищих гармонійних складових первинного струму, номери гармонік визначаються за формулою: $n = k_m \pm 1$.

Зі збільшенням числа фаз схеми випрямлення (зі збільшенням числа m), споживаний з мережі струм наближається до синусоїдальному (так як вміст вищих гармонік зменшується).

Вищі гармоніки викликають додаткові втрати і спотворюють форму кривої напруги живлення (особливо помітно це при сумірною потужності джерела і споживача). Тому необхідно зниження вмісту вищих гармонік в первинному струмі.

Гармонійний склад струму, споживаного з мережі керованим випрямлячем, істотно залежить від характеру навантаження. Якщо навантаження активна або активно-індуктивна, але не забезпечується режим роботи з безперервним струмом, то з ростом кута управління відбувається

збільшення амплітуд вищих гармонік споживаного струму (за умови незмінності амплітуди першої гармоніки).

При активно-індуктивному навантаженні і ідеально згладженому випрямленому струмі ($\omega L = \infty$) кут управління *а* не впливає на гармонійний склад споживаного струму. Слід зазначити, що даний висновок справедливий при допущенні про рівність нулю індуктивних опорів обмоток трансформаторів ($\omega L = 0$).

Порівняльний огляд схем випрямлення.

Основними показниками, за якими проводиться порівняння різних схем випрямлення, є:

- 1) Режим роботи трансформатора і його відносна типова потужність, яка характеризується коефіцієнтом перевищення розрахункової потужності K_{np} :

$$K_{np} = S_m / P'_{dn};$$

$$S_m = (S_1 + S_2) / 2;$$

$$S_1 = U_1 \cdot I_1; \quad S_2 = U_2 \cdot I_2;$$

$$P'_{dn} = 1 / T \cdot u_d \cdot i_d \cdot dt.$$

- 2) Ефективність використання вентилів по напрузі і струму визначаються коефіцієнтами k_u , k_i , $k_{i\text{cp}}$.

Коефіцієнт k_u дорівнює відношенню максимального значення зворотної напруги на вентилях схеми до середнього значення випрямленої напруги:

$$k_u = U_{об.м} / U_d.$$

Коефіцієнти k_i і $k_{i\text{cp}}$ визначаються як відносини чинного і середнього струмів вентиля до середнього значення випрямлення струму:

$$k_i = I_{\text{ср}} / I_d;$$

$$k_{i\text{cp}} = I_{\text{ср}} / I_d.$$

- 3) Гармонійний склад випрямленої напруги u_d і споживаного струму i_l , який характеризується кратністю вищих гармонік в кривих u_d і i_l і відносними значеннями амплітуд цих гармонік U_{nm}^* і I_{nm}^* .

Відносні значення амплітуд вищих гармонік в частках амплітуд основної гармоніки визначається для всіх схем при $L_d = \infty$ наступним співвідношенням: $I_{nm}^* = 1 / n$. У загальному випадку:

$$I_{nm} = \frac{4I_d}{\pi \cdot n \cdot k_T} \sin \frac{n \cdot m}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right).$$

Однофазні випрямлячі. Мають досить хорошим використанням трансформатора, але ступінь пульсації випрямленої напруги і гармоніки в кривій споживаного з мережі струму в порівнянні з багатофазними схемами в них значно вище.

Багатофазні випрямлячі. До переваг відносять менші вищі гармоніки в кривій випрямленої напруги і кривій споживаного струму, добре використання трансформатора і вентилів, а також симетричне навантаження фаз мережі живлення. Найбільш досконалою з точки зору використання трансформатора і вентилів є трифазна мостова схема, чим пояснюється її широке застосування. Коефіцієнт перевищення розрахункової потужності трансформатора і коефіцієнт використання вентилів по напрузі для цієї схеми близькі до одиниці.

2.4. Зовнішні характеристики випрямлячів.

У реальних схемах миттєвий перехід струму з вентиля на вентиль (комутація струму) неможливий через наявність в контурі комутації певної індуктивності, що дорівнює для більшості схем сумі, наведеної до вторинної обмотки трансформатора індуктивності мережі живлення і індуктивності розсіювання обмоток трансформатора, яка визначається з його характеристик, а саме потужності короткого замикання трансформатора. Крім індуктивного опору на процес комутації впливає і активне, але менше. Процес комутації має певну тривалість. Час, протягом якого відбувається перехід струму з одного вентиля на інший, зазвичай вимірюється в кутовій мірі і називається кутом комутації або кутом перекриття (γ).

Поява комутаційних ділянок в випрямленій напрузі призводить до зміни його гармонійного складу і мережі живлення. З огляду на, що кут γ в свою чергу залежить від кута α , обчислення окремих гармонік з урахуванням комутації досить громіздко. Характер залежності гармонійних складових від кута комутації γ виражається в тому, що з ростом кута величини гармонійних складових випрямлених напруг періодично змінюються: гармонійні низького порядку – плавно, гармонійні вищого порядку – за законом близьким до синусоїдального. В області нормальних режимів при кутах $\alpha > \pi/6$ величина поправок гармонійного складу, обумовлених урахуванням кута комутації в порівнянні з ідеалізованими схемами не перевищує 5-8%.

Зовнішньою характеристикою випрямляча називається залежність випрямленої напруги від середнього значення струму навантаження, тобто $U_d = f(I_d)$. Зовнішня характеристика визначається внутрішнім опором випрямляча, яке

призводить до зниження випрямленої напруги з ростом навантаження. Зниження напруги обумовлено активним опором схеми ΔU_r , падінням напруги в вентилях ΔU_θ і індуктивним опором ΔU_x , яке з'являється при процесах комутації.

Зовнішня характеристика випрямляча: $U_d = U_{d0} \cos \alpha - \Delta U_r - \Delta U_\theta - \Delta U_x$. Отже, вихідна напруга випрямляча знижується в міру збільшення струму навантаження за рахунок внутрішнього падіння напруги. Залежно від потужності випрямляча вплив активних і реактивних елементів в схемі по-різному.

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha - \Delta U_r - \Delta U_\theta - \Delta U_x.$$

2.5. Аварійні режими роботи і захист випрямлячів.

Основні види аварій можна розділити на дві групи: внутрішні і зовнішні.

До зовнішніх аварій зазвичай відносять короткі замикання в електричних колах навантаження або мережі живлення, а також різного роду перенапруги на стороні змінного струму. Сюди також відносять обриви фаз і глибокі зниження напруги мережі живлення.

Внутрішні аварії більш різноманітні і викликані пошкодженням або вентилів, або системи управління. Аварії, викликані виходом з ладу вентилів через електричного або теплового пробоя, є, як правило, найбільш важкими, так як супроводжуються протіканням в схемі великих аварійних струмів. Аварійний струм залежить від моменту виникнення аварії та режиму роботи випрямляча. Тому при розрахунках зазвичай враховують такі обставини, при яких розвиваються максимальні і мінімальні аварійні струми. Дані про ці значення необхідні для проектування захисту і визначення електродинамічної стійкості обладнання випрямляча.

Розрахунок аварійних струмів проводиться в відносних одиницях і в якості базисного значення зазвичай приймається амплітудне значення усталеного струму короткого замикання I_{km} :

$$I_{km} = \frac{E_{\text{фм}}}{\sqrt{R_\Sigma^2 + (\omega L_\Sigma)^2}}.$$

При виникненні внутрішніх або зовнішніх аварій, а також при струмових перевантаженнях елементи випрямлячів піддаються підвищеним тепловим і електродинамічним впливам. Для захисту застосовують різні способи, плавкі запобіжники, АВ, спец. апаратура для вимикання керованих вентилів.

Основними характеристиками захисних засобів є: швидкодія, надійність, простота в налаштуванні і обслуговуванні. Для запобігання розвитку аварії у всіх колах схеми випрямляча і далі в системі електропостачання, що містить пошкоджений агрегат, необхідно забезпечувати селективність. Під

селективністю (вибірковістю) мають на увазі здатність захисту своєчасно відключати тільки пошкоджені ділянки схем, не допускаючи розвитку аварійних струмів в інших їх частинах.

Найбільш простий спосіб захисту - використання запобіжників виконаних на основі плавких вставок. Для цих цілей використовують спеціальні запобіжники - швидкодіючі, які призначені для захисту від струмів КЗ, але не від перевантаження. Особливістю використання плавких запобіжників є необхідність узгодження теплових еквівалентів запобіжників і вентилів.

Тепловим еквівалентом (ТЕ) приладу (запобіжника або вентиля) $I^2 \cdot t$ називається інтеграл квадрату струму, що протікає через прилад за час його протікання. Значення ТЕ пропорційне тепловій енергії, що виділяється в приладі, за виразом:

$$I^2 t = \int_0^{t_g} i^2(t) dt,$$

де t_n - час протікання струму через прилад.

В процесі вимикання запобіжника можна виділити два характерних інтервалу часу. Перший відповідає часу розплавлення вставки t_{nl} , яке вимірюється від моменту виникнення аварійного струму до появи дуги, а другий - часу горіння дуги в запобіжнику від моменту її появи до повного припинення струму. Відповідно тепловий еквівалент вимикання запобіжника складається з теплового еквівалента плавлення вставки і теплового еквівалента дуги:

$$I^2 \cdot t_0 = I^2 \cdot t_{nl} + I^2 \cdot t_d.$$

Слід зазначити, що тепловий еквівалент плавлення залежить від вихідної, тобто попередньої аварії, температури плавкою вставки, а тепловий еквівалент дуги - від напруги і індуктивності кола, що вимикається.

Значення теплового еквіваленту вентиля характеризується його типом і зазвичай наводиться у відповідних інформаційних матеріалах. Для малих часів протікання аварійних струмів (менш 0,01 с), коли тепла енергія практично не встигає передатися від вентиля в навколишнє середовище, його тепловий еквівалент можна вважати постійним.

Для забезпечення надійного захисту вентилів плавкими запобіжниками при коротких замиканнях необхідно виконати умову:

$$I^2 \cdot t_0 = I^2 \cdot t_g.$$

Сучасні швидкодіючі плавкі запобіжники мають, як правило, більший тепловий еквівалент, ніж вентилі, при одних і тих же значеннях номінального струму. Тому для забезпечення ефективного захисту вентилі необхідно недовантажувати по струму, або застосовувати паралельне з'єднання декількох

вентилів. В останньому випадку ефективність захисту підвищується і при внутрішніх пошкодженнях (пробою вентиля). Це пояснюється тим, що аварійний струм в запобіжнику, встановленому в колі з пошкодженим вентилям, збільшується пропорційно до загального числа паралельно з'єднаних вентилів. Тому тепловий вплив на інші вентиля, що залишилися в роботі, буде значно менше, ніж на запобіжник, встановлений в пошкодженому колі.

Запобіжники зазвичай забезпечені засобами сигналізації - мікроперемикачами, контактна система яких спрацьовує при перегоранні плавкої вставки, що дозволяє забезпечити контроль. Основний недолік - необхідність заміни, що виключає автоматизацію.

Широко застосовують автоматичні вимикачі, які за швидкодією поступаються запобіжників, але забезпечують багаторазові дії і можливість дистанційного керування. Використовуються і як комутаційні.

Комбінація автоматичних вимикачів з короткозамикачем, що створює паралельний шлях струму.

Підвищення швидкодії може бути досягнуто за рахунок застосування статичних контакторів.

Захист від перенапруги забезпечується розрядниками. Захисні властивості розрядників проявляються в обмеженні ними перенапруги на певному, допустимому для елементів рівні. При цьому в розряднику виникають великі струми і виділяється значна енергія. Допустима енергія визначає амплітуду і тривалість перенапруги, які можуть бути витримані розрядником без виходу його з ладу.

Комутаційні перенапруги виникають в схемі через "обрив" зворотних струмів вентилів, обумовлених кінцевим часом рекомбінації носіїв в базовій області, накопичених в період їх стану, що проводить. Оскільки зазначені зворотні струми протікають в колах, що містять індуктивності, їх "обрив" викликає перенапруження на вентилях.

Для захисту вентилів від таких перенапруг застосовують RC-ланцюжки, що включені паралельно вентилям. При цьому в момент вимикання вентиля зворотний струм в колі вентиля переходить в RC-ланцюжок, що викликає на ній, а отже, і на вентилі затухаючі коливання напруги. Такий ланцюжок називається демпфуючим, тобто заспокійливим.

Параметри RC-ланцюжка можна визначити за формулами:

$$C = \frac{u_k I_{обр.макс}^2}{\omega I_{пр.макс} U_{обр.макс}}, \quad R = \frac{U_{обр.макс}}{I_{обр.макс}},$$

де u_k - напруга КЗ трансформатора у відносних одиницях;

$I_{пр.макс}$ - максимальне значення прямого струму вентиля;

$U_{обр.макс}$ - максимальне значення зворотної напруги на вентилі;

$I_{обр.макс}$ - максимальне значення зворотного струму вентиля;

ω - кутова частота мережі живлення.

Демпфуючі RC-ланцюжки можуть бути також використані для захисту від короткочасних зовнішніх перенапруг. При цьому вони можуть бути включені як на стороні постійного струму вентильної схеми, так і на стороні змінного струму. Останнє використовується рідше через збільшення розрахункової потужності елементів ланцюжка, зумовленої впливом напруги мережі живлення.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Призначення випрямлячів.
2. З якою метою до вихідних затисків випрямляча підключають електричний згладжуючий фільтр.
3. Назвіть основні величини, що характеризують експлуатаційні властивості випрямлячів.
4. Що залежить від схеми випрямлення випрямляча.
5. Основні допущення при аналізі випрямлячів.
6. Назвіть основні схеми випрямлячів.
7. Що таке зовнішня характеристика випрямляча.
8. Які бувають аварійні режими роботи випрямлячів.
9. Способи захисту випрямлячів від аварійних режимів.

Глава 3. Згладжувальні фільтри на RLC пасивних елементах

3.1. Індуктивний фільтр.

При розрахунку фільтрів на його вході враховують тільки постійну складову випрямленої напруги та основну гармоніку пульсацій з амплітудою $U'_{(1)m}$, так як амплітуди вищих гармонік із збільшенням номера гармоніки різко падають. В результаті випрямляч по відношенню до фільтра та навантаження можна замінити двома генераторами з постійною ЕРС $U'_d = \text{const}$ та синусоїдальною ЕРС, що має амплітуду $U'_{(1)m}$ і частоту $m_n\omega$, де ω – кутова частота живлячої мережі.

Індуктивний фільтр застосовується для випрямлячі середньої та великої потужності, так як дозволяє забезпечити безперервність струму в колі навантаження та сприятливий режим роботи випрямляча. На рис. 3.1,а надана еквівалентна схема для розрахунку ідеального індуктивного фільтра (без втрат) з урахуванням, що навантаження є чисто активним, а внутрішній опір випрямляча дорівнює нулю.

Під впливом синусоїдальної ЕРС з амплітудою $U'_{(1)m}$ на навантаженні виникає напруга з амплітудою

$$U_{(1)m} = \frac{U'_{(1)m}}{\sqrt{r_H^2 + (m_n\omega L_d)^2}} r_H.$$

Постійна складова напруги на навантаженні дорівнює середньому значенню напругу на виході випрямляча, тому коефіцієнт сгладжування фільтра дорівнює коефіцієнту фільтрації:

$$K_{сг} = K_{\phi} = U'_{(1)m} / U_{(1)m} = \frac{\sqrt{r_H^2 + (m_n\omega L_d)^2}}{r_H},$$

Звідки індуктивність фільтра

$$L_d = (r_H / m_n\omega) K_{сг}.$$

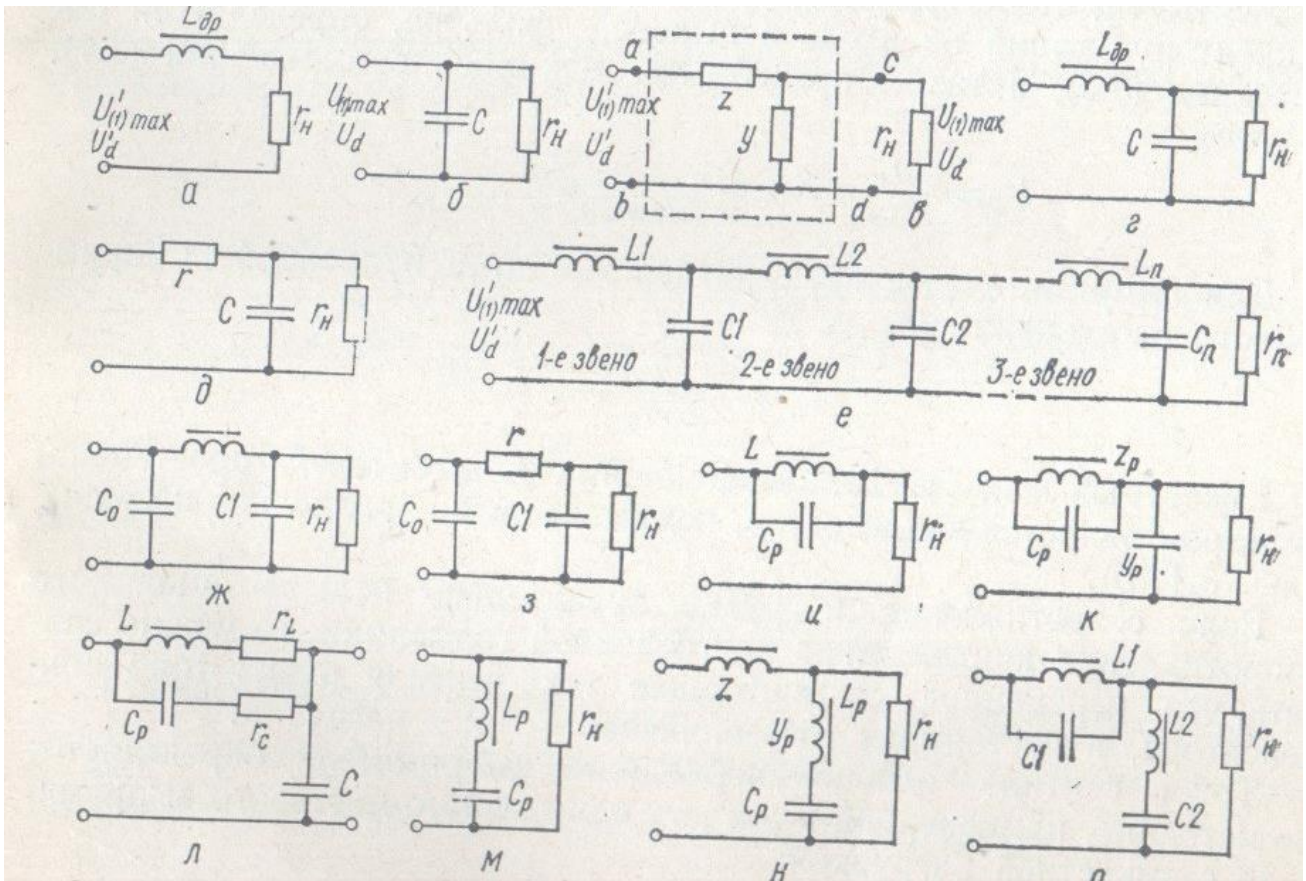


Рис. 3.1 - Еквівалентні схеми RLC згладжувальних фільтрів:

а – індуктивний; б – ємнісний; в - Γ -подібний; г – Γ -подібний LC -фільтр; д – Γ -подібний RC -фільтр; е – багатоланковий; ж – Π -подібний LC -фільтр; з - Π -подібний RC -фільтр; и – фільтр-пробка; к – Γ -подібний з резонансним контуром без врахування втрат; л - Γ -подібний з резонансним контуром з врахуванням втрат; м – режекторний фільтр; н - Γ -подібний з режекторним фільтром; п - Γ -подібний з фільтром-пробкою та режекторним фільтром.

