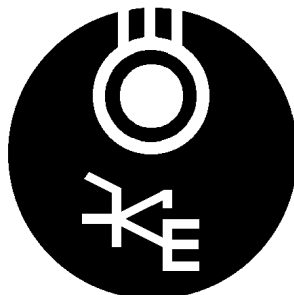


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний технічний університет «ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Електротехнічний факультет  
Кафедра електропривода



М.М.Казачковський

«Силві перетворювачі автоматизованих електроприводів».  
Збірник методичних вказівок до лабораторних занять  
та самостійної роботи  
(Частина 1. Керовані випрямлячі)

для студентів спеціальності 141  
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Дніпро  
НТУ «ДП»  
2018

«Силові перетворювачі автоматизованих електроприводів». Збірник методичних вказівок до лабораторних занять та самостійної роботи (Частина 1. Керовані випрямлячі) для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»/ М.М. Казачковський; НТУ «Дніпровська політехніка». – Д.: НТУ «ДП», 2018 – 66 с.

Упорядник:

Казачковський М.М., канд. техн. наук, проф.

Затверджено до видання редакційною радою НТУ «Дніпровська політехніка» (протокол № 12 від 07.12.2018) за поданням методичної комісії спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (протокол 18/19-2 від 24.10.2018).

Методичні матеріали призначено для самостійної роботи студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» під час підготовки до лабораторних робіт та їх виконання із дисципліни «Силові перетворювачі автоматизованих електроприводів».

Розглянуто побудова та принцип дії основних схем керованих випрямлячів та їх систем керування, що використовуються в автоматизованих електроприводах та суміжних сферах.

Відповідальний за випуск завідувач кафедри електропривода, канд. техн. наук, проф. М.М.Казачковський

## ЗМІСТ

Лабораторна робота СПАЕ-1 «Дослідження трифазного керованого випрямляча у випрямному режимі» . . . . .	4
Лабораторна робота СПАЕ-2 «Дослідження роботи трифазного керованого випрямляча на проти-ЕРС» . . . . .	19
Лабораторна робота СПАЕ-3 «Дослідження однофазних випрямлячів з активним та активно-індуктивним навантаженням» . . . . .	32
Лабораторна робота СПАЕ-4 «Дослідження однофазного мостового випрямляча при роботі на проти-ЕРС» . . . . .	47
Лабораторна робота СПАЕ-5 «Дослідження СІФК однофазного мостового випрямляча» . . . . .	57

# Лабораторна робота СПАЕ-1

## “Дослідження трифазного керованого випрямляча у випрямному режимі”

### 1. МЕТА РОБОТИ

Вивчити особливості роботи керованого випрямляча у випрямному режимі за різного характеру навантаження.

### 2. ПРОГРАМА РОБОТИ

1. Вивчити принцип дії трифазного мостового керованого випрямляча.
2. Вивчити конструкцію силової частини та системи керування.
3. Отримати дані для побудови регульовальних характеристик за активного, активно-індуктивного, активно-індуктивного зі зворотнім діодом та активно-ємнісного навантажень.
4. Вивчити за допомогою осцилографа характер зміни миттєвих випрямлених напруги та струму, а також струму вторинної обмотки трансформатора за різних характерів навантаження та кута керування.

### 3. ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Керовані тиристорні випрямлячі є основним джерелом живлення та засобом керування електричних двигунів постійного струму у промислових автоматизованих електроприводах. Використовуються вони також і в електроприводах змінного струму для живлення обмоток збудження синхронних двигунів та у складі двоступеневих перетворювачів частоти. Найбільш поширеною схемою випрямлячів середньої та великої потужності є трифазна мостова (рис.1). Вона складається з 6 тиристорів  $VS1 \dots VS6$ . Тиристиори з непарними номерами складають анодну групу (у них з'єднані аноди), а з парними – катодну. Як і у будь-якому мостовому випрямлячі, у кожний момент часу відкрито два тиристиори – один з анодної групи, другий – із катодної.

#### 3.1. Робота випрямляча на активне навантаження

Розглянемо спочатку найпростіший випадок роботи випрямляча на активне навантаження (на рис.1  $L=0$ ). На рис.2 зображені діаграми фазних напруг  $u_a, u_b, u_c$ . У кожний момент часу є така пара тиристорів, в яких різниця потенціалів поміж анодом та катодом сприяє їх відкриванню. Так, наприклад, в інтервалі поміж точками  $B$  та  $A'$   $u_b > u_c$ , завдяки чому до аноду  $VS4$  прикладений позитивний потенціал, а до катоду  $VS5$  – негативний. Якщо позитивні керуючі імпульси надійдуть до керуючих електродів тиристорів у момент часу  $B$ , обидва тиристиори відкриються, а на виході випрямляча з'явиться випрямлена напруга  $u_d$ , яка дорівнює на цьому інтервалі лінійній напрузі  $u_{bc}$ . Контуром “фаза  $b$  вторинної обмотки трансформатора –  $VS4$  – навантаження –  $VS5$  – фаза  $c$ ” потече випрямлений струм  $i_d$ .

Якщо і надалі тиристиори отримуватимуть керуючі імпульси у моменти  $C$  ( $VS6$ ),  $A$  ( $VS2$ ),  $B$  ( $VS4$ ),  $A'$  ( $VS1$ ),  $B'$  ( $VS3$ ),  $C'$  ( $VS5$ ), коли потенціал на їх

аноді стає більшим, ніж в інших тиристорах групи (для катодної групи), або потенціал на катоді – меншим (для анодної групи), випрямляч матиме кут керування  $\alpha=0$  і працюватиме як некерований з максимально можливим рівнем вихідної напруги. Точки  $A, B, C, A', B', C'$  зветься точками природної комутації.

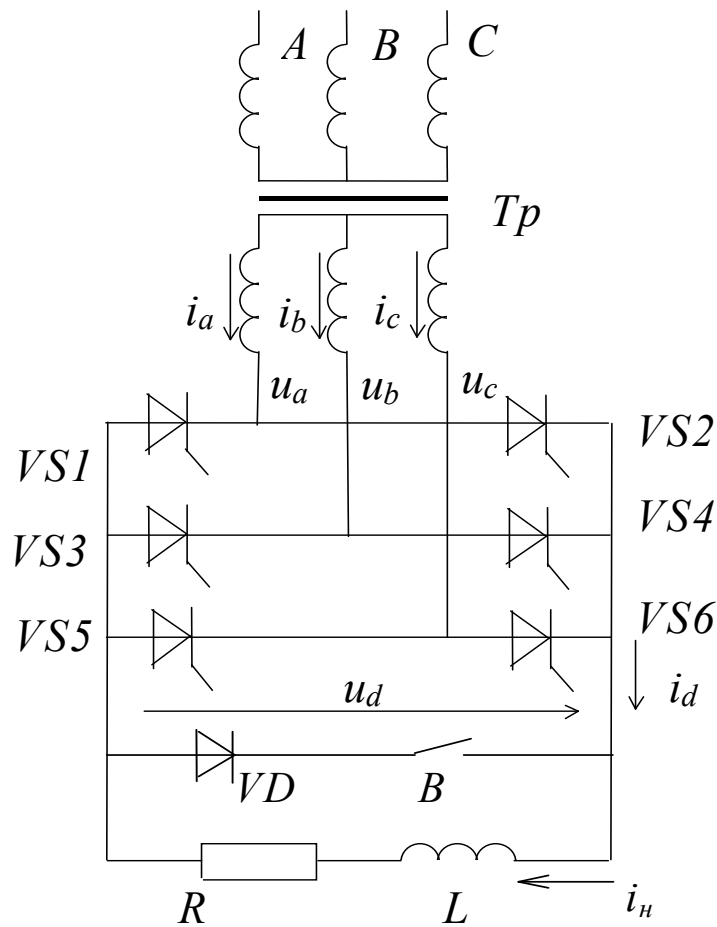


Рис.1 Трифазна мостова схема

Як видно з діаграм роботи тиристорів (нижня частина рис.2), кожен тиристор працює протягом  $120^\circ$ , причому половину цього часу – з одним тиристором протилежної групи, а половину – з іншим. Кожні  $60^\circ$  відбувається відкриття нового тиристора, і до виходу випрямляча прикладається інша лінійна напруга. Таким чином, миттєва випрямлена напруга складається фактично з верхівок синусоїд відповідних лінійних напруг. Якщо навантаження випрямляча суто активне, миттєвий випрямлений струм пропорційний випрямленій напрузі і має ідентичну форму.