3.2 Ємнісний фільтр

Для малопотужних споживачів простішим фільтром є конденсатор, що вмикається паралельно навантаженню (рис. 3.1, б).

Якщо опір навантаження значно більше ємнісного опору конденсатора для основної гармоніки, то можна вважати, що змінна складова струму вентиля дорівнює струму конденсатора, а постійна складова – струму навантаження.

Якщо допустимий коефіцієнт пульсацій на навантаженні:

$$K_{n(1)} = U_{(1)m} / U_d,$$

то, враховуючи, що $U_d = I_d r_n$, отримаємо вираз, що дозволить визначити ємність згладжувального конденсатора для однонапівперіодного випрямляча:

$$C = 2 / \omega K_{n(1)} r_n.$$

Для двонапівперіодних випрямлячів:

$$C = 1 / 2\omega r_n K_{n(1)}.$$

3.3 Г-подібний фільтр

Згладжування пульсацій випрямленої напруги здійснюється більш ефективно за допомогою фільтрів, що побудовані із Г- або П-подібних ланок, що повторюються. В якості елементів цих ланок можуть використовуватися конденсатори, дроселі, а в разі малопотужних споживачів і резистори.

В загальному вигляді Г-подібний фільтр може бути представлений на еквівалентній схемі (рис. 3.1,в) у вигляді чотириполюсника з входним ab та вихідними cd затискачами.

Коефіцієнт фільтрації Г-подібного фільтру можна визначити з виразу:

$$K_\phi = U'_{(1)m} / U_{(1)m} = 1 + Z (Y + 1/r_n).$$

Параметри елементів Г-подібного фільтру вибирають таким чином, щоб послідовно включені з джерелом живлення елементи мали більший опір для змінної складової струму ($Z \gg 5 r_n$) і невеликі опори для постійної складової. В якості послідовного елемента можна використовувати дросель, резонансну ланку з паралельно з'єднаних конденсаторів і дроселя, а для малопотужних споживачів – резистор. Елементи фільтру, що включають паралельно споживачу, навпаки повинні мати малі опори (велику провідність Y) для змінної складової струму та великий опір для постійної складової. В якості паралельно включених елементів можна використовувати конденсатор або резонансну ланку із конденсатора та дроселя, з'єднаних послідовно.

3.4 П-подібний фільтр

П-подібний фільтр відноситься до багатоланкових фільтрів, що представляють собою кілька одноланкових фільтрів, з'єднаних послідовно. Багатоланкові фільтри застосовують, якщо необхідно отримати високий коефіцієнт фільтрації.

В багатоланкових фільтрах (рис. 3.1, е) елементи окремих ланок підбирають таким чином, щоб кожна наступна ланка не впливала на роботу попередньої.

Якщо окремі ланки являють собою Γ -образні LC -фільтри, що застосовуються в випрямлячах великої потужності, то необхідно, щоби опір дроселя наступної ланки значно перевищував опір конденсатора попередньої ланки, а опір навантаження був значно більше опора шунтуючого конденсатора для основної гармоніки пульсацій.

При такій умові коефіцієнт фільтрації багатоланкового фільтра визначиться як добуток коефіцієнтів фільтрації окремих ланок:

$$K_{\phi} = U_{(1)m}^n / U_{(1)m} = K_{\phi}^{(1)} \cdot K_{\phi}^{(2)} \cdot K_{\phi}^{(n)}.$$

Багатоланкові фільтри зазвичай виконуються з дроселів і конденсаторів одного типу.

Для таких фільтрів $L_1 = L_2 = L_n = L$, $C_1 = C_2 = C_n = C$, тому

$$K_{\phi} = [K_{\phi}^{(1)}]^n,$$

де $K_{\phi}^{(1)}$ – коефіцієнт фільтрації першої ланки; n – кількість ланок.

В багатоланкових фільтрах витання щодо вибору кількості ланок потрібно вирішувати з економічної точки зору так, щоби вартість фільтра була мінімальною. Виходячи з цього, економічно вигідно при $K_{\phi} \geq 50$ використовувати дволанкові, а при $K_{\phi} \geq 220$ – триланкові фільтри.

3.5 Резонансні фільтри

Резонансні фільтри мають високі коефіцієнти фільтрації для визначених гармонік. Вони засновані на явищі резонансу струмів (фільтри-пробки) і резонансу напруг (режекторні фільтри). Резонансні фільтри більш компактні та дешеві у порівнянні зі звичайними LC -фільтрами.

Фільтри-пробки (рис. 3.1, и), як правило, використовують замість дроселя в LC -фільтрі, що дозволяє значно збільшити згладжувальну дію фільтру для визначеної гармоніки.

Режекторні фільтри (рис. 3.1, м) можна рекомендувати в Γ -подібних фільтрах замість конденсатора, що шунтує навантаження (рис. 3.1, н) для фільтрації визначеної гармоніки.

Для фільтрації ряду гармонічних складових пульсуючого струму паралельно навантаженню підключають декілька режекторних фільтрів, налаштованих кожен на визначену частоту. Такого роду фільтри застосовуються для згладжування пульсацій в потужних випрямлячах.

Для високої фільтрації визначеної гармоніки використовують фільтр-пробку та режекторний фільтр спільно (рис. 3.1, о).

Недоліками резонансних фільтрів є необхідність індивідуального налаштування кожного фільтру та зниження коефіцієнта фільтрації при зміні частоти зовнішнього джерела живлення.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Особливості застосування індуктивних згладжувальних фільтрів.
2. Особливості застосування ємнісних згладжувальних фільтрів.
3. Особливості застосування Г-подібних згладжувальних фільтрів.
4. Особливості застосування П-подібних згладжувальних фільтрів.
5. Особливості застосування резонансних згладжувальних фільтрів.
6. Що являють собою фільтри-пробки та режекторні фільтри.

Глава 4. Інвертори

4.1 Інвертори, ведені мережею

Інвертування — процес, зворотній випрямленню.

Інвертор – пристрій для перетворення енергії джерела постійного струму в енергію змінного струму.

Інвертор ведений мережею – це перетворювальний пристрій, що забезпечує передачу енергії від джерела постійної напруги у мережу змінної напруги, напруга та частота якої обумовлюються стороннім потужним джерелом напруги.

Ці пристрої виконуються на основі керованих випрямлячів (до речі, останні також відносять до перетворювачів, ведених мережею). Схема інвертора, веденого мережею, така сама, як і схема керованого випрямляча, що працює на активно-індуктивне навантаження. При кутах керування $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ перетворювач працює в режимі керованого випрямляча, і енергія з мережі змінного струму передається у навантаження – споживач постійного струму. При кутах керування $\alpha \geq 90^\circ$

Згідно регульовальної характеристики $U_{da} = U_{d0} \cos \alpha$, середнє значення випрямленої напруги U_d $\alpha \leq 0$. При цьому напрям протікання струму навантаження i_d не повинен змінюватися. Оскільки середні значення випрямленої напруги U_d та струму I_d мають протилежні знаки, мережа змінного струму виступає не як джерело, а як споживач електричної енергії. Якщо в такому режимі, як навантаження використовувати джерело постійного струму, напрям потоку енергії зміниться і вона передаватиметься з навантаження (джерела постійного струму) у мережу змінного струму.

Отже розглянутий пристрій може виконувати дві функції:

- 1) керованого випрямляча, якщо кут керування задавати у межах $0 < \alpha < \pi/2$;
- 2) інвертора, веденого мережею, якщо кут керування задавати у межах $\pi/2 < \alpha < \pi$.

На рис. 4.1 зображені залежності напруги U_d від кута керування α та $U_{d\beta} = f(\beta)$, та кута випередження: $\beta = \pi - \alpha$.

Характеристика $U_{d\beta} = f(\beta)$ свідчить, що при різних β напруга $U_{d\beta}$ повинна бути меншою або дорівнювати за величиною U_{d0} , тобто:

$$U_{d\beta} \leq U_{d0}.$$

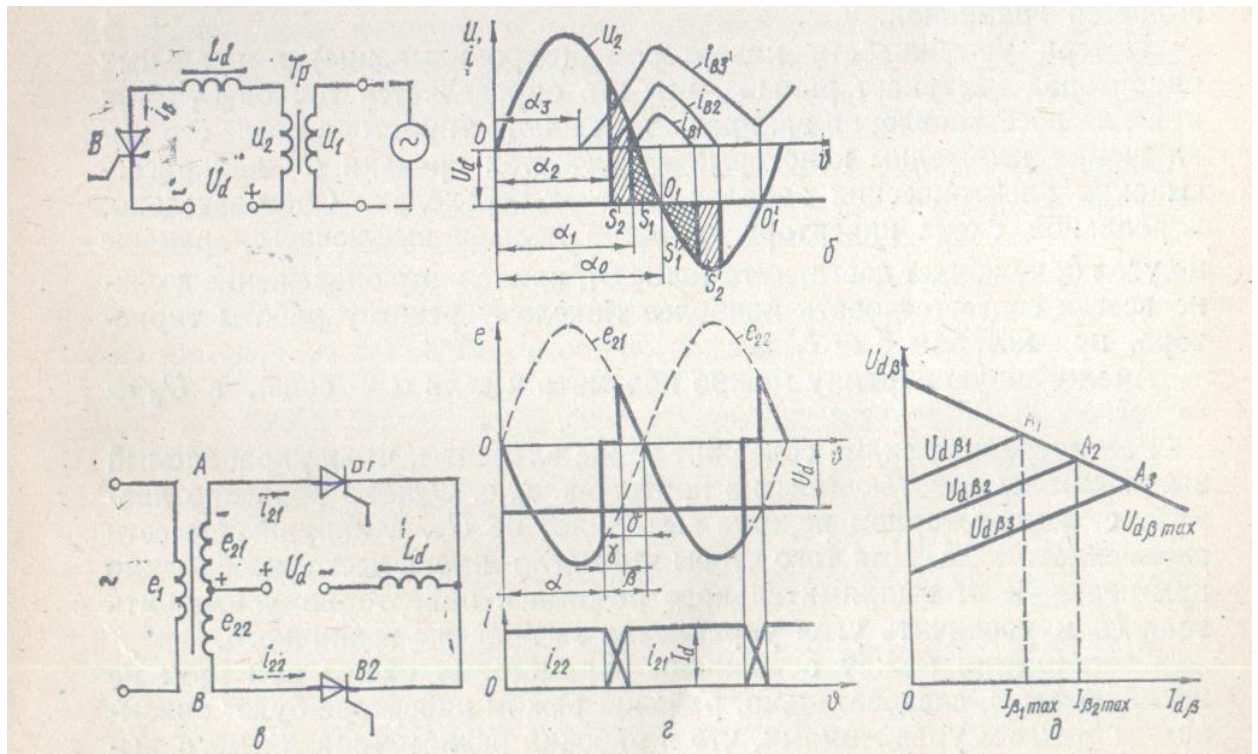


Рис. 4.1. Схеми однофазного (а) і двофазного (в) інвертора, веденого мережею; часові діаграми струмів і напруг (б, г); сімейство входних характеристик інвертора.

Принцип роботи інвертора, веденого мережею, можна розглянути на прикладі роботи однофазного інвертора, приведеного на рис.4.2,а.

Коло інвертора має джерело постійної інвертованої ЕРС U_d , послідовно з якою ввімкнено тиристор (В), дросель L_d і вихідний трансформатор T_p . Первинна обмотка трансформатора T_p під'єднана до мережі змінного струму, що утворює на вторинній обмотці напругу u_2 .

По відношенню до тиристора (В) напруга u_2 періодично змінює знак, в одну частину періоду сумується з напругою U_d , в іншу – віднімається від її. По відношенню до інвертованої напруги тиристор (В) завжди підключений у провідному напрямі.

Енергія передається від інвертора в мережу змінного струму тоді, коли напрямок інвертованого струму i_e і змінної напруги u_2 протилежні, тобто коли u_2 та U_d мають зустрічні напрямки.

Процес інвертування можливий, коли $U_{2m} > U_d$. Для інвертування необхідно відкривати тиристор до моменту O_1 , коли напруга на аноді буде ще більше нуля (0). Це має місце для всіх кутів регулювання $\alpha_2 < \alpha < \alpha_0$, де α_2 – граничний кут регулювання, при якому досягається граничний режим роботи інвертора.

Розглянута схема має ті ж елементи, що і керований випрямляч, працюючий на проти-ЕРС. Проте роль проти-ЕРС в інверторному режимі виконує не U_d , а напруга мережі змінного струму. Для того, щоб це могло мати

місце, необхідно при переході від випрямленого режиму до інверторного змінити знак U_d і збільшити кут регулювання за межі граничного. Співвідношення між основними параметрами схеми при цьому не зміняться, і відповідно, робочий режим інвертора буде описуватися тими ж рівняннями, що і робочий режим керованого випрямляча, з тією різницею, що джерело U_d виступає в цьому випадку не як споживач, а як генератор активної потужності. За рахунок цього джерела покриваються всі втрати в інверторі.

Найпростіший однофазний інвертор, ведений мережею, характеризується досить низькими енергетичними показниками із-за поганого використання вихідного трансформатора і значного спотворення форми струмів як на стороні змінної, так і на стороні постійної напруги. Через це інвертори, ведені мережею, як правило, виконуються багатофазними.

На рисунку 4.1 (в) представлена двофазна схема інвертора і часові діаграми струмів і напруг (г), що пояснюють його роботу.

Вибір необхідних ділянок робочих напруг, при яких забезпечується почерговий пропуск струму тиристорами ($B1$ та $B2$) в межах кожного із періодів змінної напруги, досягається вибором моменту відкриття тиристорів за допомогою імпульсів керування. При подачі імпульсів керування на тиристор ($B1$) незадовго до того, як напруга на фазі A стає негативною, цей тиристор відкривається та пропускає струм переважно при від'ємній напрузі фази A . Зустрічний напрямок негативною напруги e_{21} по відношенню до анодного струму i_{21} свідчить про прийом даною фазою потужності від джерела постійного струму.

Ця потужність в процесі трансформації струму передається через вторинну і первинну обмотки в мережу однофазного струму. Така ж передача потужності проходить у наступний півперіод через фазу B вторинної обмотки, коли через неї та тиристор ($B2$) протікає струм.

Перехід (комутація) струму з тиристора ($B1$) на тиристор ($B2$) проходить так само, як і при випрямляючому режимі, протягом деякого проміжку часу, що називається кутом комутації γ

Роль тиристорів при інвертуванні струму зводиться до ролі перемикачів, що перемінно замикають коло джерела постійного струму на одну із вторинних обмоток, а саме на ту, що забезпечує в дану частину періоду найбільш негативну напругу. Для того, щоб мала місце природня комутація струму, що характеризується переходом струму від одного тиристора до іншого, відкривання наступного тиристора повинно проходити з деяким випередженням відносно початку негативного півперіоду. Це випередження в кутовому вимірюванні носить назву кута випередження β . Кут випередження повинен бути достатнім не лише для того, щоб могла здійснитися природня комутація струмів тиристорів (кут γ), але і для того, щоб після комутації струмів залишався до появи позитивної напруги достатній по величині кут β , протягом якого тиристор, що закінчив свою роботу повинен встигнути відновити свої закриваючі властивості.

Якщо післякомутаційний кут γ менший, ніж потрібно для відновлення запірних властивостей тиристора, то з появою позитивної напруги на аноді тиристора, що закінчив свою роботу, він знову відкривається і струм продовжуватиме протікати при позитивному півперіоді змінної напруги, що приводить до перекидання інвертора.

Отже, коли пристрій працює у режимі інвертора, джерелом енергії є двигун, а споживачем (навантаженням) - мережа змінного струму. Характерні особливості інверторного режиму наступні:

- інвертор повинен бути побудований тільки на керованих вентилях, так як більшу частину неробочого інтервалу до них прикладена позитивна напруга;
- кут відкривання α повинен перевищувати 90^0 ;
- полярність напруги на стороні постійного струму протилежна полярності випрямляча;
- по всьому діапазоні зміни струму навантаження і вхідної напруги повинна виконуватись умова:

$$\beta > \gamma + \delta_{min}.$$

Інвертори, ведені мережею, використовують:

- 1) для плавного регулювання швидкості обертання двигунів (режим випрямляча);
- 2) для регульованого гальмування двигунів (режим інвертора).

4.2 Автономні інвертори

Автономні інвертори (АІ) — це перетворювачі постійного струму на змінний, які працюють на мережу, в якій немає інших джерел електроенергії. Комутація вентилів у них здійснюються завдяки застосуванню повністю керованих вентилів або пристроїв штучної комутації. При цьому частота напруги на виході АІ визначається частотою управління, а величина напруги — параметрами навантаження і системою регулювання.

Інвертори, що працюють на навантаження, у якому немає інших генераторів, називають автономними. У них струм перемикається спеціальним пристроєм, частота вихідного струму (напруги) визначається частотою імпульсів керування. Сфери використання автономних інверторів:

- для живлення споживачів змінного струму в установках, де як основне або резервне джерело енергії використовується акумуляторна або сонячна батарея;
- у частотному електроприводі змінного струму у складі перетворювача частоти з проміжною ланкою постійного струму;
- в електротехнології, як джерело змінного струму підвищеної частоти;

— в електроенергетиці з нетрадиційними джерелами живлення як активні фільтри, компенсатори реактивної потужності та потужності викривлення.

Залежно від побудови схеми розрізняють однофазні, двофазні, трифазні і багатофазні інвертори, залежно від кількості рівнів напруги джерела постійного струму дво- і багаторівневі інвертори.

Автономні інвертори (АІ) класифікуються за рядом ознак:

- **За видом вхідного струму або напруги АІ поділяються на:**
 - автономні інвертори струму (АІС).
 - автономні інвертори напруги (АІН).
 - резонансні (коливальні) автономні інвертори (РАІ).
- **За вентилями, що використовуються, АІ поділяються на:**
 - АІ на вентилях з неповним керуванням (звичайних тиристорах та симісторах);
 - АІ на вентилях з повним керуванням (транзисторах і запірних тиристорах);
- **За способом комутації АІ на незапірних тиристорах поділяються на :**
 - АІ з одноступінчастим перемиканням, в яких комутація здійснюється за допомогою комутуючих конденсаторів основними вентилями схеми без застосування додаткових тиристорів;
 - АІ з двоступеневою комутацією, в яких для комутації застосовуються спеціальні комутуючі вентиля.
- **За місцем ввімкнення комутуючих конденсаторів АІ з одноступінчастим перемиканням поділяються на :**
 - паралельні АІ (комутуючі конденсатори ввімкнені паралельно навантаженню);
 - послідовні АІ (комутуючі конденсатори ввімкнені послідовно з навантаженням).

Автономний інвертор струму (АІС) формує в навантаженні струм, а форма напруги визначається параметрами навантаження. В схемі АІС використовуються як повністю керовані, так і напівкеровані ключі з однобічною провідністю. Комутація тиристорів, що не вимикаються за колом керування, здійснюється примусово з використанням попередньо зарядженого конденсатора як джерела зворотної напруги.

Особливості АІС:

1. Джерело постійного струму працює в режимі генератора струму. Для цього у вхідне коло АІС вмикається реактор (дросель) з достатньо великою індуктивністю L , що не дає змінюватись струму (струм на вході АІС незмінний). Окрім того, реактор виконує функції фільтру вищих гармонік. При цьому функція ключів схеми — періодичне перемикання напрямку струму на виході.

2. Вихідне коло повинно допускати зміну струму стрибком, тобто мати властивості джерела напруги. Зазвичай це досягається підключенням до виходу АІС конденсатора, що дозволяє підключати до виходу активно-індуктивне навантаження.

Примітка: реактор на вході АІС може бути відсутнім або мати невелику індуктивність, якщо джерело має властивості джерела струму. Останнє досягається, наприклад, при використанні керованого випрямляча зі зворотнім зв'язком за вихідним струмом або активного випрямляча струму.

Принцип роботи схеми:

На вході АІС діє джерело струму, утворене джерелом ЕРС і великою індуктивністю, форма струму на виході вентиляльної групи прямокутна, а форма напруги визначається характером навантаження (рис. 4.2). Навантаження може бути тільки активним або активно-ємнісним, тому що при активно-індуктивному навантаженні струм не може миттєво змінити напрям. При роботі схеми з активно-ємнісним навантаженням у момент t_1 починають проводити тиристори V_1, V_2 в момент t_2 тиристори V_1, V_2 вимикаються, а тиристори V_3, V_4 вмикаються. Струм через навантаження змінює напрям. Під дією струму напруга на навантаженні змінюється по експоненті.

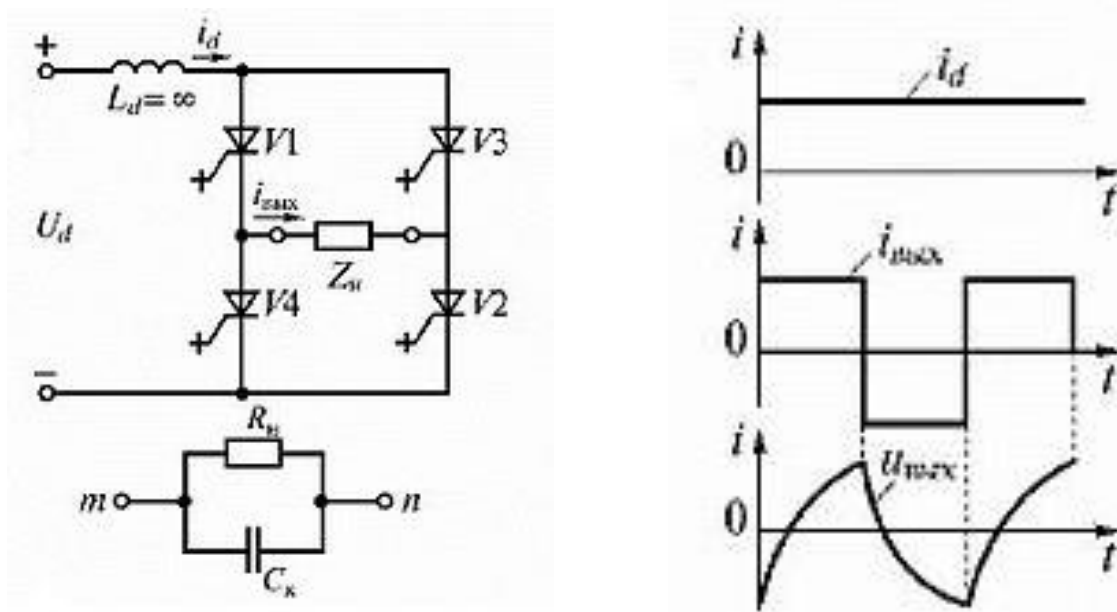


Рис.4.2. Автономний інвертор струму.

Автономний інвертор напруги (АІН) формує в навантаженні напругу, а форма струму визначається параметрами навантаження. В схемі АІН використовуються повністю керовані ключі: транзистори або тиристори, що вимикаються за колом керування. Тиристори, що не вимикаються за колом керування, використовуються в комбінації з вузлами примусової комутації з попередньо зарядженим конденсатором.

Особливості АІН:

1. Джерело постійного струму працює в режимі джерела ЕРС. Для цього паралельно до входу АІН вмикається конденсатор достатньо великої ємності, що надає джерелу властивості генератору напруги (напруга на вході АІН незмінна). Ключі схеми комутують джерело, чим забезпечується зміна напрямку напруги на навантаженні. При цьому вхідний струм змінюється стрибком, що не припускає наявності індуктивності на вході АІН. Для запобігання впливу індуктивності вхідних кіл конденсатор фільтру встановлюється біля ключів АІН.

2. Схема вентиляльного комутатора повинна мати двобічну провідність, що і забезпечує обмін енергією між активно-індуктивним навантаженням і джерелом (конденсатором на вході, якщо використовується випрямляч з однобічною провідністю).

Примітка: для передавання реактивної енергії (і активної) в мережу можна використовувати ведений мережею інвертор або активний випрямляч.

Принцип роботи схеми :

На вході АІН діє джерело ЕРС, напруга на виході вентиляльної групи прямокутна, а форма струму визначається характером навантаження. Напруга на навантаженні перемикається миттєво, тому навантаження може бути активним або активно-індуктивним. (рис.4.3). При роботі схеми з активно-індуктивним навантаженням у момент t_1 починають проводити тиристори V_1, V_2 . Під дією прикладеної напруги струм наростає по експоненті. У момент t_2 тиристори V_1, V_2 вмикаються, але струм через навантаження йде в тому ж напрямку через діоди VD_3, VD_4 за рахунок енергії, запасеної в індуктивності; при цьому напруга на навантаженні вже змінила знак, а струм поступово спадає.

У момент t_3 струм дорівнює нулю і вмикаються тиристори V_3 і V_4 , полярність напруги при цьому не змінюється, а струм змінює напрямок. Діоди призначені для повернення реактивної енергії в джерело живлення. Конденсатор C_d її приймає.

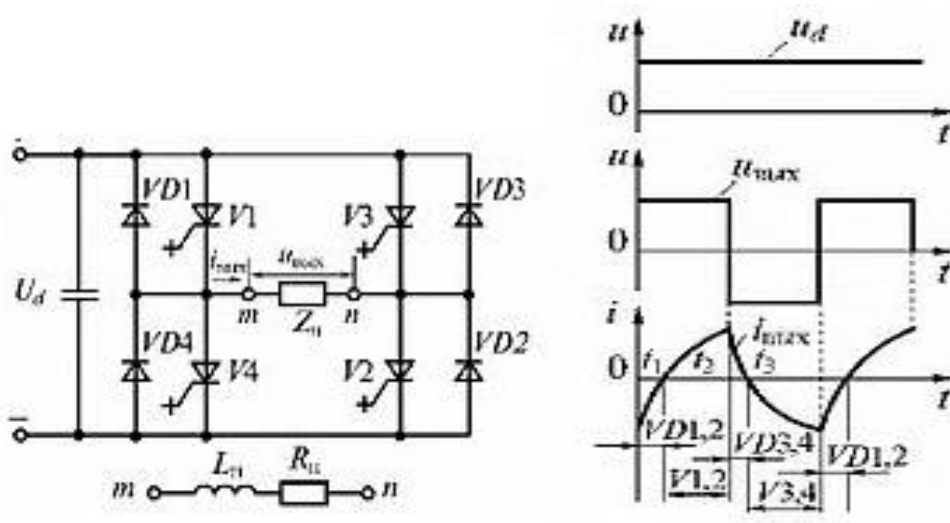


Рис. 4.3. Автономний інвертор напруги

Структура автономного інвертора. У загальному випадку структура інвертора складається з таких елементів:

– вхідний фільтр (Ф1), що забезпечує необхідну якість вхідного струму (напруги), надання джерелу енергії властивостей, що забезпечують нормальне функціонування схеми вентиляного комутатора, а також зменшує негативний вплив на джерело та інших споживачів енергії;

– вентиляний комутатор (ВК) у подальшому безпосередньо інвертор, що поряд із перетворенням, забезпечує регулювання параметрів змінного струму - частоти і амплітуди. Вихідний сигнал, звичайно, має характер імпульсів, фронти яких мають значну крутизну і, як наслідок, складний гармонійний спектр. Це негативно впливає на роботу споживача енергії, а також призводить до значних додаткових витрат під час передавання енергії на відстань;

– вихідний трансформатор (ТВ) для узгодження вихідної напруги з напругою споживача, що може бути поєднаним безпосередньо зі схемою комутатора. У ряді випадків використовується для отримання багаторівневої кривої вихідної напруги;

– вихідний фільтр (Ф2), що забезпечує якість вихідної напруги на потрібному рівні для передавання і споживання. Ємність у інверторів струму є необхідною для нормального функціонування схеми. Відзначимо, що не всі ці елементи є обов'язковими у конкретній схемі інвертора. Так, у інверторі напруги обов'язковими звичайно є Ф1 і ВК, у інверторі струму до них додається Ф2.

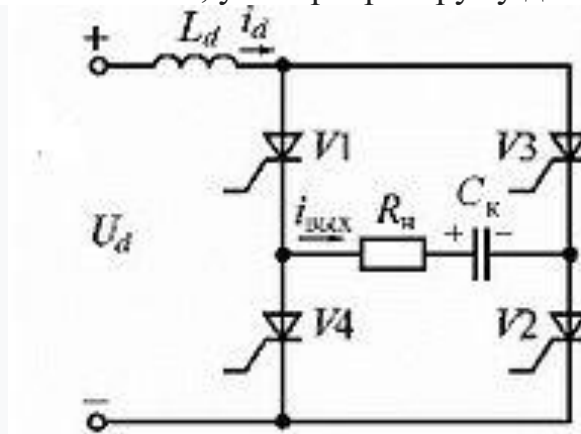


Рис.4.4. Резонансний автономний інвертор

Резонансний автономний інвертор (РАІ) - це інвертор, на вході і на виході вентиляної групи якого струм переривчастий, а форма напруги на виході визначається навантаженням (рис.5, 6). У цих інверторів періодичний характер електромагнітних процесів в навантаженні обумовлений коливальними властивостями LC-контурі інвертора. При цьому можливі три варіанти композиції LC-контурі і навантаження:

- послідовне включення навантаження в послідовний LC-контур - послідовні резонансні інвертори;

- паралельне підключення навантаження до L або C частини LC-контуру;
- підключення навантаження паралельно до частини C контуру.

Ці три види підключення навантаження визначають три види резонансних інверторів:

- паралельний;
- послідовно-паралельний;
- послідовний.

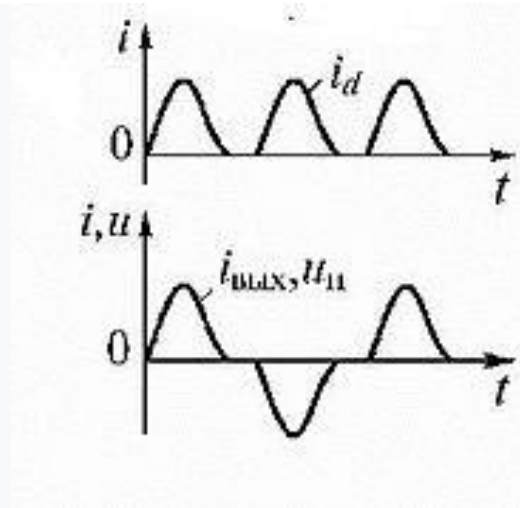


Рис.4.5. Діаграми напруги та струму при роботі PAI

Принцип роботи схеми:

У PAI повинна виконуватися умова:

При виконанні цієї умови процеси при включенні тиристорів носять коливальний характер. При включенні V_1 і V_2 проходить півхвиля струму і конденсатор C_k заряджається з вказаною полярністю. Після переходу струму через нуль тиристор запирається. При включенні V_3 і V_4 напруга джерела і напруга на конденсаторі C_k діють узгоджено, струм проходить в протилежному напрямку, конденсатор перезаряджається. Тиристори V_3 і V_4 закриваються при спаді струму до нуля. Напруга на навантаженні R_n повторює форму струму.

Застосування інверторів

Завдяки своїм властивостям інвертори знаходять широке застосування. В регульованих електроприводах з асинхронними двигунами трифазного струму інвертори застосовують у тягових електроприводах електровозів, електропоїздів, тепловозів, системах кондиціонування, побутових світильниках денного світла, системах живлення комп'ютерів, телевізорів тощо.

Вимоги до інверторів

До автономним інверторів і перетворювачів частоти, висуваються такі вимоги:

- забезпечення максимального ККД .;
- мінімальна встановлена потужність окремих вузлів і елементів;
- можливість широкого регулювання вихідної напруги;
- забезпечення стабільності вихідної напруги при зміні величини і характеру навантаження, а також вхідної напруги;
- забезпечення синусоїдальної або близької до синусоїдальної форми кривої вихідної напруги;
- можливість регулювання в певних межах вихідний частоти, що перш за все необхідно в установках вентильного електроприводу;
- можливість роботи в режимі холостого ходу;

4.3 Перетворювачі частоти

Перетворювач частоти - електронний пристрій для зміни частоти електричного струму (напруги). Він перетворює вхідну синусоїдну напругу фіксованої частоти та амплітуди у вихідну імпульсну напругу змінної частоти та амплітуди за допомогою ШІМ (широтно-імпульсної модуляції). Таким чином, плавно збільшуючи частоту і амплітуду напруги, що подається на статорні обмотки асинхронного електродвигуна, можна забезпечити плавне регулювання швидкості обертання валу електродвигуна.

Електронний перетворювач частоти складається з схем, до складу яких входить тиристор або транзистор, які працюють в режимі електронних ключів. В основі керуючої частини лежить мікропроцесор, який забезпечує керування силовими електронними ключами, а також вирішення великої кількості допоміжних завдань (контроль, діагностика, захист).

Схеми, створені за моделлю джерела напруги, мають такі характеристики:

- Вихідний імпеданс: маленький (джерело напруги).
- Регенерація енергії: потрібен додаткове коло.
- Згладжувальний елемент: конденсатор.

Схеми, створені за моделлю джерела струму, мають такі характеристики:

- Вихідний імпеданс: великий (джерело струму).
- Регенерація енергії: потрібне додаткове коло.
- Згладжувальний елемент: реактор.

Залежно від структури і принципу роботи електричного приводу виділяють два класи перетворювачів частоти:

- З безпосереднім зв'язком.
- З явно вираженою проміжною ланкою постійного струму.

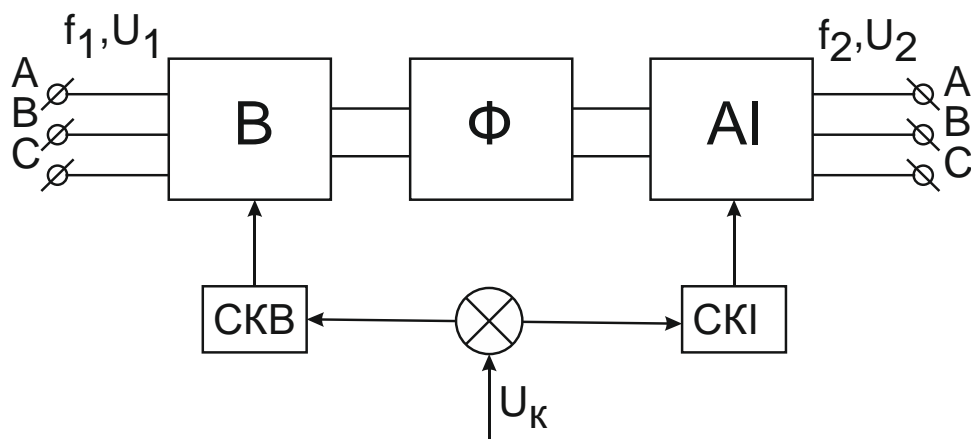


Рис. 4.6. Структурна схема перетворювача частоти з проміжною ланкою постійного струму.

На рис. 4.6 представлена структурна схема перетворювача частоти з проміжною ланкою постійного струму. В цих перетворювачах змінна напруга мережі живлення випрямляється за допомогою керованого випрямляча **B**, фільтрується LC – фільтром Φ і подається на автономний інвертор **AI**. Функції регулювання частоти вихідної напруги здійснює інвертор, а напруги – випрямляч. Іноді обидві функції сполучає інвертор, а випрямляч виконується некерованим.

Перетворювачі з проміжною ланкою постійного струму дозволяють регулювати вихідну частоту за допомогою системи керування інвертора **CKI** у широкому діапазоні як уверх, так і униз від частоти мережі живлення. В якості автономного інвертора може бути використаний любий з типів інверторів, що розглядалися. Даний тип перетворювачів частоти має просту схему силової частини, і отже системи керування. Вихідна частота перетворювача може бути як нижче, так і вище вхідної і не залежить від останньої.

Головним недоліком перетворювачів частоти з проміжною ланкою постійного струму є повільне перетворення енергії – випрямлення та інвертування, що призводить до знижування ККД та погіршенню масо-габаритних показників.

В перетворювачах частоти з проміжною ланкою постійного струму можна здійснювати обмін електричною енергією між споживачем і мережею живлення в обох напрямках.

Кожен із зазначених існуючих класів перетворювачів має свої переваги і недоліки, які визначають сферу раціонального застосування кожного з них. У перетворювачах з безпосереднім зв'язком електричний модуль - це керований випрямляч. Система керування по черзі відмикає групи тиристорів і підключає обмотки двигуна до мережі живлення.

Таким чином, вихідна напруга перетворювача формується з «вирізаних» ділянок синусоїд вхідної напруги. Частота вихідної напруги у таких перетворювачів не може бути дорівнює або вище частоти живильної мережі.

Вона знаходиться в діапазоні від 0 до 30 Гц, і як наслідок — малий діапазон керування частотою обертання двигуна (не більше 1:10). Це обмеження не дозволяє застосовувати такі перетворювачі в сучасних частотно-регульованих приводах з широким діапазоном регулювання технологічних параметрів.

Використання незамикних тиристорів вимагає відносно складних систем керування, які збільшують вартість перетворювача. «Різана» синусоїда на виході перетворювача з безпосереднім зв'язком є джерелом вищих гармонік, які викликають додаткові втрати в електричному двигуні, перегрівання електричної машини, зниження моменту, дуже сильні перешкоди в мережі живлення. Застосування пристроїв компенсації призводить до підвищення вартості, маси, габаритів, зниження ККД системи в цілому.

Призначення

Частотний асинхронний перетворювач частоти служить для перетворення мережевого трифазного або однофазного змінного струму частотою 50 (60) Гц в трифазний або однофазний струм, частотою від 1 Гц до 800 Гц. Промисловістю також випускаються частотні перетворювачі електроіндукційного типу, що конструктивно є асинхронним двигуном з фазним ротором, який працює в режимі генератора-перетворювача, і перетворювачі електронного типу.

Частотні перетворювачі електронного типу часто застосовують для плавного регулювання швидкості асинхронного електродвигуна або синхронного двигуна за рахунок створення на виході перетворювача електричної напруги заданої частоти. У найпростіших випадках регулювання частоти і напруги відбувається відповідно до заданої характеристики V/f , в найбільш досконалих перетворювачах реалізовано так зване векторне керування.

Частотний перетворювач електронного типу - це пристрій, що складається з випрямляча (моста постійного струму), що перетворює змінний струм промислової частоти в постійний, і інвертора (перетворювача) (іноді з ШІМ), що перетворює постійний струм в змінний необхідних частоти і амплітуди. Вихідні тиристори (GTO) або транзистори (IGBT) забезпечують необхідний струм для живлення електродвигуна.