У керованому випрямлячі, на відміну від некерованого, є можливість регулювання середнього рівня вихідної напруги. Це здійснюється завдяки регулюванню затримки відкриття тиристорів відносно точок природної комутації. На рис.3 зображені діаграми для випадку, коли тиристори отримують керуючі імпульси із затримкою  $\alpha=45^\circ$  ( $\alpha$  – кут керування).

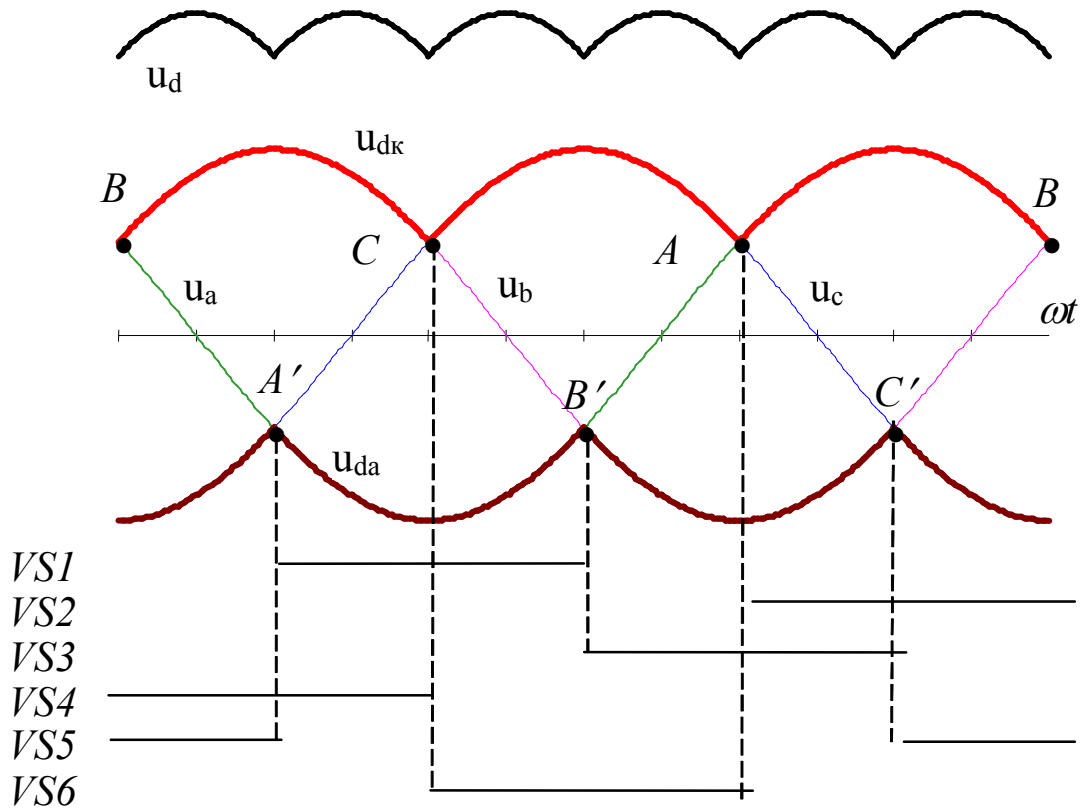


Рис.2 Діаграми фазних та випрямлених напруг некерованого випрямляча

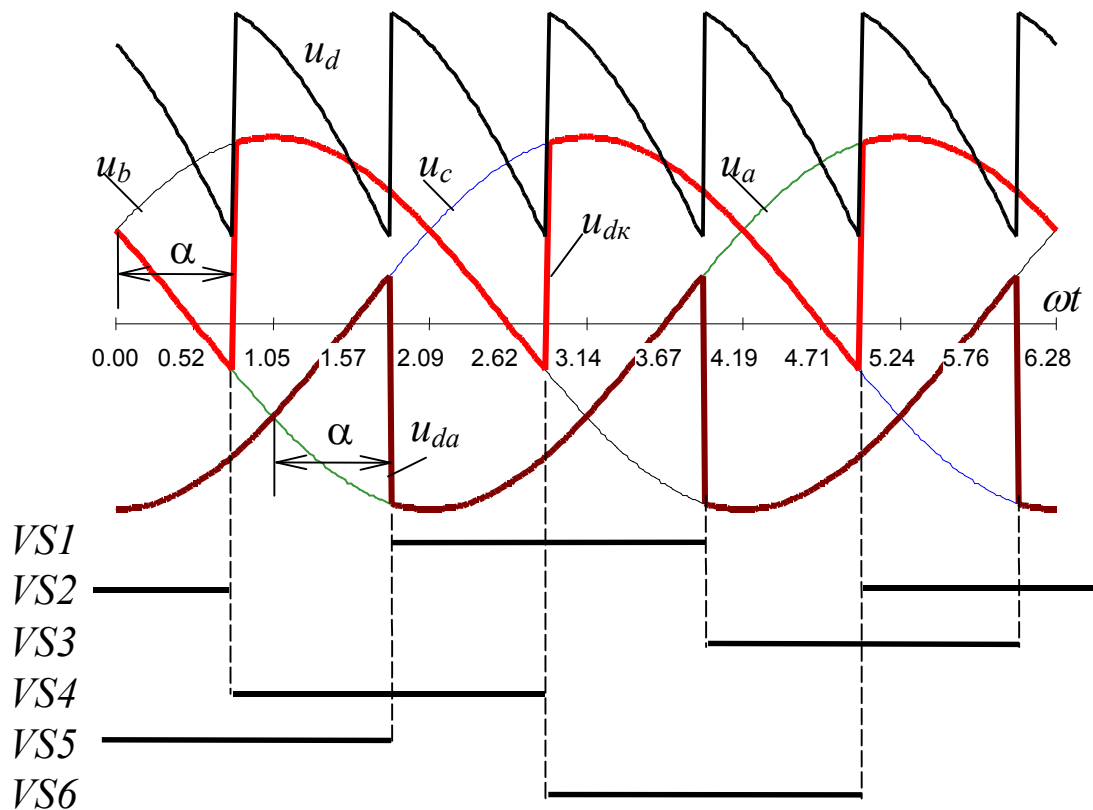


Рис.3 Діаграми фазних та випрямлених напруг керованого випрямляча

На рис.3, як і на рис.2, через  $u_{da}$  позначено напругу поміж спільними точками анодної групи та вторинної обмотки трансформатора, а через  $u_{dk}$  –

поміж спільними точками катодної групи та вторинної обмотки. Миттєва випрямлена напруга  $u_d$  є алгебраїчною різницею цих напруг.

Середня випрямлена напруга  $U_d$ , як видно зі співставлення рис.2 та 3, при зростанні кута керування зменшується. Доки струм безперервний,

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha, \quad (1)$$

де  $U_{d0}$  – максимально можлива напруга (тобто напруга при  $\alpha=0$ ).