Для поліпшення форми вихідної напруги між перетворювачем і двигуном іноді ставлять дросель, а для зменшення електромагнітних перешкод — ЕМС-фільтр.

Перетворювач частоти забезпечує плавний пуск і зупинку двигуна, а також дозволяє змінювати напрям обертання двигуна.

Перетворювач частоти відображає на цифровому дисплеї основні параметри системи: задану швидкість, вихідну частоту, струм і напругу двигуна, вихідну потужність, момент, стан дискретних входів, загальний час роботи перетворювача тощо.

Керування перетворювачем частоти можна здійснювати з вбудованої виносної цифрової панелі керування, або за допомогою зовнішніх сигналів. У

другому випадку швидкість обертання задається аналоговим сигналом 0 - 10 В або 4 - 20 мА, а команди пуску, зупинки й зміни режимів обертання подаються дискретними сигналами. Можна відображати параметри системи у вигляді графіків на виносній графічній панелі керування.

Існує можливість керування перетворювачем частоти через послідовний інтерфейс.

Регульований асинхронний електропривод або частотно-регульований привод складається з асинхронного електродвигуна і перетворювача частоти, який виконує роль регулятора швидкості обертання асинхронного електродвигуна.

Застосування частотно-регульованого електроприводу забезпечує:

- зміну швидкості обертання в раніше нерегульованих технологічних процесах;
- синхронне керування декількома електродвигунами від одного перетворювача частоти;
- заміна приводів постійного струму, що дозволяє понизити витрати, пов'язані з експлуатацією;
- створення замкнених систем асинхронного електроприводу з можливістю точної підтримки заданих технологічних параметрів;
- можливість вимкнення механічних систем регулювання швидкості обертання (варіаторів, ремінних передач);
- підвищення надійності і довговічності роботи устаткування;
- велику точність регулювання швидкості руху, оптимальні параметри якості регулювання швидкості у складі механізмів, що працюють з постійним моментом навантаження (конвеєри, завантажувальні кулісні механізми і тому подібне).

Економічний ефект від впровадження асинхронного електроприводу складається, зокрема, з чинників:

- економія електроенергії в насосах, вентиляторах і компресорних агрегатах до 50% за рахунок регулювання продуктивності шляхом зміни частоти обертання електродвигуна на відміну від регулювання продуктивності іншими способами (дроселювання, увімкнення-вимкнення, напрямний апарат);
- підвищення якості продукції;
- збільшення обсягу продукції, що випускається, і продуктивності виробничого устаткування;
- зниження зносу механічних ланок і збільшенню терміну служби технологічного устаткування унаслідок поліпшення динаміки роботи електропривода.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Призначення інверторів, принцип роботи інвертора, веденого мережею.
2. Автономні інвертори. Сфери використання, класифікація.
3. Головні особливості автономних інверторів струму.
4. Призначення та головні особливості автономних інверторів напруги.
5. З яких елементів складається структура інвертора у загальному випадку.
6. Головні особливості резонансних автономних інверторів.
7. Призначення та класи перетворювачів частоти.
8. Що може забезпечувати частотно-регульований електропривод з використанням перетворювачів частоти.
9. З чого складається економічний ефект від впровадження частотно-регульованого асинхронного електропривода.

Глава 5. Імпульсні перетворювачі змінної та постійної напруги

Регулювання напруги споживача за допомогою імпульсних перетворювачів (ІП) називають імпульсним регулюванням.

У наш час найуживанішими є імпульсні методи регулювання. Це зумовлено отриманням основи стрімкого розвитку напівпровідникових технологій силових електронних напівпровідникових приладів, що можуть працювати у ключовому режимі за досить високих напруг (тисячі вольт) і частот (десятки і сотні кілогерц) – польові і біполярні транзистори, СІТ-транзистори і БТІЗ, спеціальні види тиристорів. Оскільки регулюючий елемент при реалізації імпульсних методів працює як ключ, то втрати енергії в ньому мінімальні, що визначає високий к.к.д. перетворюючих пристроїв.

За допомогою ІП джерело змінної або постійної напруги періодично підключається до навантаження. В результаті на виході перетворювача формуються імпульси напруги. Якщо регулюючий елемент вважати ідеальним ключем та знехтувати опором з'єднувальних проводів, то в інтервалі, коли ключ замкнутий (інтервал провідності), миттєве значення напруги на навантаженні дорівнює напрузі джерела живлення, а в інтервалі, коли ключ розімкнутий (інтервал паузи), миттєве значення напруги на навантаженні дорівнює нулю.

Регулювання напруги на навантаженні можна здійснювати двома засобами: зміною інтервалу провідності ключа при постійній частоті переключень (широко-імпульсний) або зміненням частоти переключень при постійному інтервалі провідності ключа (частотно-імпульсний). При цьому регулюється відносний час провідності ключа, що приводить до плавного змінення середнього або діючого значення напруги на навантаженні.

Способи запирання (комутації) тиристорів.

Заперти тиристор можна: а) зменшив анодний струм нижче струму, що утримує, або приклавши до тиристора зворотну напругу, яка повинна діяти протягом часу, не меншого паспортного часу вимикання $t_{вим}$; б) подачею на керуючий електрод імпульсу, що запирає, (двоопераційний тиристор). Комутація струму тиристором може бути істотною або примусовою.

При істотній комутації джерелом комутуючої напруги є напруга мережі змінного струму (випрямлячі, інвертори, ведені мережею) (рис. 5.1, а, б). Якщо джерелом комутуючої напруги є попередньо заряджений конденсатор або допоміжне джерело енергії постійного або імпульсного струму, то має місце примусова комутація (рис. 5.1. в, г, д, е, ж, з). Усі відомі схеми примусової комутації можуть бути зведені до схем з паралельною або послідовною комутацією.

При паралельній комутації попередньо заряджений конденсатор підключається або паралельно тиристорам, що запираються (рис. 5.1. в, ж, з), або паралельно навантаженню (рис. 5.1. г), при послідовній – послідовно з навантаженням (рис. 5.1. д, е).

У схемі рис. 5.1.в, коли тиристор В закритий, конденсатор С заряджається з полярністю, вказаній на рисунку без дужок. При відкриванні тиристора В виникає коливальний перезаряд конденсатора.

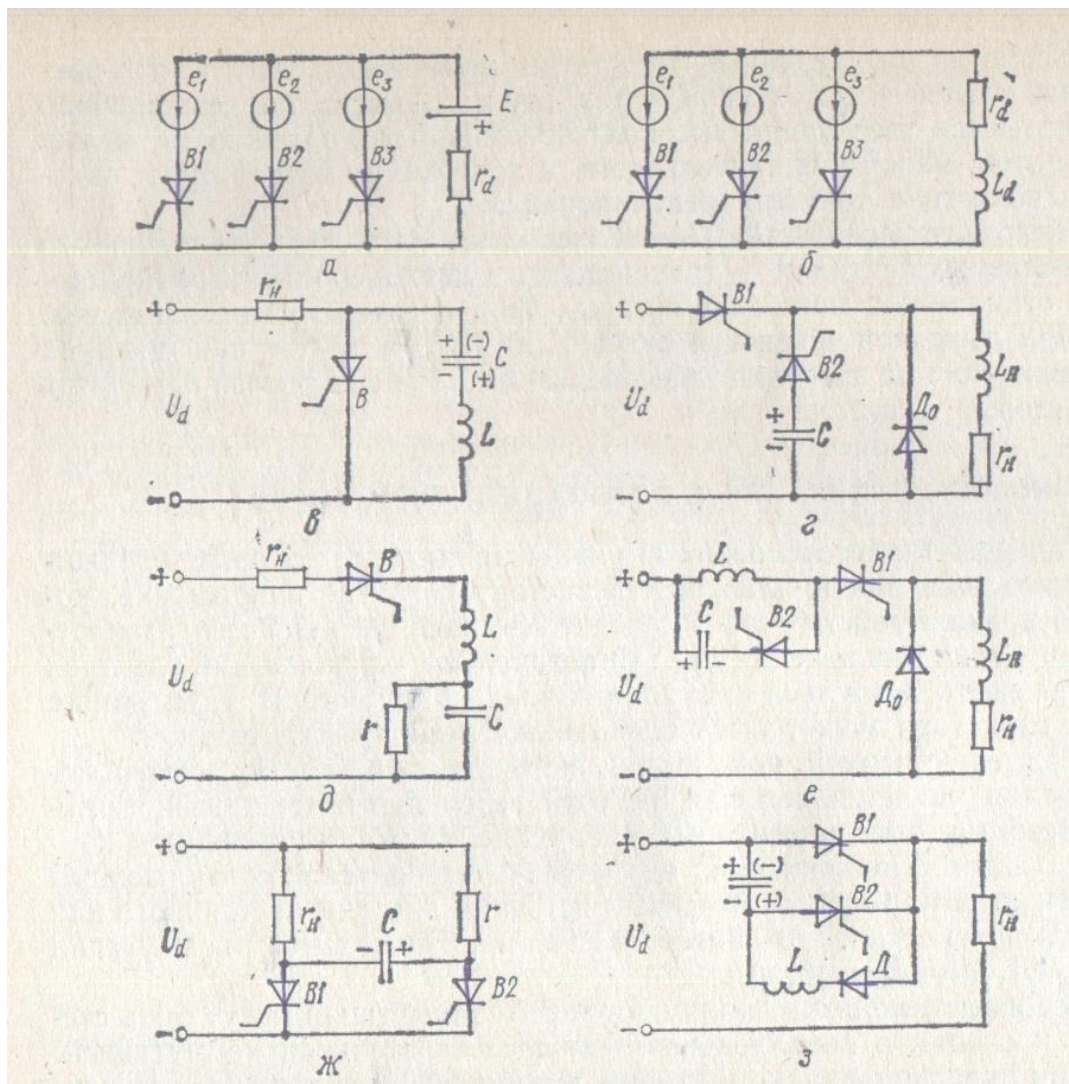


Рис. 5.1. Способи комутації тиристорів

Через півперіоду власних коливань контуру LC полярність напруги на конденсаторі змінюється на зворотну, і в наступний півперіод власних коливань струм перезаряду конденсатора, що наростає, перетікаючи назустріч анодному струму тиристора (струму навантаження), зачинить тиристор в момент рівності нулю сумарного струму.

Комутація струму в схемі рис. 5.1, з відбувається наступним чином. Комутуючий конденсатор C попередньо заряджається від джерела (на схемі не наведений) до напруги, що перевищує U_d з полярністю, що вказана на рисунку. Для запирання тиристора $B1$ відпирається допоміжний тиристор $B2$. При цьому за рахунок струму розряду конденсатора, що тече назустріч анодному струму тиристора по контуру $C-B2-B1-U_d-C$, тиристор $B1$ запирається в момент рівності

нулю сумарного струму. Після запирання тиристора **B1** конденсатор **C** перезаряджається струмом навантаження. Запирання тиристора **B2** і діода **D₀** відбувається, коли напруга на конденсаторі **C** стане рівній нулю.

В схемі рис. 5.1, *д* при відкриванні тиристора **B** виникає коливальний заряд конденсатора **C**. При спаданні струму **LC**-контур (анодного струму тиристора) до нуля виникає запирання тиристора. Резистор **r** служить розряду конденсатора до моменту чергового відкривання тиристора.

Комутуюча напруга може вводитись послідовно в коло тиристора, що запирається, за допомогою допоміжного тиристора **B2** (рис. 5.1, *е*). При відпиранні тиристора **B2** напруга попередньо зарядженого конденсатора ($u_c > U_d$) подається до дроселя **L**. На тиристор **B1** подається зворотна напруга, і він закривається. Контур перезаряду конденсатора на інтервалі комутації відокремлений від кола навантаження закритим тиристором **B1**, і струм в цьому колі не приймає участі в перезаряді конденсатора.

На схемі рис.5.1, *ж* показана одноступенева примусова комутація. При протіканні струму через тиристор **B1** конденсатор **C** заряджається. При відпиранні тиристора **B2** конденсатор **C** розряджається через тиристори **B2** і **B1**, закриваючи останній. Після цього конденсатор перезаряджається та підготовлюються умови для запирання тиристора **B2**.

В схемі рис. 5.1, *з* конденсатор **C** заряджається, коли допоміжний тиристор **B2** відкритий (полярність без дужок). При відпирання робочого тиристора **B1** виникає перезаряд конденсатора **C** через коло, що складається з діоду **D** і дроселю **L** (полярність в дужках). Запирання тиристора **B1** відбувається при відпиранні тиристора **B2**.

5.1. Широтно-імпульсні перетворювачі постійної напруги

Середнє значення напруги на навантаженні U_d регулюється за рахунок зміни співвідношення між тривалостями замкненого і розімкненого станів ключа, коли постійна напруга підмикається до навантаження або ні.

Напруга на виході регулятора має форму прямокутних імпульсів з амплітудою, що дорівнює ЕРС джерела постійного струму.

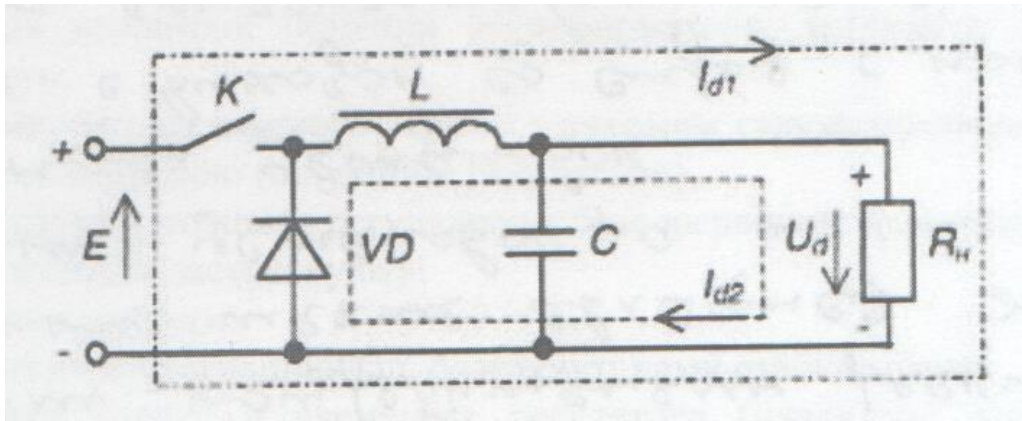


Рис. 5.2 Імпульсний регулятор постійної напруги

Існує кілька таких *методів регулювання*. Основні з них:

❖ Метод *широтно-імпульсного регулювання (ШІР)* полягає у тому, що при сталому періоді надходження імпульсів змінюють їх тривалість – ширину. У результаті маємо:

$$U_d = E \cdot \frac{t_i}{T} = E \cdot \gamma,$$

де E – ЕРС джерела постійного струму;

t_i – тривалість імпульсу;

T – період надходження імпульсів;

$\gamma = t_i / T = (0 \dots 1)$ – коефіцієнт заповнення.

Змінюючи γ , можна змінювати U_d від нуля (при $\gamma = 0$) до E (при $\gamma = 1$).

❖ При *частотно-імпульсному регулюванні (ЧІР)* змінюють частоту (період) надходження імпульсів при їх фіксованій тривалості.

Середнє значення напруги при цьому становить

$$U_d = E \cdot \frac{t_i}{T} = E \cdot t_i \cdot f,$$

де f – частота імпульсів.

Мінімальне значення U_d , що наближається до нуля, отримують при частоті $f \rightarrow 0$, а максимальне, що наближається до E , при $f \rightarrow 1/t_i$.

❖ При *комбінованому регулюванні* змінюють період і тривалість імпульсів.

Останній метод найпростіший в реалізації, але при регулюванні постійної напруги отримання її постійного значення у часі на навантаженні, що

забезпечується, як відомо, за допомогою фільтрів вимагає використання елементів фільтра з масогабаритними параметрами, далекими від мінімально можливих. Це ж стосується і методу ЧПР.

Мінімальні параметри елементів фільтра забезпечує метод ШПР, оскільки при цьому регулятор працює на фіксованій частоті.

До речі, ця частота, як правило, у багато разів перевищує частоту мережі змінного струму, що тим більше забезпечує мінімальні параметри фільтра.

У порівнянні з іншими методами, метод ШПР забезпечує також кращі умови узгодження регулятора з мережею живлення (полегшене подавлення радіоперешкод, що передаються з регулятора у мережу).

Виходячи з наведеного, метод ШПР застосовують найчастіше.

Схема простого імпульсного регулятора наведена на рис. 5.2. Тут у якості фільтра використано Γ -подібний LC -фільтр. При замкненому ключі K навантаження живиться від джерела постійного струму E (струм I_{d1}), а елементи фільтра накопичують енергію. Коли ключ розімкнений, то навантаження живиться енергією, накопиченою у конденсаторі та дроселі. Для забезпечення подачі енергії, накопиченої у дроселі, у навантаження (струм I_{d2}) в схему введено діод VD , який називають зворотнім.

Існуючі схеми ШПП постійної напруги можна класифікувати по ряду ознак.

В залежності від типу напівпровідникових приборів, що застосовуються в силовій частині, імпульсні перетворювачі поділяються на:

а) ШПП на повністю керованих вентилях (транзисторах і двоопераційних тиристорах);

б) ШПП на тиристорах. І ті і другі поділяються на реверсивні та неревверсивні.

Неревверсивні ШПП перетворюють вхідну напругу, що плавно змінюється, в імпульсну напругу з постійною амплітудою та полярністю, але з різною тривалістю.

Ревверсивні ШПП перетворюють вхідну напругу, що плавно змінюється, або в змінну напругу, різну по напівперіодам тривалістю, або в імпульсну напругу з постійною амплітудою, різної тривалості та полярності. В якості реверсивних перетворювачів зазвичай використовують мостові схеми.

Неревверсивні ШПП можна поділити на дві великі групи – паралельні та послідовні.

У *послідовних ШПП* робочий вентиль вмикається послідовно з навантаженням. Характерною особливістю послідовних ШПП є неможливість отримання напруги на їх виході вище напруги джерела живлення.

В *паралельних ШПП* робочий вентиль або накопичувальний дросель вмикаються паралельно навантаженню. Характерною особливістю паралельних

ШП є можливість отримання напруги на їх виході вище напруги джерела живлення.

В залежності від виконання вузлів комутації тиристорні ШП можна розділити на перетворювачі із залежними вузлами комутації (залежні) та перетворювачі з незалежними вузлами комутації (незалежні).

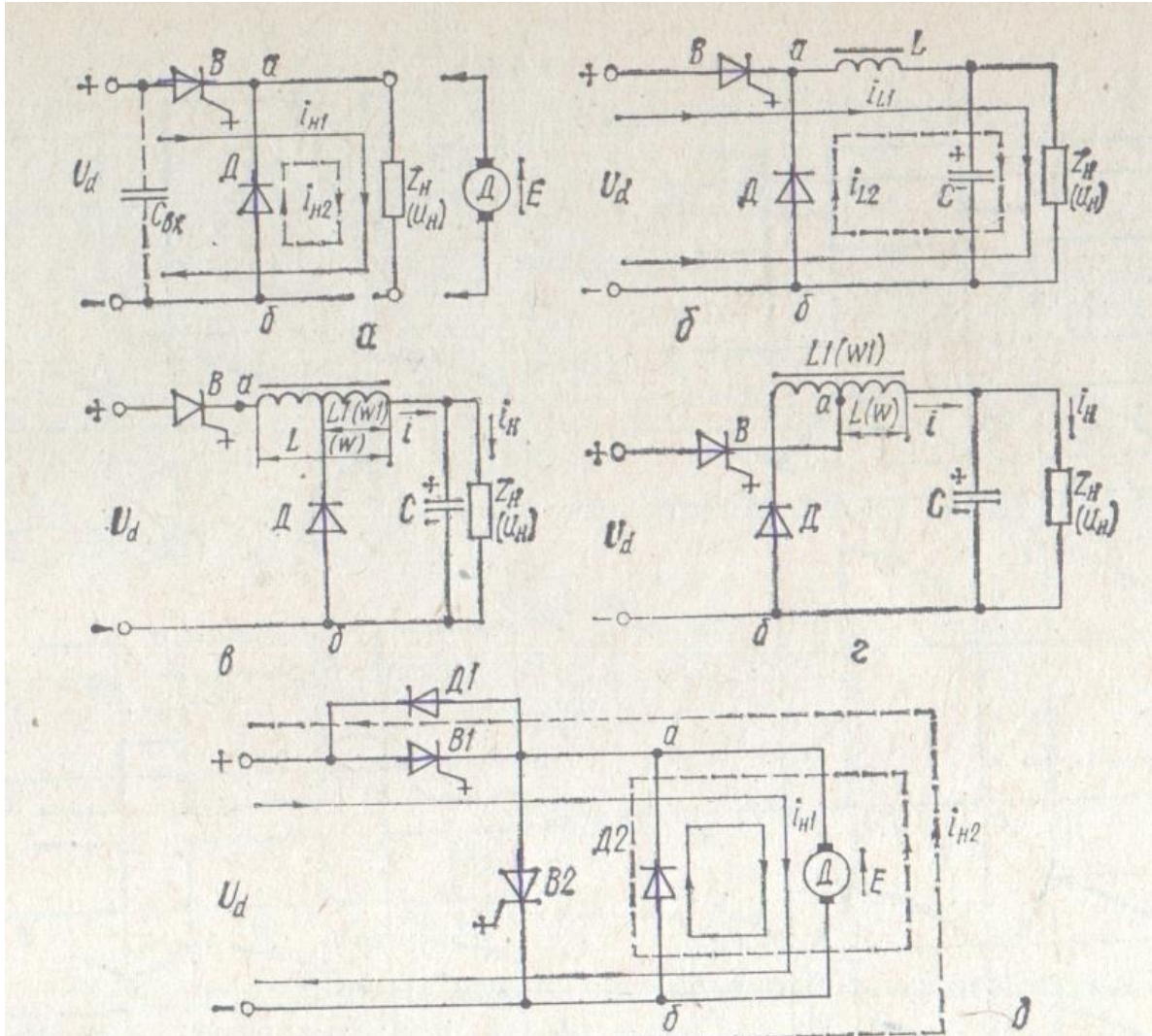


Рис. 5.2. Схеми неререверсивних ШП постійної напруги на повністю керованих вентилях з послідовним ключовим елементом

На рис. 5.2 наведені схеми неререверсивних ШП постійної напруги з послідовним ключовим елементом.

На рис. 5.3 показані алгоритм перемикання вентилів та часові діаграми струмів і напруг в схемі 5.2,а. Коли вентиль **B** відкритий, від джерела живлення споживається енергія (шлях струму показано суцільною лінією). При запиранні вентиля **B** струм навантаження за рахунок ЕРС самоіндукції зберігає свій попередній напрям, замикаючись через зворотній діод **D** (шлях струму показано штриховою лінією).

У зв'язку з тим, джерело живлення, як правило, має індуктивність, для захисту робочих клапанів від перенапруг, що виникають при розриві кола живлення, на вході ШП встановлюється фільтр низьких частот, вихідною ланкою якого є конденсатор $C_{вх}$ (на рис. 5.2, а він показаний пунктиром).

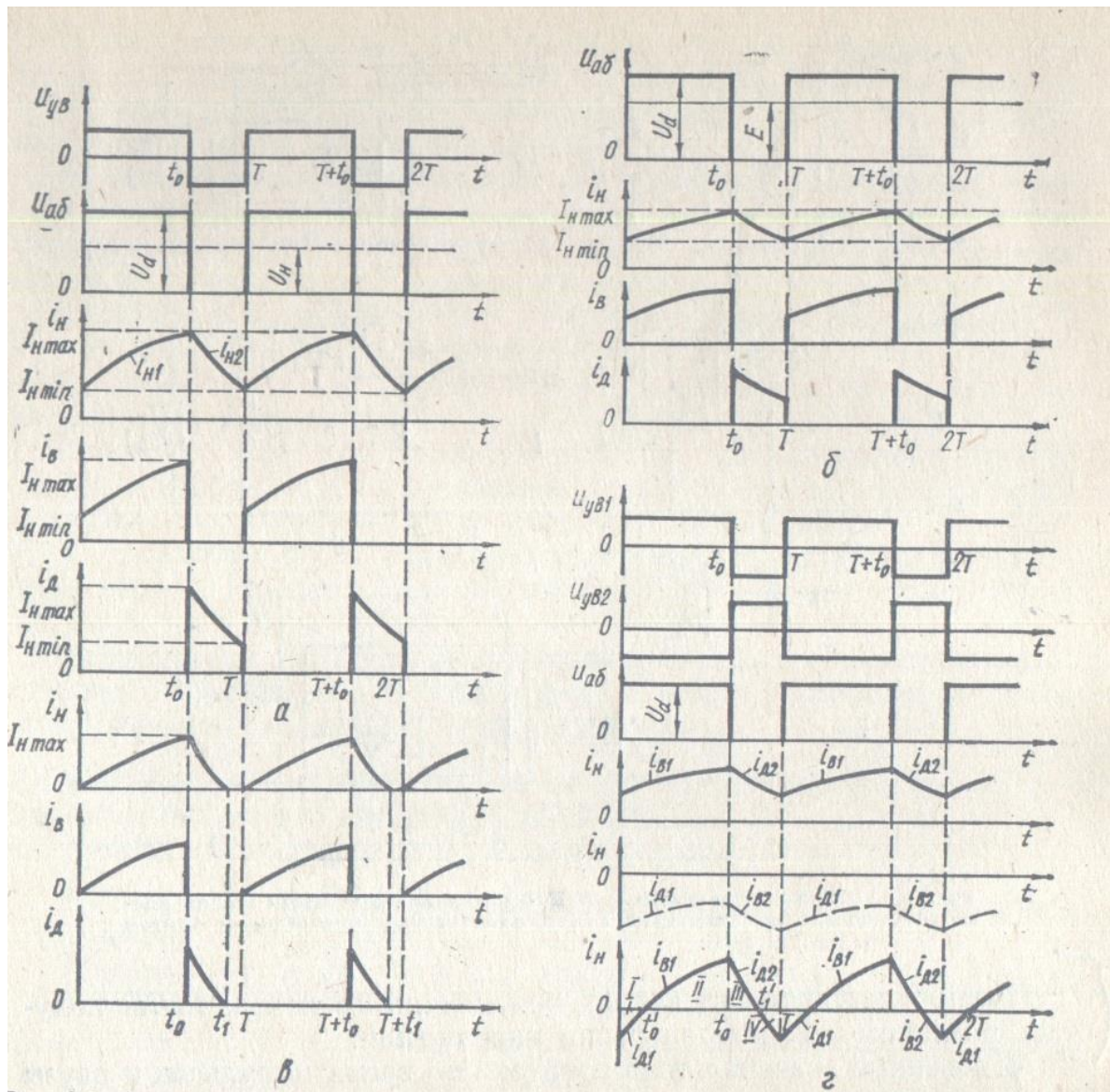


Рис. 5.3. Алгоритми переключення клапанів та часові діаграми струмів і напруг:

а – в схемі рис. 5.2, а при статичному активно-індуктивному навантаженні;

б, в – в схемі рис. 5.2, а при динамічному навантаженні та безперервному (б) та переривчастому (в) струмі навантаження;

г – в схемі рис. 5.2, д.

Середнє значення напруги на навантаженні

$$U_H = \frac{1}{T} \int_0^{t_0} U_d dt = U_d \cdot \frac{t_0}{T} = U_d \cdot \gamma,$$

де $\gamma = \frac{t_0}{T}$ - коефіцієнт заповнення імпульсів.

Змінюючи коефіцієнт заповнення, можна на виході ШПП отримувати різні середні значення напруги.

Середнє значення струму навантаження

$$I_H = I_{\text{ср.в}} + I_{\text{ср.д}} = \frac{U_d}{r_H} \cdot \gamma,$$

тобто, струм навантаження (I_H) повністю визначається середнім значенням напруги та активним опором навантаження.

$I_{\text{ср.в}}$ - середнє значення струму робочого вентиля,

$I_{\text{ср.д}}$ - середнє значення струму зворотного діода.

$$I_{\text{ср.в}} = \frac{U_d}{r_H} \cdot \left[\gamma - \frac{T_H}{T} \cdot \frac{(1-b_1^{-1})(1-a_1 b_1)}{1-a_1} \right],$$

$$I_{\text{ср.д}} = \frac{U_d}{r_H} \cdot \frac{T_H}{T} \cdot \left[\frac{(1-b_1^{-1})(1-a_1 b_1)}{1-a_1} \right],$$

де $a_1 = \exp\left(-\frac{T}{T_H}\right)$;

$b_1 = \exp\left(\frac{t_0}{T_H}\right) = \exp\left(\frac{\gamma T}{T_H}\right)$;

$T_H = \frac{L_H}{r_H}$ – постійна часу кола навантаження.

5.2. Широтно-імпульсні перетворювачі змінної напруги

При великому числі комутацій у годину зростає знос контактів при звичайній дуговій комутації. З цього погляду застосовуються схеми бездугової (безконтактної) комутації за допомогою силових напівпровідникових приладів: діодів (**VD**), тиристорів, двоопераційних тиристорів (**VS**), силових транзисторів (**VT**) (рис.5.4, а).

В даний час основним керованим вентиляльним елементом у силових колах є тиристор. При відсутності сигналу на керуючому електроді (КЕ) тиристор закритий, при подачі на КЕ позитивного сигналу щодо катода тиристор відкривається і здатний пропускати струм у визначеному напрямку як діод. При проходженні змінного струму через нуль тиристор знову закривається, тобто

обривається шлях кола, що комутується. Два зустрічно паралельно включених тиристори являють собою двонапівперіодний ключ однофазного змінного струму Q (рис. 5.4, б), як при фазовому (рис. 5.4, в) так і при широтно-імпульсному (рис. 5.4, з) керуванні.

На основі такого перетворювача можливе здійснення таких наступних операцій:

1). вмикання і вимикання електричного кола з активним і змішаним (індуктивним і ємнісним) навантаженням;

2). змінення струму навантаження за рахунок регулювання моменту подачі сигналу керування тиристорами.

При фазовому керуванні середнє і діюче значення струму міняються за рахунок зміни моменту подачі на тиристор відкриваючого сигналу – за рахунок кута α . Кут α називається кутом керування або кутом вмикання. Діюча напруга на навантаженні при активному характері останньої

$$U_H = \frac{U_m}{\sqrt{2\pi}} \cdot \sqrt{\pi - \alpha + \sin 2\alpha/2} = \frac{U_m}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\pi - \alpha + \sin 2\alpha/2} = U_m \cdot \sqrt{\gamma}, \quad (5.1)$$

$$\gamma = \frac{\pi - \alpha + \sin 2\alpha/2}{\pi},$$

$$U_H = U_{M0} \cdot (1 + \cos \alpha)/2,$$

де U_m - амплітуда напруги живлення;

U_c, U_{M0} - діюче і середнє значення напруги живлення;

γ - кут регулювання.

Крива струму в мережі й у навантаженні несинусоїдальна, що викликає викривлення форми напруги мережі і порушення в роботі споживачів, чуттєвих до високочастотних перешкод. Для зменшення цих викривлень необхідні спеціальні міри.

При широтно-імпульсному керуванні протягом часу t_0 на тиристори поданий відкриваючий сигнал, вони відкриті і до навантаження прикладена напруга мережі. Протягом часу t_3 керуючий сигнал знятий і тиристори закриті. Діюче значення струму в навантаженні:

$$I = I_{H.M.} \cdot \frac{t_0}{t_0 + t_3},$$

де $I_{H.M.}$ - струм навантаження при $t_{закр} = 0$.

Регулювання струму навантаження можливо за рахунок зміни як кута вмикання α , так і кута вимикання при примусовій комутації (здійснюється за допомогою спеціальних вузлів примусової комутації чи двохопераційних

тиристорів, що можуть закриватися подачею сигналу керування). При великих струмах через складність такі схеми не застосовуються. Створення транзисторів на великі струми (сотні амперів) і великі напруги (сотні вольт) дозволяє спростити примусову комутацію кіл постійного і змінного струму, що особливо важливо в апаратах підвищеної швидкодії.

Базова схема (рис. 5.4, б) досить широко використовується при реалізації безконтактних апаратів пуску, керування, захисту .

Досягнення силової електроніки дозволили створити безконтактні комутаційні апарати (БКА), що забезпечують: високу швидкодію; практично необмежений ресурс роботи; відсутність перенапруги при комутаціях і відсутність дуги; можливість роботи у вибухо- і пожежонебезпечних приміщеннях.

Найважливішими перевагами безконтактної комутаційної апаратури є її такі наступні функції, які не можуть бути реалізовані контактною комутаційною апаратурою: струмобмеження; фазовмикання; плавне регулювання потужності, яка підводиться до електроприймача; реалізація плавного безударного пуску і гальмування двигунів.

Найбільше часто мають місце наступні схемні реалізації БКА на базі тиристорів (рис. 5.2).

Такі схемні реалізації тиристорних перетворювачів у силовій електроніці одержали назву широтно-імпульсних перетворювачів (ШІП) змінної напруги. ШІП змінної напруги перетворюють змінну напругу одного рівня у змінну напругу іншого рівня (незмінного чи регульованого) без зміни частоти.

На базі таких перетворювачів працюють такі наступні безконтактні електричні апарати:

- тиристорні пускачі для прямого пуску асинхронних електродвигунів;
- тиристорні пускачі для плавного пуску, реверса і зупинки асинхронних двигунів великої потужності;
- регулятори потужності і напруги;
- автоматичні вимикачі змінного струму високої і низької напруги підвищеної швидкодії;
- регулюючі апарати для керування електродвигунами транспорту змінного струму з рекуперацією енергії при гальмуванні.

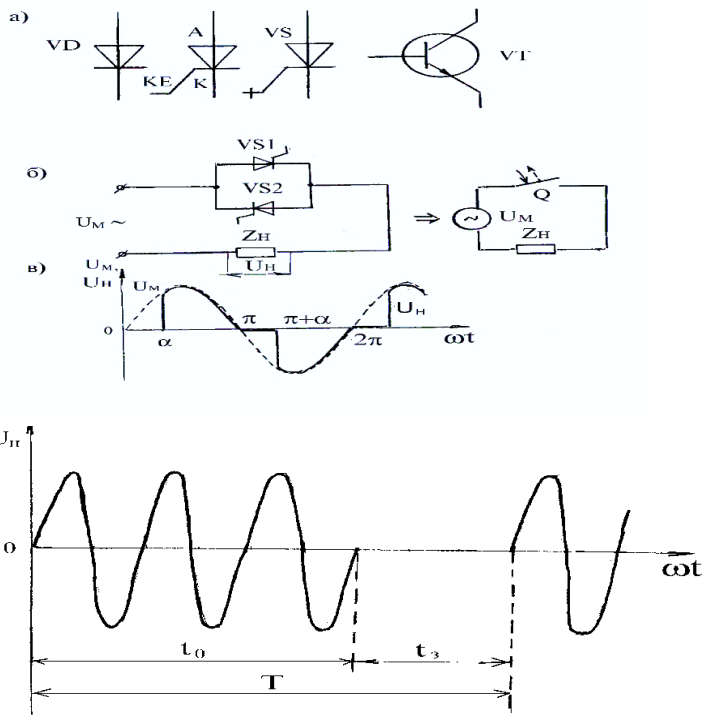


Рис. 5.4. Базова схема безконтактної комутації

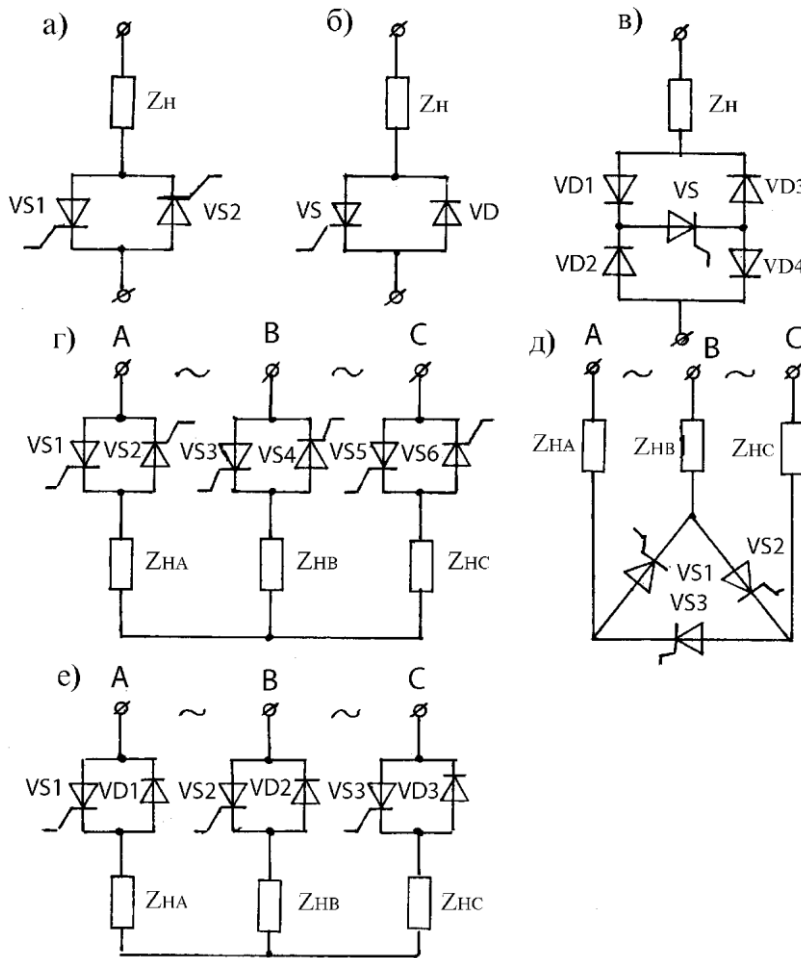


Рис. 5.5. Схеми реалізації БКА на базі тиристорів

Один з базових варіантів схеми тиристорного пускача представлений на рис. 5.6.