Напругу  $U_{d0}$  отримують шляхом інтегрування синусоїди лінійної напруги протягом періоду зміни миттєвої випрямленої напруги. Для трифазної мостової схеми  $U_{d0} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi\sqrt{2}} U_2$  ( $U_2$  – діюча фазна напруга вторинної обмотки трансформатора).

При збільшенні кута керування до  $60^\circ$  миттєва випрямлена напруга перед умиканням чергового тиристора зменшується до нуля. Випрямлений струм стає гранично-безперервним. Подальше збільшення кута керування (рис.4) призводить до того, що випрямлений струм встигає зменшитись до нуля раніш (т.  $D$ ), ніж відкриється черговий тиристор (т.  $E$ ). Хоча лінійна напруга, прикладена до тиристорів  $VS2$ ,  $VS5$  поміж точками  $D$  та  $E$ , стала негативною, струм завдяки однобічній провідності тиристорів змінити знак не може й зникає.

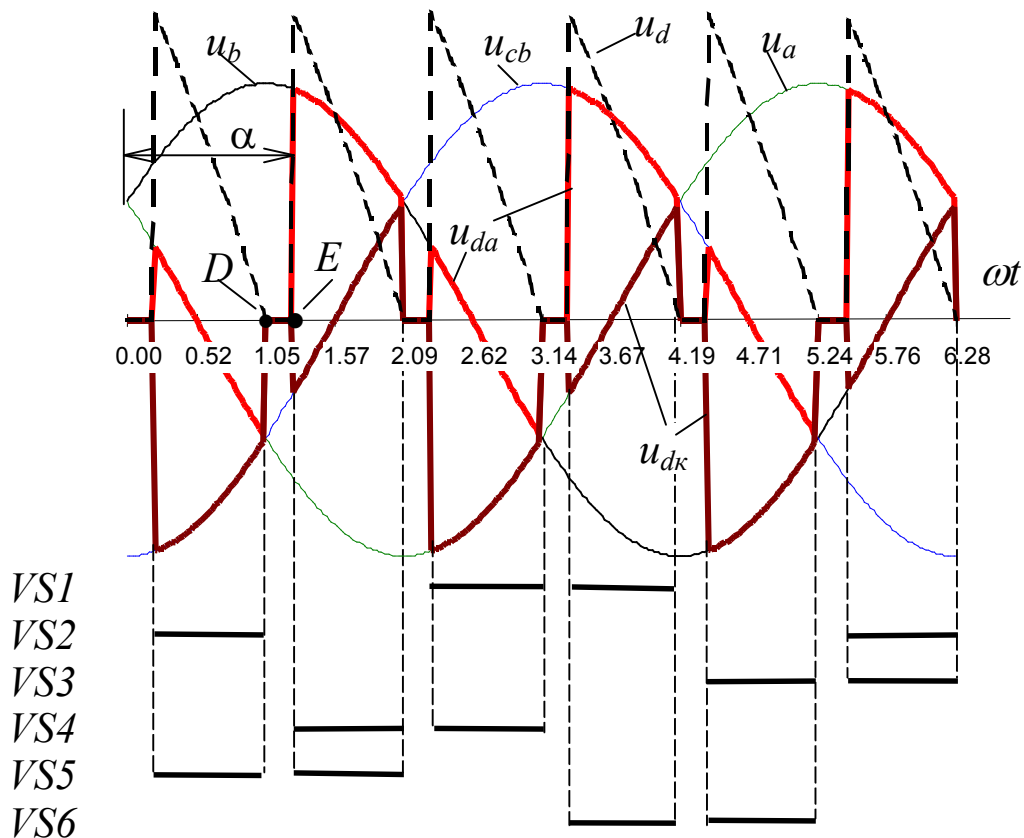


Рис.4 Діаграми напруг у режимі переривистого струму

Оскільки протягом безструмової паузи всі тиристори закриті, відсутня і випрямлена напруга. Щоб у т.  $E$  знову почалося протікання струму, необхідно керуючий імпульс подати не тільки на черговий тиристор (у даному випадку  $VS4$ ), а й на тиристор  $VS5$ , який повинен продовжити свою роботу.

Тому протягом періоду змінної напруги кожний тиристор отримує два керуючі імпульси: перший – свій власний, другий (на  $60^\circ$  пізніше) – від “напарника”, з котрим він повинен працювати другу половину свого інтервалу провідності (т.з. “спарені” імпульси).

Зменшення середньої випрямленої напруги до нуля можна досягти збільшенням кута керування до  $120^\circ$ . У зоні переривистого струму (коли  $60^\circ < \alpha < 120^\circ$ ) завдяки тому, що миттєва випрямлена напруга протягом безструмової паузи не міняє знак, середня напруга  $U_d$  дещо більша тої, що знайдена за формулою (1).

### 3.2. Робота випрямляча на активно-індуктивне навантаження

Якщо у складі навантаження випрямляча є індуктивність (наприклад, коли випрямляч живить обмотку збудження електричної машини), це суттєво змінює характер електромагнітних процесів. Наявність індуктивності робить криву струму більш згладженою порівняно з кривою випрямленої напруги (рис.5). Зрозуміло, цей вплив тим більший, чим більша індуктивність.

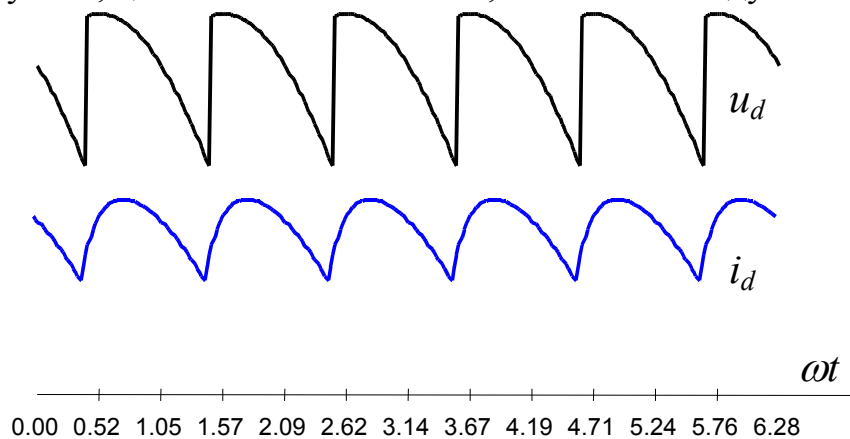


Рис.5 Випрямлені напруга та струм за  $RL$ -навантаження

Завдяки електромагнітній інерції кола навантаження струм не тільки зростає повільніше за напругу, але й має менший темп спадання. Тому при  $\alpha > 60^\circ$ , коли за суто активного навантаження струм стає переривистим, за активно-індуктивного він ще безперервний. Проте при подальшому збільшенні  $\alpha$  паузи у струмі таки з’являються (рис.6).