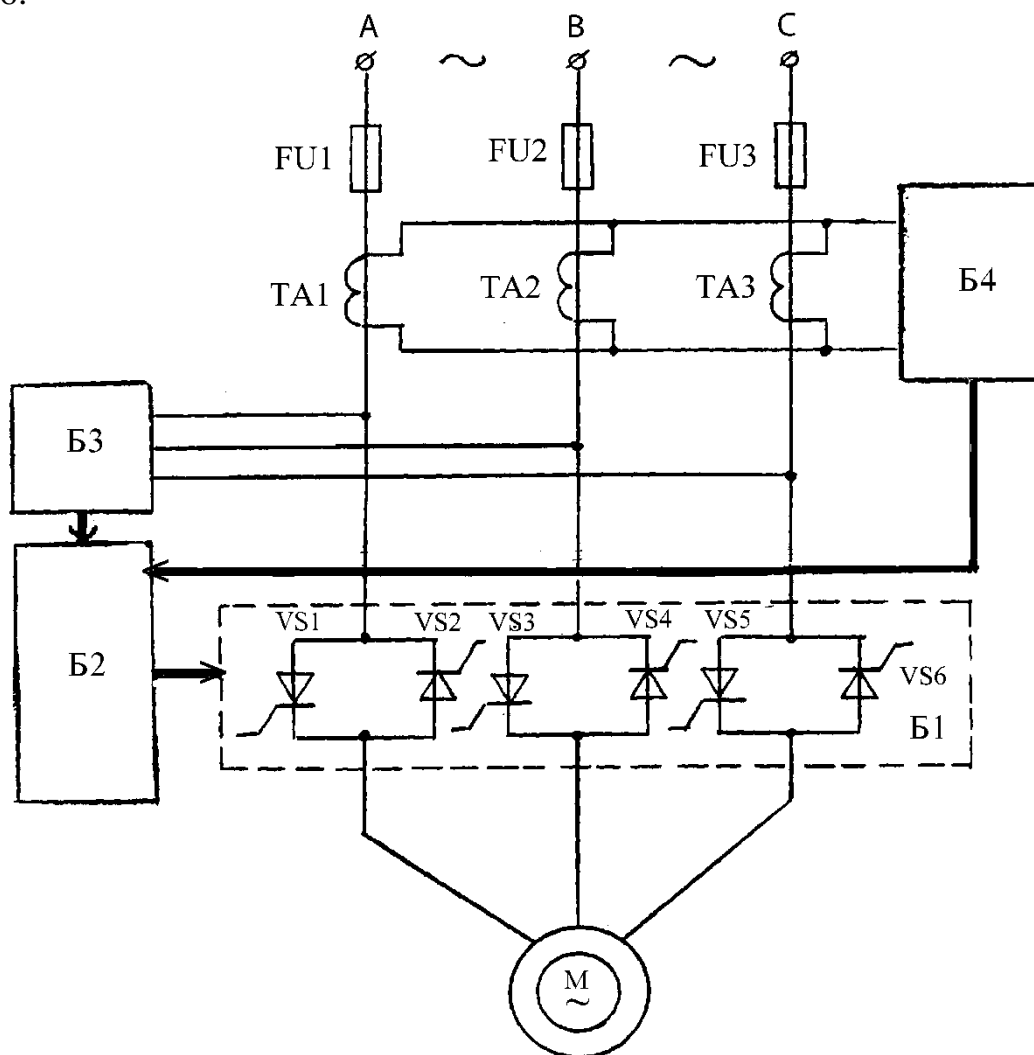


Рис. 5.6. Базова схема тиристорного пускача

Силовий блок **Б1** містить тиристри **VS1...VS6**, розраховані на номінальний і пусковий струми асинхронного двигуна **М**. Тиристри **VS2, VS4, VS6** можуть бути замінені діодами, що знижує діапазон регулювання напруги на виході блоку **Б1** приблизно наполовину, але дозволить істотно знизити вартість пристрою. Сигнали керування тиристорами формуються в системі імпульсно-фазового керування СІФК (блок **Б2**), побудованої найчастіше на базі блокінг-генератора. Блок СІФК одержує живлення від блоку живлення **Б3**, виконаного на базі некерованого трифазного однонапівперіодного випрямляча.

Блок захисту двигуна і силових тиристорів від перевантаження **Б4** при підвищенні струму в статорному колі двигуна **М** дає заборону на подачу відкриваючих імпульсів, на керуючі електроди тиристорів **VS...VS6** з блоку **Б2**. Дозволяє регулювати струм і час спрацьовування захисту від перевантаження в широких межах.

Захист від струмів КЗ. силової мережі здійснюється за допомогою спеціальних швидкодіючих запобіжників *FU1 - FU3*.

Переваги тиристорних пускачів у порівнянні з традиційними контактними:

1. Відсутність дуги при комутаціях дозволяє їхнє застосування у вибухонебезпечних середовищах.
2. Висока електрична зносостійкість (15×10^6 циклів).
3. Досконалий захист від аварійних режимів.
4. Малий час вимикання (0,02 с).
5. Висока надійність і довговічність, зручність в експлуатації.

До *недоліків тиристорних пускачів* можна віднести деяку складність схеми, великі габарити і високу вартість. Однак незважаючи на ці недоліки, тиристорні пускачі і регулятори знайшли широке застосування у вибухо- і пожежонебезпечних виробництвах і інших областях техніки, де потрібно висока надійність роботи.

Тиристорні компенсатори реактивної потужності.

Одними з перспективних пристроїв систем *FACTS* (flexible alternating current transfer system) є тиристорні компенсатори реактивної потужності. Ці пристрої призначені для вирішення завдань компенсації реактивної потужності і підтримки параметрів якості напруги, у тому числі флікерних коливань. Вони знайшли широке застосування на металургійних комбінатах з дуговими сталеплавильними печами (ДСП) і прокатними станами (різко змінне ударне навантаження).



Рис. 5.7. Компенсаторна установка реактивної потужності

Статичні компенсатори реактивної потужності типу *ТКРП* нового покоління на основі застосування мікропроцесорної системи управління

призначені для поліпшення якості електричної енергії промислових мереж напругою 6,3 і 10,5 кВ, що живлять потужні тиристорні електроприводи прокатних станів і шахт, дугові сталеплавильні та руднотермічних печі, інші навантаження з змінним споживанням реактивної потужності.

Переваги застосування ТКРП дозволяють:

- поліпшити якість електроенергії, за рахунок зменшення амплітуди коливань напруги мережі і поліпшення гармонійного складу струму і напруги;
- зменшити струмові навантаження елементів системи електропостачання, тим самим зменшити втрати в них, і тим самим , зменшити плату за активну енергію;
- симетрувати по фазам мережі споживану активну і реактивну потужності при різко змінному і несиметричному характеру навантаження;
- зменшити втрати в електродвигунах, трансформаторах, ЛЕП, збільшити термін служби ізоляції та електрообладнання за рахунок зменшення в мережі вищих гармонік;
- знизити оплату за спожиту і генеруючу реактивну потужність практично до нуля і усунути можливі надбавки до тарифу на електроенергію за споживання реактивної потужності, що перевищує договірні значення, за рахунок автоматичної компенсації реактивної потужності;
- підвищити надійність та енергоефективність енергопостачання за рахунок зменшення повного струму;
- забезпечити режим стабілізації напруги (за окремими вимогами замовника), що актуально для "слабких" мереж.

Універсальність ТКРП.

Вартість виробу оптимальна, оскільки ТКРП і фільтри гармонік проектується індивідуально для кожного окремого випадку їх застосування. Це гарантує досягнення найкращих результатів фільтрації вищих гармонік і корекції коефіцієнта потужності, виключає переплату за "запас потужності" (у разі вибору з стандартного ряду виробів).

Середній термін окупності компенсатора становить близько 2 років.

Кожен виріб проходить комп'ютерне моделювання з параметрами конкретного застосування (з штатною схемою електропостачання і характерними режимами роботи обладнання), з метою перевірки і виявлення можливих резонансних та аварійних явищ.

Принцип дії.

Нелінійні приймачі електричної енергії (наприклад, тиристорні перетворювачі, дугові й індукційні електропечі) в процесі роботи є джерелами гармонійних спотворень в мережі живлення.

Присутність вищих гармонік впливає на роботу електрообладнання: викликає додаткові втрати в електричних машинах, трансформаторах і мережах;

ускладнює компенсацію реактивної потужності; скорочує термін служби ізоляції електричних машин і апаратів; погіршує роботу пристроїв автоматики, телемеханіки і зв'язку; вносить похибку вимірювань приладів.

Для вирішення цих проблем використовують тиристорні компенсатори реактивної потужності ТКРП при різко змінному навантаженні або фільтри гармонік ФГ при змінах реактивної потужності в невеликих межах. ТКРП складається з напівпровідникового стабілізатора потужності НСП, компенсуючих реакторів і фільтрів гармонік.

Фільтри гармонік знижують повний коефіцієнт гармонійних спотворень, наближаючи форму напруги до синусоїдальної, компенсують реактивну потужність до певного рівня.



Рис. 5.8. Місце розташування на підстанції

ТКРП дозволяє підтримувати заданий рівень реактивної потужності (або коефіцієнт потужності) при її змінах в широких межах (від 0 до 100%). Час відпрацювання збурення - до 10 мс.

Компенсатор, структурно-функціональна схема якого наведена на рис. 5.9, виконаний за схемою непрямої компенсації. Процес регулювання і стабілізації реактивної потужності на вводі розподільчої мережі здійснюється за допомогою силової схеми в шафі напівпровідникового стабілізатора потужності (НСП), а джерелом реактивної потужності служить конденсаторна установка, що утворює спільно з фільтровими реакторами силовий резонансний фільтр вищих гармонік $A_1 \dots A_n$.

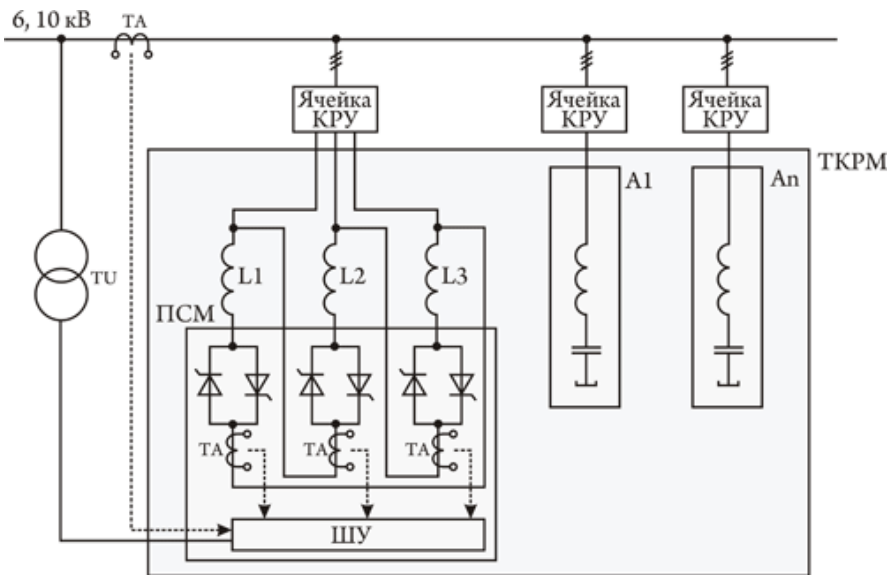


Рис. 5.9. Структурно-функціональна схема компенсатора

Індуктивність фільтрового реактора і ємність конденсаторної установки утворюють послідовний резонансний контур, який при підключенні паралельно до навантаження мінімізує певну вищу гармоніку в напрузі мережі.

НСП і компенсуючі реактори $L_1 \dots L_3$ утворюють три кола з послідовно з'єднаного реактора і пари зустрічно-паралельних тиристорів, з'єднаних в трикутник і підключених паралельно навантаженню і силовим фільтрам.

Компенсатор забезпечує стабілізацію величини, споживаної з мережі реактивної потужності, а також симетрування по фазам мережі, споживаної активної і реактивної потужностей при різко змінній і несиметричному характері навантаження. При цьому на вхід системи управління подаються сигнали напруги, струму мережі та навантаження з вторинних обмоток трансформаторів напруги ТУ і трансформаторів струму ТА.

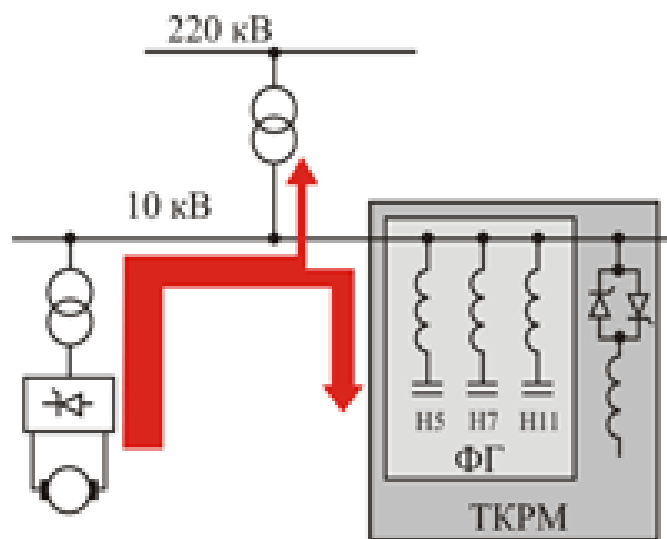


Рис. 5.10. Обмін активною потужністю з мережею

Таким чином, перетоки реактивної потужності відбуваються тільки між споживачами реактивної потужності і ТКРП. З мережі реактивна потужність не споживається і не генерується, відповідно лічильник її не реєструє. Обмін енергією з мережею йде тільки активною потужністю. Візуально це показано на рисунку 6.10, де червоною лінією зображена повна потужність.

Система управління

Управління НСП, захист і сигналізація, автоматичне регулювання здійснюється мікропроцесорною системою управління (СУ). СУ розміщена в окремому відсіку силової шафи. Друковані плати системи управління легко замінити і налаштувати.

СУ уніфікована для всієї номенклатури високовольтних перетворювачів і має:

- вбудовану систему діагностики та записи "аварійного сліду";
- повнофункціональну систему захистів;
- швидкодіючі інтерфейси для зв'язку з обладнанням верхнього рівня,

в тому числі інших постачальників.

СУ дозволяє реалізувати будь-яку об'єктну орієнтацію на вимогу замовника.

При пробі одного тиристора у плечі система управління формує попереджувальний сигнал, але перетворювач залишається в роботі. Пробій другого тиристора в цьому плечі викликає аварійне відключення з відповідним аварійним повідомленням пультового терміналу.

Конструкція.

Основними складовими частинами компенсатора ТКРП є: напівпровідниковий стабілізатор потужності; компенсуючі реактори фільтра вищих гармонік, що складаються з фільтрового реактора і конденсаторної установки.

НСП в залежності від потужності виконаний у вигляді однієї шафи або декількох, що утворюють секцію. Конструктивно НСП виконано у вигляді шаф двостороннього обслуговування, зі ступенем захисту IP21.

Одношафове виконання НСП складається з силової частини і блоку з системою управління, регулювання, захисту та сигналізації. Секція НСП складається з силових шаф і шафи з системою управління, регулювання, захисту та сигналізації.

На лицьовій двері блоку і шафи управління встановлений пульт управління. Він містить рідинно-кристалічний дисплей і блок клавіатури, що складається з семи герметизованих кнопок. Інтерфейс з користувачем реалізований у вигляді меню на РК дисплеї.

Для забезпечення безпеки обслуговуючого персоналу при експлуатації двері шаф НСП забезпечені замками електромагнітного блокування.

Силова частина НСП складається з: послідовного набору зустрічно-паралельно включених тиристорів; осередків управління тиристорів; демпфуючих RC-ланцюжків; вентиляторів системи охолодження.

Компенсуючі реактори можуть мати повітряне виконання або з магнітопроводом.

Фільтрові реактори мають однофазні та трифазні конструкції. Конденсаторні установки силових фільтрів виконані у вигляді рам з встановленими в них паралельно з'єднаними конденсаторами, які захищені високовольтними запобіжниками.

Комплектність поставки.

У комплект поставки входять:

- шафа силова;
- система управління (блок в шафі силовій або окрема шафа);
- компенсуючий реактор;
- фільтри гармонік, що складаються з фільтрового реактора і конденсаторної установки;
- комплект запасних частин, інструменту і приладдя згідно відомості ЗІП на відповідний тип конденсатора;
- комплект експлуатаційних документів згідно з відомостями експлуатаційних документів.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Сутність і засоби імпульсного регулювання.
2. Способи запирання (комутації) тиристорів.
3. Широтно-імпульсне регулювання та частотно-імпульсне імпульсне регулювання в широтно-імпульсних перетворювачів постійної напруги.
4. Класифікація широтно-імпульсних перетворювачів постійної напруги.
5. Схемні реалізації та головні переваги широтно-імпульсних перетворювачів змінної напруги.
6. Які існують безконтактні комутаційні апарати на базі широтно-імпульсних перетворювачів змінної напруги.
7. Базова схема тиристорного пускача або регулятора Їх переваги та недоліки.
8. Принцип дії та переваги тиристорних компенсаторів реактивної потужності.

Глава 6. Схемні реалізації напівпровідникових обмежувачів струмів короткого замикання

Одним з найбільш перспективних пристроїв систем FACTS є напівпровідникові та надпровідникові обмежувачі струмів короткого замикання.

Тиристорний напівпровідниковий обмежувач струму короткого замикання призначений для вирішення проблеми, що виникають у мережах при їх розширенні та посиленні, зокрема, дозволяє знижувати вимоги до відключаючої здатності комутаційної апаратури, що є актуальним для систем електропостачання сучасних потужних промислових підприємств.

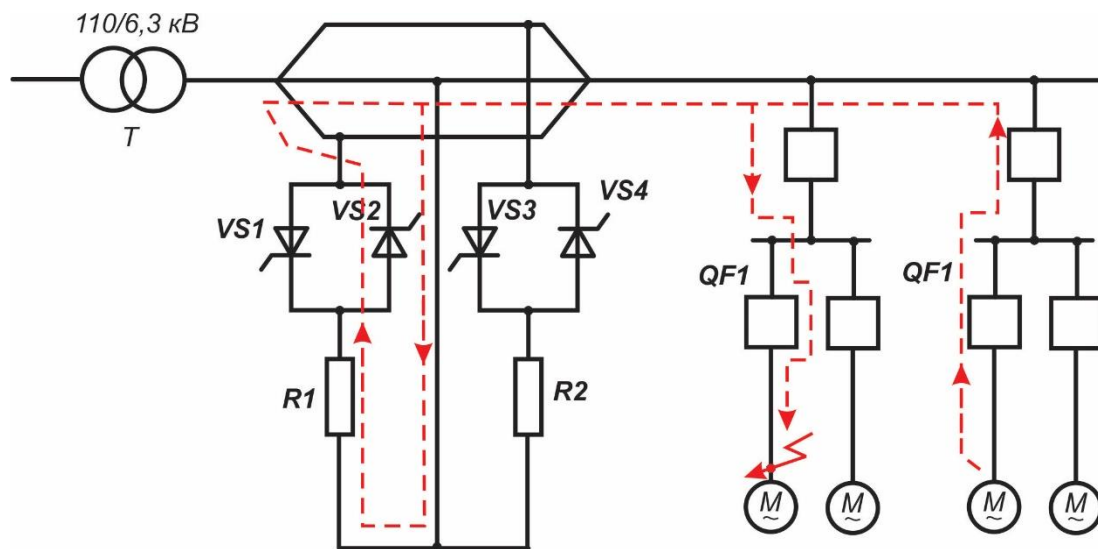


Рис. 6.1. Схема електропостачання з груповим статичним струмообмежувальним пристроєм

Як видно з рис. 6.1, при короткому замиканні в точці К через вимикач пошкодженого приєднання (QF1) протікає сума аварійних струмів - від мережі і підживлення від непошкоджених двигунів. Для обмеження струму короткого замикання, що протікає через вимикач пошкодженого приєднання, на період аварії включають тиристорні обмежувачі струму шунтового типу VS, обмежуючи складову струму короткого замикання від мережі. Після відключення вимикачем QF1 струму підживлення VS відключаються. Ступінь струмообмеження регулюється струмообмежувальним резистором R.

6.1 Особливості напівпровідникових обмежувачів струмів КЗ

Нові ринкові умови призводять до посилення зв'язків мереж, появи незалежних виробників енергії з їх непередбачуваними перетіканнями і вимагають різкого підвищення якості електропостачання.

Підвищення потужності енергосистем супроводжується збільшенням потужності короткого замикання в системі, струмів коротких замикань (СКЗ), посиленням механічних і термічних впливів на обладнання мережі.

В даний час в електричних мережах промислово розвинених країн, як правило, вичерпані запаси комутаційних можливостей апаратури. Це відноситься і до електропостачання великих міст і до проблеми глибокого вводу високої напруги в їх мережі.

Економічні міркування вимагають жорстких обмежень СКЗ в енергосистемах і обмежують можливість заміни обладнання, недостатньо стійкого до збільшення СКЗ. Так, недостатня відключаюча здатність вимикачів вимагає великих витрат на їх модернізацію або заміну. Вартість вимикачів з потрібною відключаючою здатністю (80-160 кА) вище максимальної сьогоденної і за приблизними підрахунками в мережі з напругою 100 кВ може досягати 100-400 тис. дол. Витрати на проектування, монтаж і налагодження збільшать витрати не нижче, ніж на 30%. Для порівняння - турбогенератор потужністю 100 МВт без допоміжних систем коштує близько 1 млн. дол.

Обмеження СКЗ здійснюється оптимальним вибором схеми мережі ще на стадії проектування, поділом мережі як в стаціонарних режимах, так і в аварійних, а також застосуванням різних струмообмежувачів.

Всі традиційні засоби для обмеження СКЗ мають серйозні недоліки, що ведуть до значних втрат і витрат в мережах.

Пасивні обмежувачі - реактори, трансформатори з високим повним опором - негативно впливають на роботу мережі: збільшуються втрати, знижуються якість напруги і межі стійкості.

Активні обмежувачі СКЗ в мережах - комутаційна апаратура і запобіжники, що вимикають частину мережі з коротких замикань, за своїми можливостями не забезпечують захист від руйнуючого термічного і динамічного впливу на обладнання.

Так, при струмах вимикання сучасних вимикачів 63 кА їх час відключення становить не менше 3-5 періодів, і вони не встигають захистити апаратуру. В даний час розробляються надшвидкодіючі вимикачі, в тому числі з використанням силової електроніки.

Обмежувачі струмів КЗ дозволяють з'єднати споживача з потужною мережею або окремі частини мережі без збільшення потужності КЗ системи. Це знижує звичайні в таких випадках витрати на посилення комутаційної апаратури, на підвищення переважувальної здатності кабелів, на підключення до мережі з більш високим класом напруги.

Найбільш ефективним вважається застосування обмежувачів СКЗ в діапазоні середніх напруг, переважно їх включення в розріз систем шин, що з'єднують систему.

Аналіз відповідей на запитальник робочої групи СІГРЕ 13.10 показав, що вартість обмежувачів вважається допустимою в межах 5-10 вартостей одного

вимикача [4]. Необхідне число спрацьовувань ОСКЗ до ремонту або ревізії вказувалося в межах від 5 до 50.

В останні десятиліття активно розробляються ОСКЗ на основі силової електроніки і з використанням високотемпературної надпровідності (ВТНП-ОСКЗ). На думку фахівців, які обговорювали ці питання в Цюріху в кінці 2002р., комерційний випуск обмежувачів на силовий електроніці мав розпочатися в 2004 р., а високотемпературних надпровідникових - в 2010 р.

Проблеми, які вирішуються за допомогою ОСКЗ: зниження потужності РП та його обладнання, зміна топології мережі - поділ її частин або шин, перехід на більш високий рівень напруги, застосування комплексної системи управління для послідовного відключення.

Вплив ОСКЗ на режим мережі: зниження СКЗ, зниження посадок напруги і флікера, зниження гармонік за рахунок того, що повний опір живильної мережі не збільшується, підвищення навантажень в підсистемах мережі, підвищення здатності навантаження трансформаторів при їх паралельному з'єднанні.

Першочергове завдання - розробка обмежувачів СКЗ для мереж середньої напруги 6-35 кВ (СН).

Застосування обмежувачів найбільш ефективно:

- на зв'язку двох систем (в розріз двох систем шин середньої напруги), що дає зниження потужності КЗ всієї системи, зниження імпедансу мережі, що не відключає трансформатори при спрацьовуванні ОСКЗ від питомих фідерів;

- на шинах живлення СН фідерах (послідовно з трансформаторами і генераторами, що працюють на ці шини), що також знижує потужність КЗ, знижує імпеданс мережі, захищає трансформатори і генератори від високих СКЗ;

- на відхідних фідерах СН (послідовно з кожним навантаженням), що, крім вищевказаних переваг, захищає кожен відходячий фідер.

Головні шини розраховані на повний СКЗ (рис. 6.2).

Опитування, проведене робочою групою СІГРЕ А3.10, показав, що найбільш корисним вважається включення ОСКЗ на з'єднаннях шин (52% опитаних), на вході трансформатора (18%), на фідерах (15%) і на вході генератора (15%).

Вимоги до ОСКЗ: малий повний опір в робочому стані, малі втрати, стабільність характеристик в роботі, сумісність з наявними схемами захисту, висока надійність, малі вимоги щодо догляду, безпеку для персоналу, екологічність.

Необхідні параметри, які визначаються місцем включення ОСКЗ: напруга, рівень ізоляції, частота, характеристики струмообмежувачів (струм спрацьовування, обмежуваний струм, який залишається тривало струм, час спрацьовування, тривалість КЗ, час повернення до нормального стану, комутаційні перенапруги).

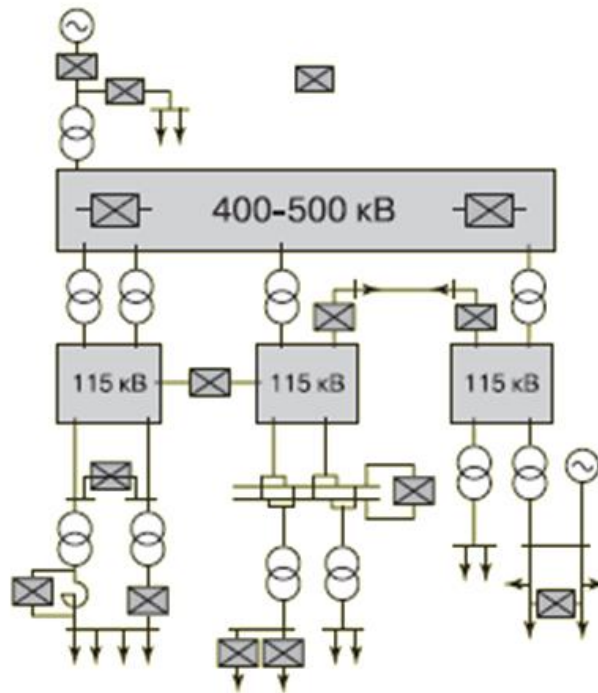


Рис. 6.2. Можливі місця розміщення ОСКЗ в енергосистемі

При виборі типу ОСКЗ враховуються: внутрішня або зовнішня установка, умови обслуговування - нормальні або спеціальні, трифазні або однофазні, вимоги за розмірами і масою, необхідність у зовнішньому роз'єднувачі, вимоги до безперервного контролю апарату [3, 4].

Найбільшою мірою цим вимогам задовольняють надпровідникові ОСКЗ, швидкодія яких майже на порядок вище, ніж у контактних вимикачів.

Це дозволяє обмежити СКЗ вже в процесі його наростання, перш ніж встигає розвинути пошкодження в обладнанні.

Розробки обмежувачів СКЗ з використанням втрати ефекту надпровідності успішно проводяться в декількох країнах світу.

6.2 Розробки напівпровідникових обмежувачів струму короткого замикання останніх років

- Компанія Super-Power Inc. (Філія Intermagnetics General Corp.) успішно перевірила концепцію ВТНП-ОСКЗ Matrix Fault Current Limiter. Прототип ОСКЗ був перевірений на стенді КЕМА при рівні КЗ 27 кА, протягом 50 мсек СКЗ був обмежений до 50%. Реакція ОСКЗ - близько 4 мсек.

- ВТНП-обмежувачі СКЗ на кораблі розроблені компанією Siemens для суднового генератора 4 МВт 3600 об/хв, який виконується також на ВТНП.

- Компанія Nexans SuperConductors GmbH розробила для компаній RWE і EnBW резистивний ВТНП-ОСКЗ на напругу 110 кВ і потужність 340 МВА (Cult

110). Демонстраційний проект на 10 кВ 10 МВА Curl 10 (Current Limiter) в контейнері встановлений в 2004 р. на підстанції Netphen RWE як поєднання двох систем шин. Надпровідник - Bi-2212. Час втрати надпровідності ОСКЗ - кілька мс. Перехід з НП-стану і назад відбувається без зовнішнього втручання. Застосування ВТНП-ОСКЗ дозволяє подвоїти потужність КЗ без переходу струму КЗ за задану межу. Випробування ОСКЗ на 138 кВ повинні були пройти в 2006 р [5].

- Розвитком цієї схеми ВТНП-ОСКЗ є обмежувач типу SuperPower MFCL (Matrix Fault Current Limiter), створений компаніями Intermagnetics Corp. і Nexans. Перший однофазний прототип - на напругу 8,6 кВ і робочий струм 800 А, при рівні КЗ 27 кА, протягом 50 мсек СКЗ був обмежений до 50%. Реакція ОСКЗ - близько 4 мсек. Наступний етап - створення прототипу в принципі до 400 кВ [6].

- Про початок розробок НП-ОСКЗ індуктивного типу в Росії повідомлялося в 2002 р. В даний час існують моделі НП-ОСКЗ невеликої потужності, в тому числі, в ЕНІН, макет - в РНЦ «КІ» [7].

Обмежувачі СКЗ з використанням силової електроніки є новим типом пристроїв FACTS для гнучкого управління лініями електропередачі змінного струму.

Приклади таких пристроїв, розроблених в різних країнах. Розробка Інституту електроенергетики США EPRI являє собою ОСКЗ типу SSCL (Solid State Current Limiter) - пристрій з дуже швидкою реакцією на базі силової електроніки [6]. Для обмеження струму SSCL швидко вводить в коло захищеної лінії опір, який поглинає енергію. Обмеження СКЗ повинно починатися ще до закінчення першого періоду струму. Якщо використовувати GTO-тиристор, можна блокувати напругу 7200 В з дуже великою швидкістю. При досвіді з обмеженням СКЗ 85 кА перемикач з нормальної схеми на додатковий опір тривало менше мілісекунди. Після 200 мкс роботи обмежувача замість того, щоб вирости до кінця напівперіоду до 82 кА, струм утримувався на рівні 22 кА. В принципі, обмежувач повинен діяти до струму 160 кА.

Обмежувач SSCL може спрацьовувати частіше, ніж звичайний електромеханічний вимикач. Початкова мета розробки SSCL - підтримка роботи розподільної мережі при її розширенні без заміни вимикачів. створений однофазний прототип, потім трифазний на напруги розподільчої мережі. Прототипи всебічно випробувані, кінцева фаза - розробка SSCL на 138 кВ.

Найкращим напівпровідником для вентилів SSCL є карбід кремнію; особливо важливо те, що вентиля на його основі допускають високу робочу температуру (до 250°C.). Освоєння карбіду кремнію різко підвищить потужність SSCL, зменшить вартість і розміри пристрою, спростить системи контролю та управління ОСКЗ.

Перелік переваг для мережі і енергосистеми від впровадження ОСКЗ просто величезний.

На рис. 6.3 схема одного модуля SSCL на GTO-тиристорах. Дві ланки тиристорів з зустрічно-паралельною схемою кожний в цій схемі шунтують

варистор. Застосування варистора як поглинач енергії істотно сповільнює процес повернення ОСКЗ в початковий стан.

У цьому сенсі краще описується нижче схема SCCL (Short-Circuit Current Limiter) Siemens з послідовним включенням реактора.

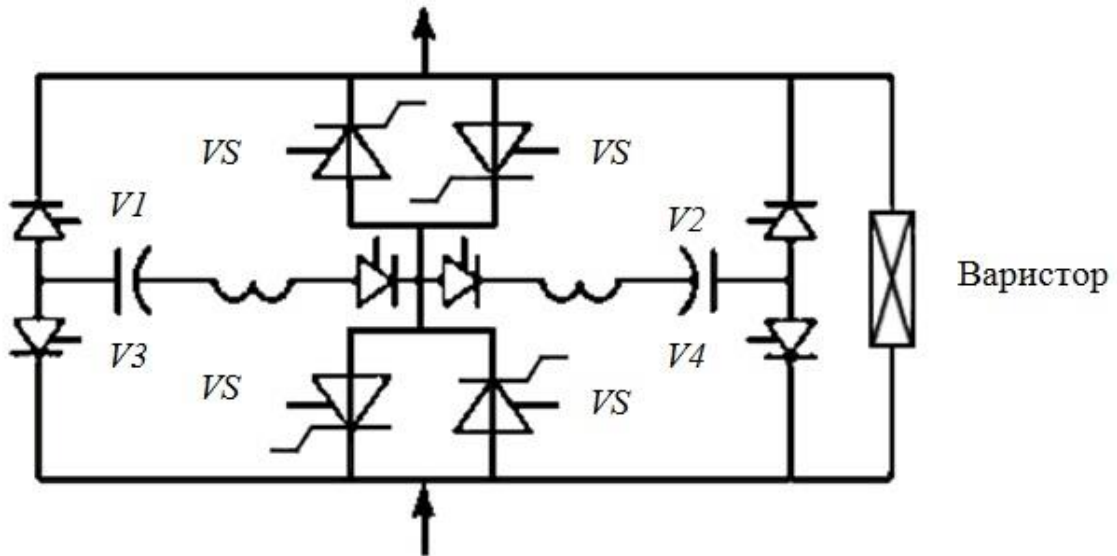


Рис. 6.3. Схема одного модуля SSCL на GTO-тиристорах

Типовий приклад електричних мереж, де особливо потрібні обмежувачі СКЗ - енергосистеми Японії. В даний час струми відключення силовими вимикачами максимально становлять 63 кА. З розширенням мереж у країні знадобляться апарати на 70-80 кА. У зв'язку з цим в Японії активно проводяться розробки обмежувачів СКЗ для мереж 6,6 кВ та 22 кВ як прототипів майбутніх ОСКЗ для мереж УВН. Основний принцип - скорочення часу впливу СКЗ (надшвидкодіючий вимикач).

Розроблений в Японії напівпровідниковий ОСКЗ - комбінація швидкодіючого вакуумного вимикача і зустрічно-паралельних GTO-тиристорів (рис. 6.4). Сигнал на відключення при КЗ подається одночасно на відкриття тиристорів і на відключення вакуумного вимикача. Поки розмикаються контакти вимикача, горить дуга, напруга якої прикладається до тиристорної схеми. Коли струм КЗ переходить на тиристори повністю, по сигналу від системи управління тиристори відключаються. Остаточо СКЗ обмежується паралельно ввімкненим опором.

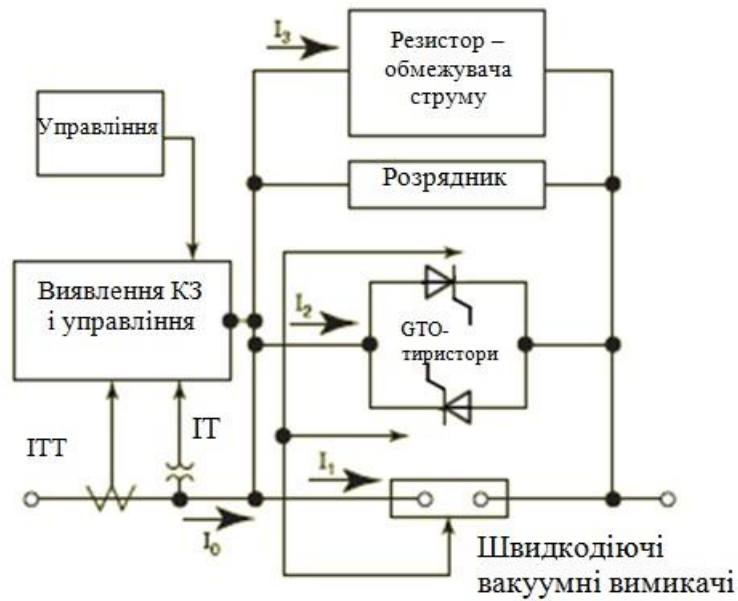


Рис. 6.4. Схема швидкодіючого вимикача (Японія)

6.3 Практичні випробування напівпровідникових обмежувачів струму короткого замикання

Практичні випробування напівпровідникового ОСКЗ проведені в 1998 р., при цьому можливий СКЗ 13 кА був обмежений до 3,5 кА в максимумі.

Час до максимуму обмеженого СКЗ становило 1-2 мс, тобто в 100 разів менше, ніж для звичайного силового вимикача. Учасники розробки ОСКЗ - CRIEPI, Nagoya Univ., TEPCo, Chubu EPCo, Kansai EPCo, Kyushu EPCo [8]. При розробках ОСКЗ компанія Siemens паралельно випробувала ВТНП-ОСКЗ і швидкодіючий напівпровідниковий вимикач на базі повністю керованих вентилів ІГСТ. Схема з двох модулів ІГСТ може відключати великі струми за час до 500 мкс.

На рис. 6.5 порівнюються принципи дії цих ОСКЗ: ВТНП-ОСКЗ після КЗ обмежує струм робочим значенням, ІГСТ-вимикач не дає досягти СКЗ максимального значення і швидко відключає мережу від КЗ.

На думку розробників, обидва варіанти обмеження СКЗ ефективно знижують вимоги до розподільних пристроїв, від яких не потрібно витримувати повний струм КЗ і, відповідно, загальні витрати в мережі.

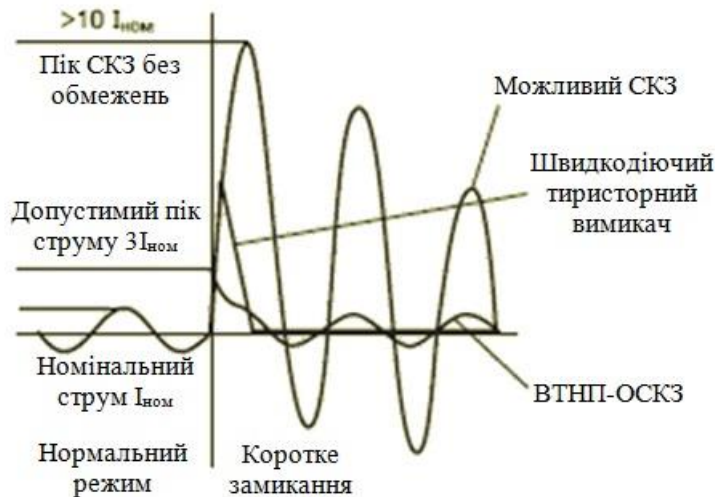


Рис. 6.5. Обмеження струму короткого замикання ВТНП-ОСКЗ і вимикачем з ІГСТ-тиристорами

Варіант напівпровідникового обмежувача являє собою швидкодіючий вакуумний вимикач, який шунтується зустрічно-паралельно ввімкненою групою ГТО-тиристорів. Сигнал про КЗ вмикає тиристори і вимикає вакуумний вимикач. Зростання напруги на дузі між його контактами включає тиристори, і вони беруть струм на себе. Після сигналу на відключення тиристорів СКЗ обмежується резистором, який ввімкнений паралельно всій схемі ОСКЗ.