Характерною особливістю роботи на  $RL$ -навантаження є протікання струму навіть тоді, коли напруга вже змінила знак (між тт.  $D$  та  $F$  на рис.6). Це можна пояснити шляхом аналізу рівняння напруг

$$u_d = i_d R + L \frac{di_d}{dt}. \quad (2)$$

Оскільки внаслідок електромагнітної інерції струм в індуктивному елементі відстає у часі від напруги, то у момент  $D$ , коли  $u_d = 0$ , струм, хоча й зменшується, але ще більший від нуля:

$$i_d = -\frac{L}{R} \frac{di_d}{dt} > 0.$$



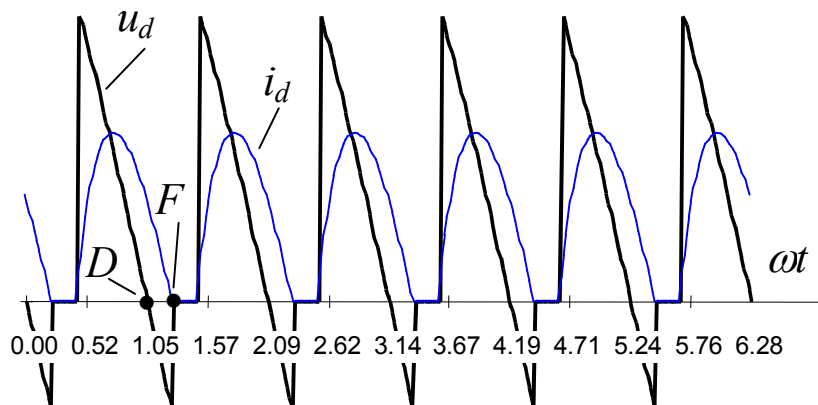


Рис.6. Випрямлені напруга та струм у режимі переривистого струму

І тільки пізніше, у момент  $F$ , коли лінійна напруга (для даного відрізка часу це  $u_{ac}$ ), ставши негативною, зрівнюється з ЕРС самоіндукції

$$u_d = u_{ac} = -e_L = L \frac{di_d}{dt},$$

струм згідно з рівнянням (2) впаде до нуля. Чим більша індуктивність, тим більшою повинна бути та напруга, за якої це станеться, і тим пізніше це станеться.

Якщо ліворуч т.  $D$  енергія споживається від випрямляча (частково перетворюючись на енергію електромагнітного поля індуктивних елементів), то поміж т.  $D$  та  $E$  частина накопиченої в електромагнітному полі енергії повертається через випрямляч до живильної мережі.

Для будь-якого кута керування (не надто близького, однак, до  $180^\circ$ ) є така досить велика індуктивність, яка забезпечить відсутність пауз струму взагалі. Оскільки виникнення пауз викликає небажані коливання струму, при замалій індуктивності навантаження до кола випрямленого струму послідовно вмикають додатковий згладжувальний дросель потрібної індуктивності.

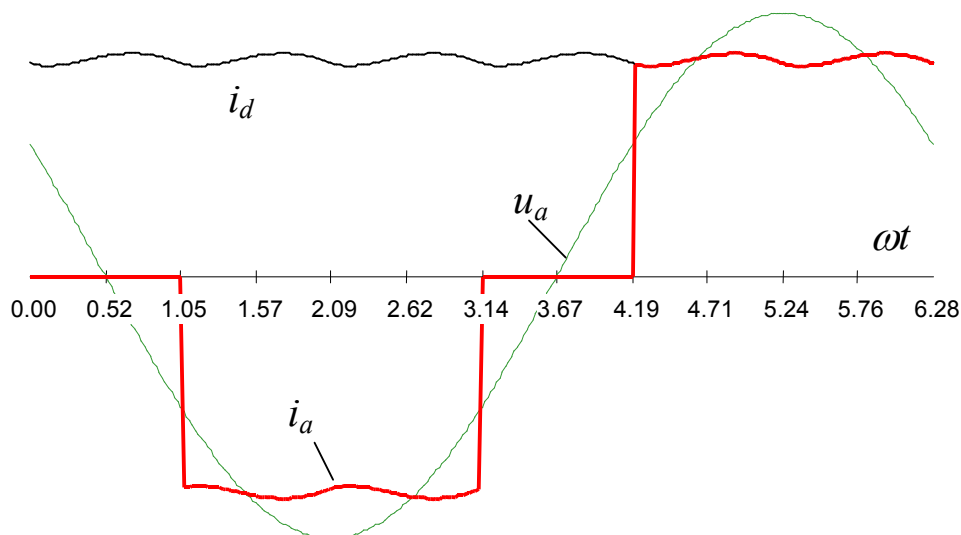


Рис.7 Фазний струм, споживаний випрямлячем (безперервний випрямлений струм)

Струм у фазі вторинної обмотки трансформатора протікає тоді, коли відкритий один із тиристорів цієї фази. На рис.7 зображена діаграма струму

фази  $a$  при  $\alpha=0$ . Як видно, струм суттєво несинусоїдальний, причому фазовий зсув відносно фазної напруги відсутній. За формою фазний струм повторює випрямлений.

Збільшення кута керування, окрім ще більшого погіршення гармонійного складу струму, призводить до його фазового зсуву відносно живильної напруги (рис.8). Величина цього зсуву дорівнює куту керування. Тому потужні керовані випрямлячі суттєво погіршують режим роботи системи електропостачання, стаючи джерелом вищих гармонік та реактивної потужності.

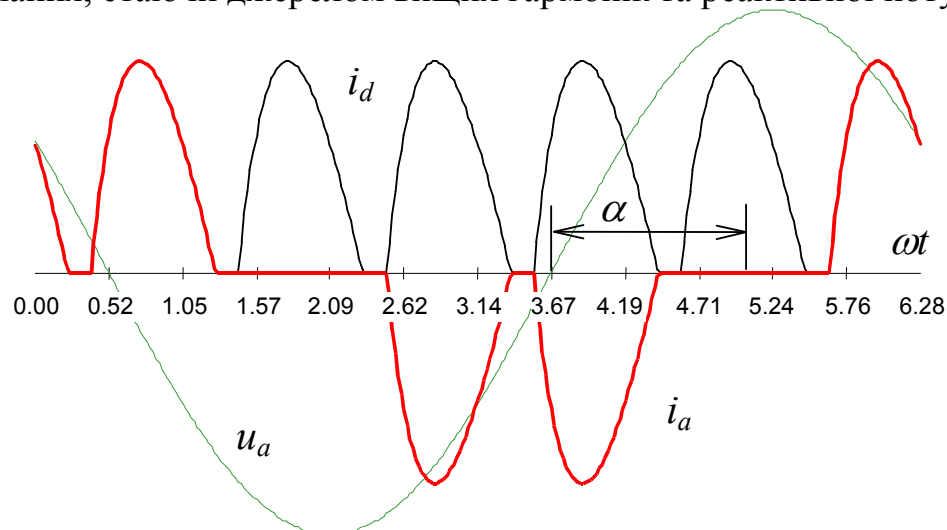


Рис.8 Фазний струм, споживаний випрямлячем (переривистий випрямлений струм)

### 3.3. Робота випрямляча на активно-індуктивне навантаження зі зворотним діодом

Після зникнення випрямленого струму та закривання тиристорів (праворуч т.  $F$  на рис.6) ЕРС самоіндукції прикладена до тиристорів, які щойно закрились. За досить великої індуктивності це може призвести до перенапружень та виходу тиристорів з ладу. Шунтування активно-індуктивного навантаження зворотнім діодом (вимикач  $B$  на рис.1 увімкнено) дозволяє запобігти цьому, а також фактично ліквідувати паузи струму. Вплив зворотного діода на перебіг електромагнітних процесів виявляється тільки за досить великих кутів керування, коли миттєва випрямлена напруга тимчасово змінює знак.

На рис.9 зображені напруга та струм для тих самих параметрів кола та кута керування, що й на рис.6, але зі зворотнім діодом. Поки випрямлена напруга позитивна, діод закритий і ніяк не впливає на процес зміни струму. Проте коли напруга знижується до нуля (т.  $D$  рис.9), ЕРС самоіндукції (яка у цей час направлена згідно зі струмом, що знижується) відкриває діод. Струм у колі навантаження продовжує протікати у тому ж напрямку, замикаючись тепер через діод. Електромагнітна енергія, накопичена в індуктивних елементах, перетворюється на тепло в активному опорі та діоді. Струм на інтервалі  $DG$  знижується досить повільно, оскільки до навантаження на цьому інтервалі не прикладена негативна напруга (на відміну від рис.6). Тому він не встигає впасти до нуля, коли у т.  $G$  відкривається наступний тиристор і знову

починається зростання струму. На інтервалі  $DG$  тиристори, зашунтовані відкритим діодом, закриті, і струм у випрямлячі відсутній.