При випробуваннях схеми на напрузі 6,6 кВ СКЗ 13 кА знижувався до 3,5 кА макс. Час реакції схеми був не більше 2 мс, що в 100 разів швидше звичайного вимикача. Схема обмежувача подібна наведеної на рис. 6.4.

Різні умови обмеження СКЗ відповідають різному застосуванню пристроїв в мережах в залежності від необхідних захисних функцій і потрібної селективності.

Розробка ОСКЗ для мережі 20 кВ зі схемою розподіленої енергетики проводиться в Німеччині Рейн-Вестфальським технічним університетом м. Аахен на базі повністю керованих вентилів IGBT, GCT і GTO.

Завдання - забезпечити час відключення СКЗ менше 100 мікросекунд замість 100 мілісекунд, наявного у звичайного вимикача при послідовному з'єднанні вентилів. Достатня для таких мереж потужність пристрою - 63 МВА.

В кінці 90-х рр. в Німеччині були розроблені тиристорні ОСКЗ для підключення окремих генеруючих установок порівняно малої потужності (наприклад, вітроелектричних установок) до загальної мережі. Обмежувач захищає мережу від КЗ в установці. Прототип LimSoft PE600, розрахований на робочий струм 600 А, напруга 690 В, при випробуваннях в системі обмежив СКЗ 7,7 кА до 2,1 кА, а протягом 3 мс після початку КЗ знизився до нуля. Обмежувач LimSoft PE1000 з номінальним струмом 1000 А може застосовуватися для вітроустановок потужністю 1 МВт [10].

Значний практичний інтерес представляють пристрої обмеження СКЗ в схемах поздовжньої компенсації ліній електропередачі [11]. Нижче описується один з варіантів такого обмежувача як пристрою типу FACTS - розвиток схеми поздовжньої компенсації реактивної потужності з тиристорним захистом конденсаторів (розробка компанії Siemens). Спрощена схема наведена на рис. 6.6.

Поздовжня компенсація з введенням послідовно в лінію конденсатора якби «вкорочує» лінію, зменшує кут електропередачі і підвищує стійкість роботи лінії. Однак при перехідних процесах СКЗ можуть бути причиною перенапруг на конденсаторі, які потрібно обмежити до допустимої величини.

Зазвичай це забезпечується металооксидними розрядниками в поєднанні з пробивним проміжком.

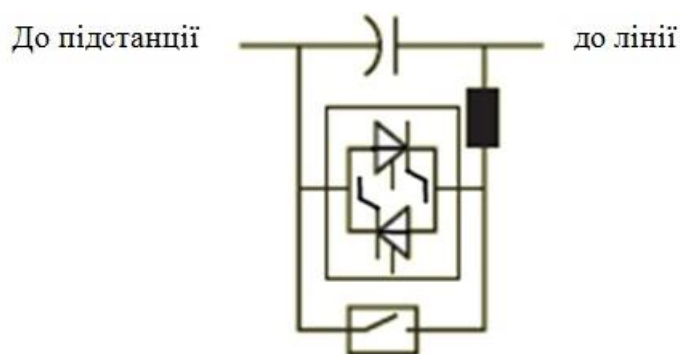


Рис. 6.6. Принципова схема поздовжньої компенсації з тиристорним захистом

При навантаженні струмом короткого замикання на металооксидному резисторі виділяється велика енергія і він сильно нагрівається. З верхньої граничної температури розрядник повинен охолотитися до наступного спрацьовування. Постійна часу охолодження становить кілька годин, і весь цей час компенсація не діє (замкнутий шунтуючий вимикач). Відповідно знижується ступінь компенсації лінії і її здатність, що передається.

Захист розрядним проміжком чутливий до впливу навколишнього середовища, вимагає спеціального догляду. Нове рішення, вільне від цих недоліків, - поздовжня компенсація з тиристорним захистом TPSC (Thyristor Protected Series Compensation).

Пристрій захисту поздовжньої компенсації тиристорами має швидке охолодження після спрацьовування. Звідси - перевага TPSC - повна готовність відразу після загасання КЗ. Таке рішення дозволяє істотно знизити збитки після аварійного режиму.

Три установки TPSC успішно введені в роботу в 1999 і 2000 рр. в США на підстанції 500 кВ в мережі Південної Каліфорнії. На рис. 6.7 показаний загальний вигляд однієї з установок.

Застосовані тиристори - великої потужності, зі світловим керуванням, розраховані на пік струму 110 кА і мають дуже малий час охолодження і, відповідно, відновлення робочих властивостей.

Економія, одержувана при кожному КЗ на одній з трьох ліній, що відходять від підстанції 500 кВ Vincent в США, де встановлена система TPSC, досить істотна. У разі близького до підстанції КЗ всі три лінії переходять в аварійний режим. Збиток від цього становить 270 тис. дол. на кожне КЗ (25 дол. / (МВт • год) при 600 МВт протягом 6 годин).

Зниження шкоди на 90 тис. дол. на лінію відбувається за рахунок швидкого відновлення дії TPSC, за відсутності якої (захист розрядним проміжком і металооксидних резистором) пропускна здатність лінії знижується з 1200 МВт до 600 МВт.



Рис. 6.7. Установка поздовжньої компенсації з тиристорної захистом TPSC на підстанції 500 кВ Vincent (енергокомпанія Південної Каліфорнії)

Швидке введення компенсуючої ємності в схему досягається завдяки дуже короткому часу охолодження тиристорів зі світловим управлінням. На рис. 6.8 показаний процес спрацювання пристрою TPSC.

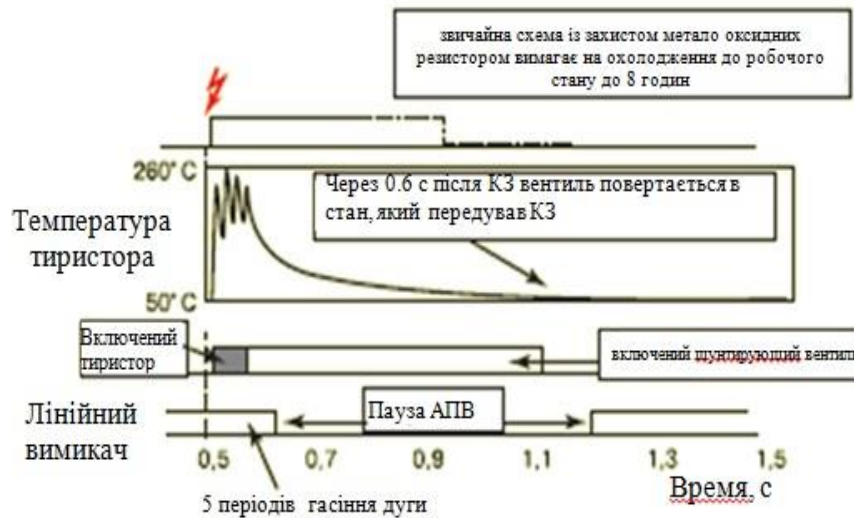


Рис. 6.8. Діаграма роботи тиристорної захисту TPSC

Успішна робота установок з відмінним співвідношенням прибуток/вартість і високою готовністю роботи за жорстким планом привели ще до двох замовлень на встановлення тією ж енергокомпанією.

Приклад спрацювання системи захисту поздовжньої компенсації - реальне КЗ на 500 кВ. Через перші напівперіоди (до струму 5 кА) тиристорна схема взяла на себе ТКЗ і працювала близько 0,6 сек, нагрів при цьому склав 100°C (діаграма рис. 6.8). Успішність експериментів показує можливість використання TPSC для обмеження струмів короткого замикання; у такої системи може бути досягнута висока надійність і готовність найбільша з усіх електронних схем обмежувачів ТКЗ.

При доповненні схеми TPSC реактором виходить обмежувач СКЗ типу SCCL (схема рис. 6.9). Можливе його застосування в мережах як ВН, так і СН. Додаткові можливості пристроїв TPSC і SCCL - можливість демпфірування коливань і підсинхронних резонансів в мережі.



Рис. 6.9. Схема обмежувача SCCL

Подібні дослідження ведуться і в інших країнах, але схема обмежувача СКЗ SCCL найбільшою мірою доопрацьована для використання в електричних мережах.

Дуже ефективною для обмеження струмів коротких замикань комбінація схеми TPSC із зовнішнім реактором (пристрій SCCL - Short-Circuit Current Limiter). Новий пристрій в статичному режимі має нульовий повний опір, а при КЗ за кілька мілісекунд в лінію включається реактивний опір реактора.

На рис. 3.10 показано розміщення вузлів обмежувача SCCL.



Рис. 6.10. Розміщення вузлів обмежувача SCCL

Головний шунтуючий вимикач і струмообмежувальний реактор L_0 (див. більш детальну схему рис. 6.11) змонтовані поза платформи обмежувача, на якій розміщені інші компоненти схеми.

Не показаний на малюнку також шиноз'єднувальний вимикач. Реактори L_1 і L_3 компенсують ємності як тиристорів, так і вимикача. Момент КЗ визначається з трансформатору струму СТ, інші елементи схеми призначені для зовнішнього захисту схеми SCCL. Шунтуючий вимикач працює тільки при дуже великих СКЗ. Типова схема використання SCCL наведена на рис. 6.12. Слід зазначити, що як обмежувачі СКЗ можуть бути використані також ТВП нульової послідовності і пристрої управління потоком потужності GPFC (Grid Power Flow Controller).

При моделюванні КЗ на шинах 2 струм $I_1 + 2$ за рахунок дії ОСКЗ знизився з 80 кА до 50 кА, що дозволяло в якості шиноз'єднувальної ланки при розширенні мережі мати комутаційну апаратуру зі струмом вимикання 63 кА, а не наступного класу по струму.



Рис. 6.11. Схема пристрою SCCL

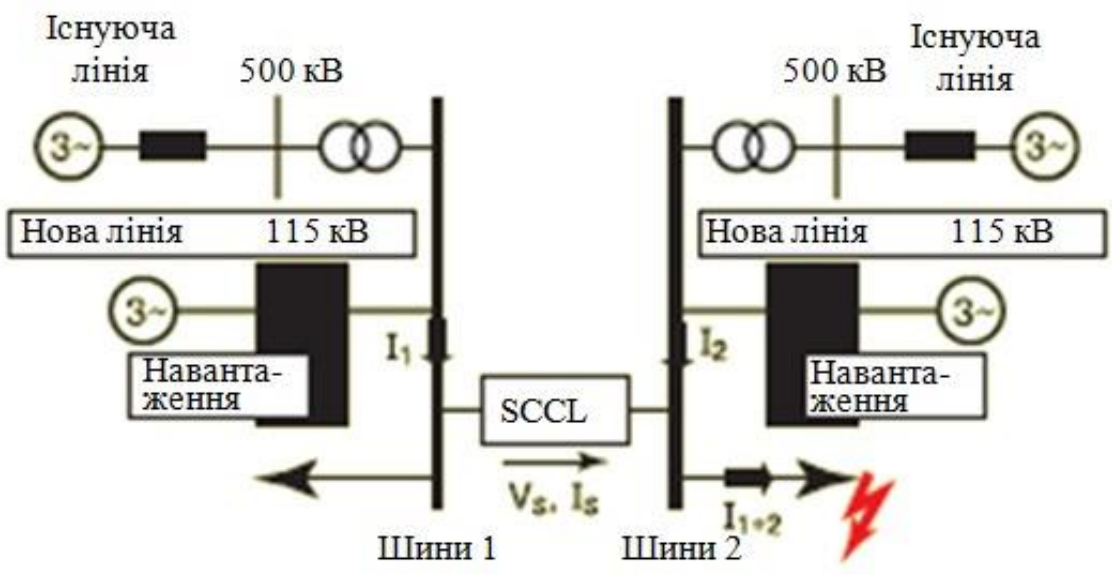


Рис. 6.12. Обмежувач SCCL

При моделюванні КЗ струм I_1 становив відповідно 10 і 40 кА, струм I_2 дорівнював 40кА. Переваги даної схеми - у використанні швидкого вмикання замість вимикання, як це має місце в інших електронних пристроях.

Можна вважати, що ОСКЗ типу SCCL знайдуть застосування не тільки в системах ВН, але і в мережах середньої напруги, наприклад, в мережі власних потреб генераторів на електростанції. На рис. 6.13 приведений варіант включення обмежувача SCCL в кільцевій схемі.

Як система поздовжньої компенсації TPSC, так і ОСКЗ SCCL можуть використовуватися для придушення коливань в системі та ліквідації підсинхронного резонансу, які можуть виникнути при розширенні мережі або появи міжсистемних зв'язків. Такі можливості дають швидкодіюче тиристорне управління струмами в лініях плюс пристрої виявлення коливань і резонансів. Моделювання таких перехідних процесів показало активне їх демпфірування за допомогою як TPSC, так і ОСКЗ SCCL.

Варто відзначити, що запропонована в 1997 р. в Японії схема обмежувача СКЗ послідовно-резонансного типу для мережі 500 кВ аналогічна схемі SCCL. Реактивний опір ввімкнених послідовно конденсатора і реактора в нормальному режимі дорівнює нулю. У разі КЗ зустрічно-паралельна тиристорна схема шунтує конденсатор, і струм обмежується реактором. Так як в нормальних умовах робочий струм через тиристорну схему не протікає, розсіювання тепла незначне.

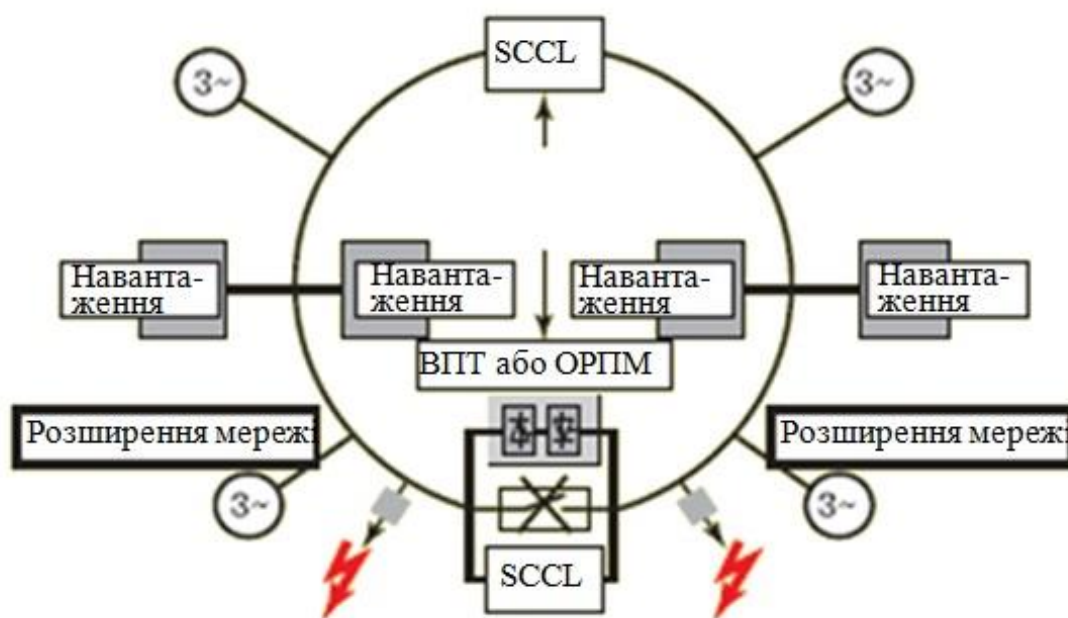


Рис. 6.13. Обмежувач SCCL в кільцевій схемі

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Які основні проблеми дозволяють вирішувати напівпровідникові обмежувачі струмів КЗ.
2. Що вимагає недостатня відмикаюча здатність високовольтних вимикачів.
3. Пасивні та активні обмежувачі струмів КЗ в високовольтних системах електропостачання.

4. Які мають місце впливи обмежувачів струмів КЗ на режими роботи електричної мережі.

5. В яких точках (вузлах) енергосистеми застосування напівпровідникових обмежувачів струмів КЗ є найбільш ефективним.

6. Головні вимоги до напівпровідникових обмежувачів струмів КЗ.

7. Необхідні параметри, які визначаються місцем включення ОСКЗ.

8. Назвіть основні розробки напівпровідникових обмежувачів струмів КЗ останніх років.

9. Переваги напівпровідникових обмежувачів струмів КЗ на базі комбінації швидкодіючого вакуумного вимикача і зустрічно-паралельних включених GTO-тиристорів.

10. Пристрої обмеження СКЗ в схемах поздовжньої компенсації реактивної потужності ліній електропередачі з тиристорним захистом конденсаторів TPSC (Thyristor Protected Series Compensation).

11. Обмеження струмів коротких замикань за допомогою комбінації схеми TPSC із зовнішнім реактором (пристрій SCCL - Short-Circuit Current Limiter).

Висновки

У результаті вивчення навчальної дисципліни студент отримує наступні навички та вміння:

- розрізняти методи аналізу перетворювальних пристроїв;
- розуміти основні схеми випрямлення;
- знати аварійні режими роботи і захист випрямлячів;
- знати енергетичні характеристики випрямлячів і способи їх поліпшення;
- розуміти особливості роботи випрямлячів на різне навантаження;
- розуміти призначення фільтрів;
- розрізняти різновиди інверторів;
- знати особливості регулювання вихідної напруги автономних інверторів;
- розрізняти аварійні режими роботи автономних інверторів;
- розрізняти регулятори-стабілізатори і статичні контактори;
- знати сучасні системи управління перетворювальними пристроями;
- розрізняти сучасні перетворювачі різного призначення.

Літературні джерела інформації

- 1 Шавьолкін О.О. Силові напівпровідникові перетворювачі енергії: навч. посібник / О.О. Шавьолкін; Харків, над. ун-т. міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова. -- Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2015. – 403 с.
- 2 Казачковський М.М. Керовані випрямлячі. Навчальний посібник. Дніпропетровськ: НГА України, 1999. - 229 с.
- 3 Казачковський М.М. Автономні перетворювачі та перетворювачі частоти. Навчальний посібник. Дніпропетровськ: НГА України, 2000. - 196 с.
- 4 Руденко В.С., Ромашко В.Я., Морозов В.Г. Перетворювальна техніка. Частина 1: Підручник. -Київ.: ІСДО, 1996. – 262 с.
- 5 Bock J., Kleimaier M. Supraleitung beginnt Eindring im Netzen.— Elektrizitaetswirtschaft, 2005, 104, No 25, 26-29. Nexans.
- 6 Strombegrenzern gegen Kurzschluss. Bulletin SEV/VSE, 2004, 95, No 18.
- 7 . Meyer C., Schroeder S., De Doncker R.W. Semiconductor switches and limiters for distributed medium voltage systems. - IEEE Trans. on Power Electronics, 2004, No 5, 1333-1340.
- 8 Choi S.S., Wang T.X., Vilathgamuwa D.M. Transmission series compensation with short-circuit current limiting. - IEEE Trans.on Power Delivery, 2005, 20, No 3, 2248-2256.

Методичне видання

Рогоза Михайло Валентинович
Рухлова Наталія Юріївна
Кошеленко Євгеній Валерійович
Бородай Валерій Анатолійович

Конспект лекцій
з дисципліни «Сучасна перетворювальна техніка»
для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

Підготовлено до друку та видруковано
у НТУ «Дніпровська політехніка»
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842 від 11.06.2004 р.
49005, м Дніпро, просп. К. Маркса, 19.