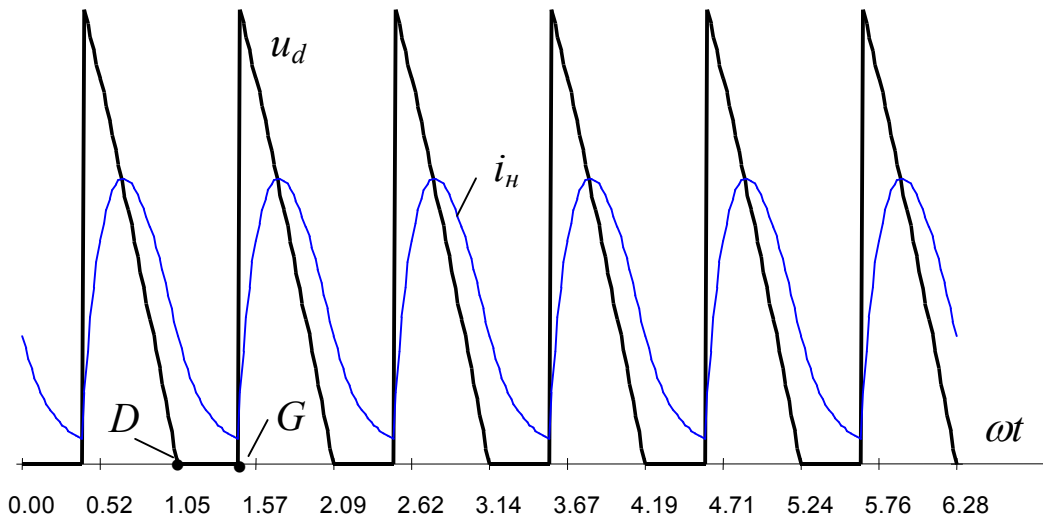


Рис.9 Вплив зворотного діода на форму випрямлений струму та напруги

### 3.4. Робота випрямляча на активно-ємнісне навантаження

Коли керований випрямляч працює у складі перетворювача частоти з ланкою постійного струму і живить автономний інвертор напруги, то поміж ним та інвертором завжди ввімкнений ємнісний фільтр із досить великою ємністю. Тому, хоча навантаження інвертора активно-індуктивне, навантаження випрямляча завжди переважно активно-ємнісне. На рис.10 зображена схема заміщення для випадку активно-ємнісного навантаження.

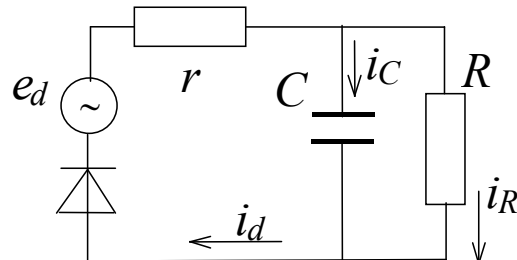


Рис.10 Схема заміщення для випадку активно-ємнісного навантаження

Тут  $C$  та  $R$  – ємність та активний опір навантаження,  $r$  – внутрішній опір випрямляча (для випадків активного та активно-індуктивного навантаження ми їм нехтували, але тепер без урахування цього опору аналіз процесів буде неможливий),  $e_d$  – ЕРС випрямляча. Однобічна провідність випрямляча відображена на рис.9 включенням діода.

На рис.11 зображений перебіг процесів за досить малого кута керування. Поміж точками  $A$  та  $D$ , доки напруга на конденсаторі  $u_C$  менша за ЕРС випрямляча, відбувається його заряд, який супроводжується споживанням енергії від випрямляча. Струм заряду  $i_C$  протягом цього процесу зменшується. Коли напруга на конденсаторі сягає ЕРС випрямляча (т.  $B$ ), починається розряд конденсатора на опір  $R$ . Енергія електричного поля, накопичена у конденсаторі на інтервалі  $AB$ , віддається до резистора, підтримуючи рівень напруги на ньому і не даючи їй упасти так швидко, як ЕРС випрямляча. Оскі-

льки ЕРС випрямляча продовжує зменшуватись й стає меншою за  $u_C$ , тиристор закривається і струм випрямляча

$$i_d = \frac{e_d - u_C}{r}$$

зникає. Таким чином, випрямлений струм завжди переривистий.

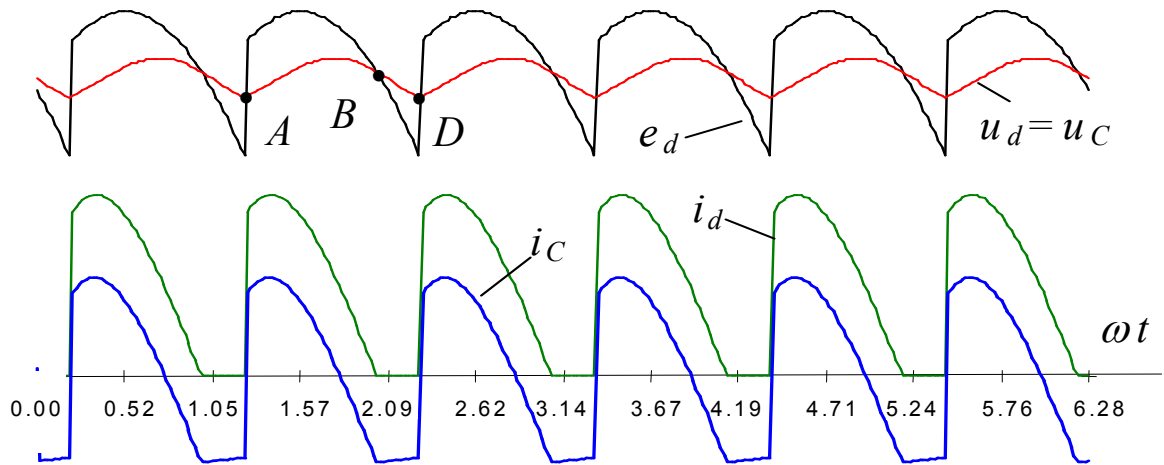


Рис.11 Процеси за малого кута керування

Оскільки  $R \gg r$ , зміна струму конденсатора при розряді відбувається набагато повільніше, ніж при заряді. Після відкриття наступного тиристора знову зростає ЕРС випрямляча (т. D) і знову починається заряд конденсатора. Струм в активному опорі  $i_R$  за формою повторює прикладену до нього напругу, тобто  $u_C$ . Як видно з рис.11, наявність конденсатора у складі навантаження призводить до згладжування кривої вихідної напруги.

При збільшенні кута керування зростає стрибок ЕРС випрямляча у момент відкриття чергового тиристора. Це призводить до збільшення початкового стрибка струму заряду (рис.12).

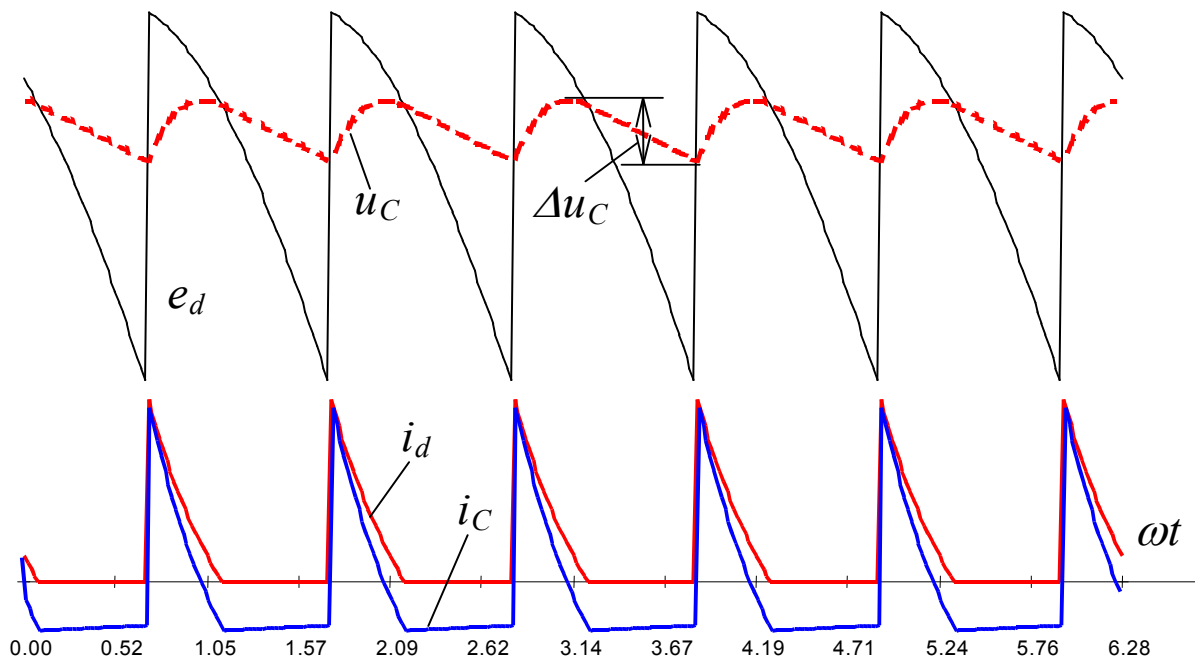


Рис.12 Процеси за великого кута керування

### 3.5. Регулювальні характеристики керованого випрямляча

Регулювальна характеристика відображає залежність вихідної величини (середньої випрямленої напруги  $U_d$ ) від вхідної (кута керування або задавальної напруги).

На рис.13 зображені приклади регулювальних характеристик  $U_d=f(\alpha)$  для різних видів навантажень. Доки струм безперервний, усі характеристики співпадають із залежністю  $U_d=U_{d0} \cos \alpha$ . Праворуч т. *A* струм при активному навантаженні стає переривистим і випрямлена напруга дещо вища, ніж могла би бути при безперервному струмі. При  $\alpha=120^\circ=2,09$  рад середня випрямлена напруга дорівнює нулю незалежно від характеру навантаження (т. *D*).

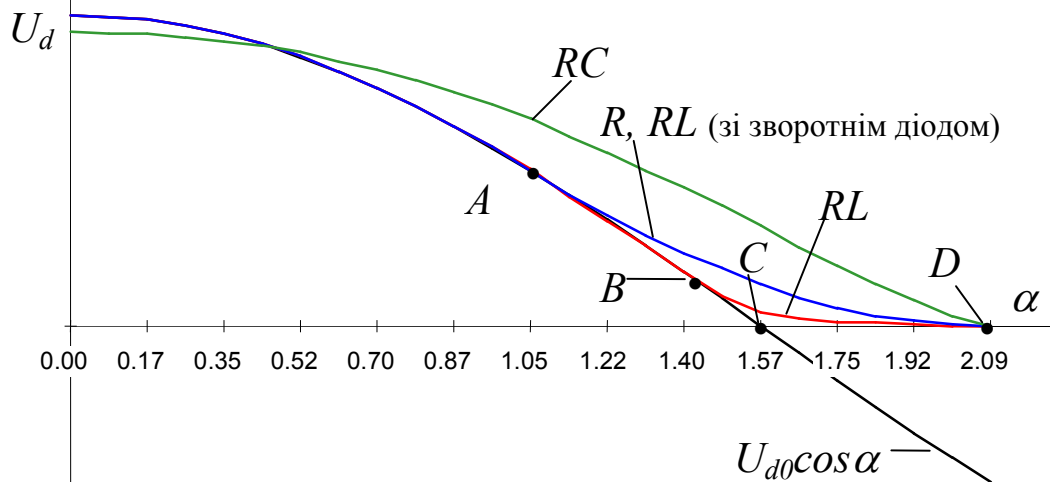


Рис.13 Регулювальні характеристики  $U_d = f(\alpha)$

За активно-індуктивного навантаження режим переривистого струму починається при більших кутах керування, ніж за суто активного (т. *B*). Збільшення індуктивності зсуває т. *B* нижче і наближає регулювальну характеристику до лінії *ACD*.

Наявність зворотного діода унеможливує прикладення до навантаження негативної випрямленої напруги за великих кутів керування. Тому регулювальна характеристика збігається з характеристикою за активного навантаження.

За активно-ємнісного навантаження регулювальна характеристика лежить вище. Це обумовлено тим, що внутрішній опір випрямляча  $r$  (тобто фактично опір вторинної обмотки трансформатора) набагато менший від активного опору  $R$  кола навантаження. Тому під час заряду конденсатора від випрямляча напруга  $u_C$  зростає швидше, ніж знижується під час його розряду на навантаження (див. рис.12). Щоб заряд  $q=C\Delta u_C$ , отриманий конденсатором на першому етапі, встиг бути відданим на другому етапі (при цьому напруга наприкінці розряду повинна дорівнювати напрузі на початку заряду), тривалість розряду повинна бути більшою, ніж тривалість його заряду. А це внаслідок форми миттєвої ЕРС  $e_d$  можливо тільки при досить великих середніх напругах.

На рис.13 при малих кутах керування характеристика для  $RC$ -навантаження проходить нижче інших, бо тільки при розрахунках цієї характеристики не було знехтувано падінням напруги у внутрішнім опорі випрямляча. Дійсна характеристика при  $\alpha=0$  виходить із тієї ж точки, що й інші.

Для забезпечення безаварійної роботи випрямляча потрібно обмежувати кути керування. Це здійснюється апаратними засобами у системі імпульсно-фазового керування (СІФК). Завдяки цьому регульовальна характеристика СІФК  $\alpha=f(u_{\text{зад}})$  має вигляд, зображений на рис.14 (лінія 2).

Унаслідок такої форми регульовальної характеристики СІФК кут керування не може бути більшим за  $\alpha_{\text{max}}$  та меншим за  $\alpha_{\text{min}}$ . Тому й регульовальна характеристика випрямляча у цілому  $U_d(u_{\text{зад}})$  (лінія 3 рис.14) за формою дещо відрізняється від характеристики  $U_d(\alpha)$  (лінія 1).

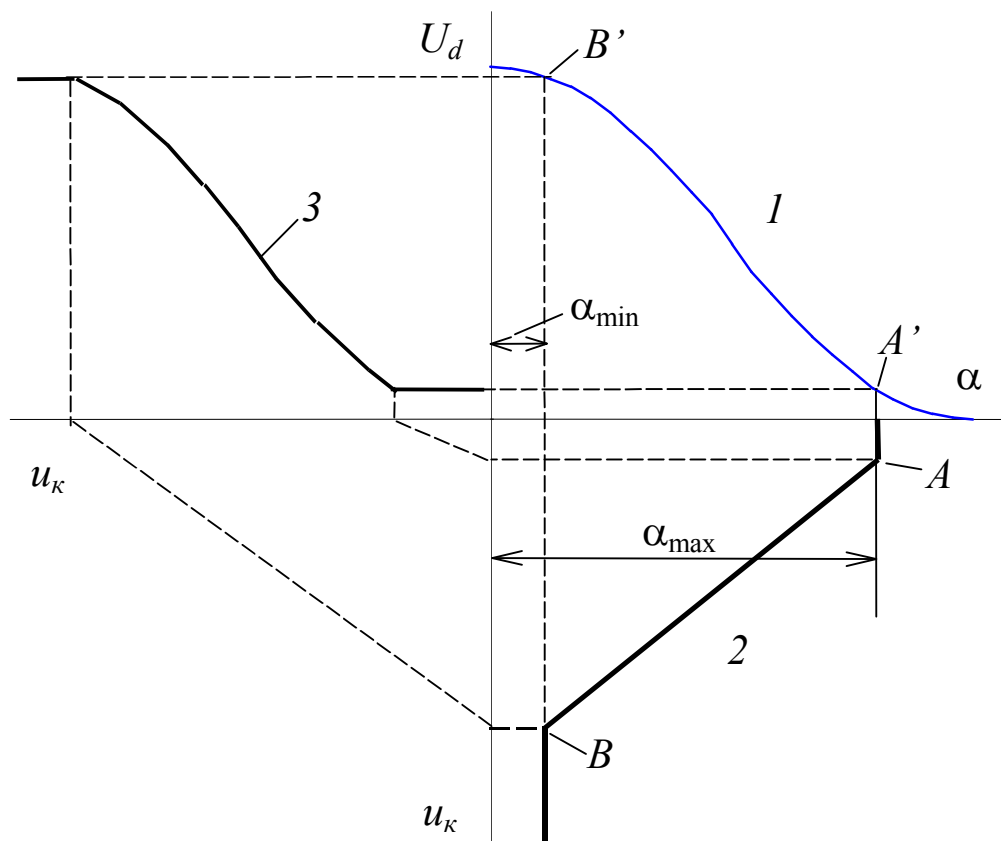


Рис.14 Регульовальні характеристики  $U_d = f(u_k)$

#### 4. ОПИС ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ

Лабораторна установка для дослідження режимів роботи керованого випрямляча реалізована на базі автоматизованого тиристорного електропривода ЕТУ 3601. Зі складу цього електропривода використовуються трифазний мостовий випрямляч, силовий трансформатор  $Tr$  та система імпульсно-фазового керування (СІФК), яка формує керуючі імпульси, що подаються на керуючі електроди тиристорів. Схема лабораторної установки наведена на рис.15.

Задавальна напруга, від рівня якої залежить кут керування  $\alpha$ , зрештою, середня випрямлена напруга, знімається з потенціометра  $R_{зад}$  і вимірюється вольтметром  $V1$ .

У разі необхідності полярність вмикання вольтметра  $V2$  змінюється за допомогою перемикача  $S7$ .

Вибір характеру навантаження здійснюється за допомогою перемикача  $S4$ . Положення  $RL_1$  та  $RL_2$  відрізняються величиною індуктивності (у положенні  $RL_2$  індуктивність більша).

Для осцилографування струмів та напруг передбачені гнізда  $\Gamma_{н1} \dots \Gamma_{н8}$ .

Автоматичний вимикач  $S8$  та перемикач  $S6$  у даній роботі не використовуються.

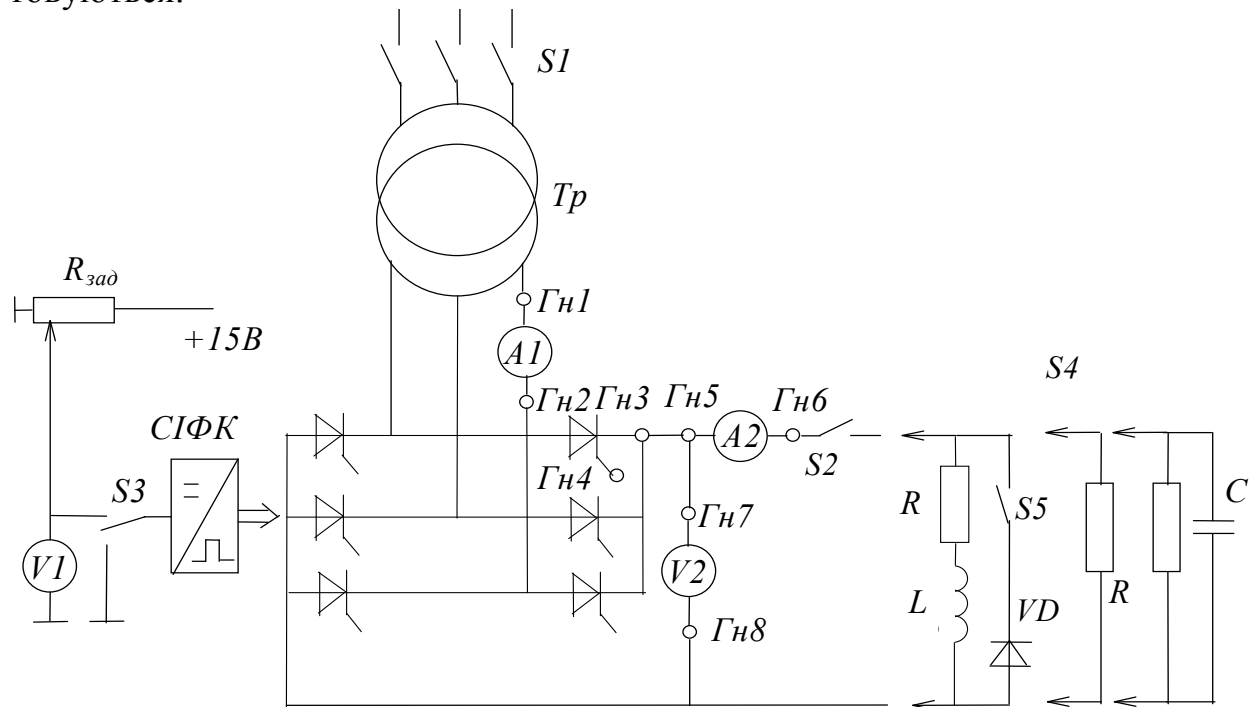


Рис.15 Схема лабораторної установки

## 5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

- 1) Ознайомитись з конструкцією силової частини випрямляча (у нижній частині комплектного електропривода) та системи керування (верхня плата).
- 2) Вмикання лабораторної установки:
  - подати напругу до первинної обмотки силового трансформатора;
  - установити нульову задавальну напругу;
  - вибрати характер навантаження.
- 3) Зняття регульовальних характеристик:
  - змінюючи задавальну напругу від нуля до максимально можливої, фіксувати випрямлену напругу, випрямлений струм і струм вторинної обмотки трансформатора та заносити їх до таблиці.
  - повторити вимірювання для кожного з видів навантаження (кількість точок кожної характеристики повинна бути не менше 12).
- 4) Осцилографування напруг та струмів:

- осцилографувати миттєві випрямлені струм, напругу, а також струм вторинної обмотки трансформатора й напругу на керуючому електроді тиристора ( $\Gamma_{H3} \dots \Gamma_{H4}$ );
- для кожного виду навантаження зняти осцилограми для випадків безперервного випрямленого струму (при досить малих кутах керування) та для переривистого струму. Переривистий струм при активно-індуктивному навантаженні може бути отриманий при малій індуктивності (положення  $RL_1$  перемикача  $S4$ ).

Вид навантаження	№ вимірювання	$u_{зад}, В$	$U_d, В$	$I_d, А$	$I_2, А$
$R$	1				
	.				
	.				
	12				
$RL$	1				
	.				
	.				
	12				
$RL$ із діодом	1				
	.				
	.				
	12				
$RC$	1				
	.				
	.				
	12				

## 6. ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Назва, мета та програма роботи.
2. Схема лабораторної установки (рис.15).
3. Таблиця експериментальних даних.
4. Осцилограми напруг та струмів.
5. Регульовальні характеристики  $U_d(u_{зад})$ ,  $I_d(u_{зад})$ ,  $I_2(u_{зад})$  (кожний вид характеристик у своїй спільній системі координат).

## 7. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Скільки тиристорів входить до складу трифазного мостового випрямляча?
2. Скільки тиристорів одночасно відкрито в трифазному мостовому випрямлячі?
3. Покажіть шлях протікання випрямленого струму, якщо відкриті тиристори  $VS1$  та  $VS6$ .



4. У якому діапазоні кутів керування струм при роботі на активне навантаження безперервний?
5. Як розмах коливань миттєвої випрямленої напруги змінюється з ростом кута керування?
6. За якого кута керування середня випрямлена напруга максимальна?
7. Чим характерний режим гранично-безперервного струму?
8. За якого кута керування при активному навантаженні середня випрямлена напруга дорівнює нулю?
9. Як величина індуктивності навантаження впливає на форму миттєвого випрямленого струму?
10. Чому за активно-індуктивного навантаження випрямлений струм може протікати навіть тоді, коли миттєва випрямлена напруга негативна?
11. Як порівняно з активним навантаженням змінюється граничний кут керування після включення до складу навантаження індуктивності?
12. Яке призначення дроселя в колі навантаження?
13. Як фазовий зсув вхідного фазного струму відносно вхідної напруги залежить від кута керування?
14. Як зворотний діод впливає на характер процесів у випрямлячі за кутів керування, менших від  $30^\circ$ ?
15. Яке призначення зворотного діода?
16. Чому за наявності зворотного діода миттєва випрямлена напруга не може бути негативною?
17. Як наявність у складі навантаження ємності впливає на форму випрямлених струму та напруги?
18. За яких умов починається заряд та розряд конденсатора в колі навантаження?
19. Як амплітудне значення миттєвого випрямленого струму залежить від кута керування?
20. Що таке регульовальна характеристика випрямляча?
21. Чому за  $RL$ - та  $R$ -навантаження зі збільшенням кута керування регульовальна характеристика відхиляється від косинусоїди?
22. В якому діапазоні може змінюватись кут керування за  $RL$ - та  $R$ -навантаження?
23. В якому стані знаходяться тиристри фази  $A$  (рис.7), якщо струм цієї фази позитивний, негативний та нульовий?
24. Яка тривалість роботи тиристора за один період напруги мережі?
25. Скільки разів за період напруги мережі відбувається комутація тиристорів?
26. Показати на рис.3 точки природної комутації тиристорів.
27. На рис.1 показати, яким колом протікає струм в деякий момент часу.
28. При якому куті керування  $\alpha$  середня випрямлена напруга  $U_d=0$  незалежно від характеру навантаження?
29. Навіщо на тиристри треба подавати по два керуючих імпульси? Із яким інтервалом подаються ці імпульси?

30. При якому куті керування  $\alpha$  при  $R$ -навантаженні виникає режим переривистого струму?
31. Чому дорівнює випрямлена напруга  $U_d$  під час безструмової паузи?
32. Яке максимальне значення кута керування  $\alpha$ , для якого можна забезпечити роботу без пауз у струмі шляхом підбору відповідної індуктивності?
33. Чому при роботі на  $RL$ -навантаженні режим переривистих струмів виникає при кутах  $\alpha > 60^\circ$ ?
34. Навіщо включають зворотний діод при  $RL$ -навантаженні?
35. Як змінюється струм  $I_d$  зі збільшенням кута керування  $\alpha$  при ємнісному навантаженні?
36. Вплив випрямляча на мережу. Як змінюється  $\cos\phi$  зі збільшенням кута  $\alpha$ ?
37. Чому в зоні переривистих струмів середня випрямлена напруга  $U_d > U_{d0} \cos\alpha$ ?
38. Чому регульовальна характеристика при роботі на  $RL$ -навантаженні зі зворотним діодом співпадає з регульовальною характеристикою для  $R$ -навантаження?
39. Чому регульовальна характеристика при роботі на  $C$ -навантаженні розташована вище решти характеристик?
40. Чому дорівнює середня випрямлена напруга  $U_d$  при безперервному струмі та  $R$ -,  $RL$ -навантаженні?

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Казачковський М.М. Керовані випрямлячі. – Дніпропетровськ: НГА України, 1999. – 229 с.
2. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Преобразовательная техника. – К.: Вища школа, 1983. – 431 с.
3. Справочник по преобразовательной технике. Под ред. И.М. Чиженко. – К.: Техніка, 1978. – 447 с.
4. Шипилло В.П. Автоматизированный вентильный электропривод. – М.: Энергия, 1969. – 400 с.
5. Ривкин Г.А. Преобразовательные устройства. – М.: Энергия, 1970. – 544 с.

Лабораторна робота СПАЕ-2  
“Дослідження роботи трифазного керованого випрямляча  
на проти-ЕРС”

### 1. МЕТА РОБОТИ

Вивчити особливості роботи та характеристики керованого випрямляча на проти-ЕРС у випрямному та інверторному режимах.

### 2. ПРОГРАМА РОБОТИ

1. Вивчити особливості роботи трифазного мостового керованого випрямляча на проти-ЕРС у випрямному та інверторному режимах.
2. Отримати дані для побудови регульовальних характеристик у випрямному та інверторному режимах.
3. Отримати дані для побудови зовнішніх характеристик випрямляча.
4. Вивчити за допомогою осцилографа характер зміни миттєвих випрямлених напруги та струму, а також струму вторинної обмотки трансформатора за різних кутів керування та проти-ЕРС.

### 3. ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Найпоширенішою сферою застосування керованих випрямлячів в електроприводі є їх використання для живлення обмоток якоря машин постійного струму (рис.1). В обмотці якоря під час роботи електричної машини виникає ЕРС, яка пропорційна швидкості обертання якоря.

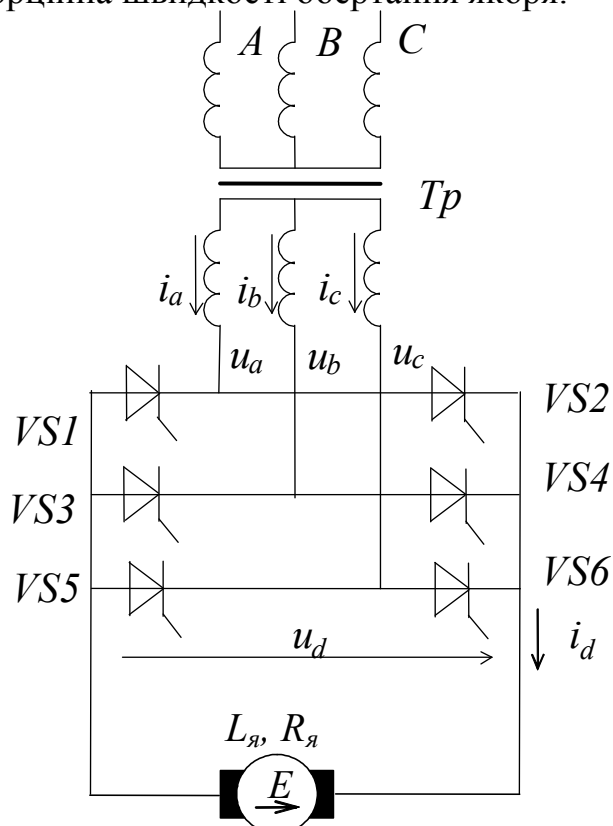


Рис.1 Трифазна мостова схема випрямлення

Диференційне рівняння миттєвих напруг кола якоря має вигляд:

$$u_d = E + i_d R_{я} + L_{я} \frac{di_d}{dt}, \quad (1)$$

де  $R_{я}$ ,  $L_{я}$  – активний опір та індуктивність кола якоря,  $E$  – ЕРС якоря.

Рівняння середніх напруг:

$$U_d = E + I_d R_{я}. \quad (2)$$

Перебіг електромагнітних процесів має багато спільного з процесами при  $RL$ -навантаженні, але наявність у складі навантаження випрямляча проти-ЕРС обумовлює специфіку режимів його роботи. Слід зауважити також, що індуктивність обмотки якоря набагато менша індуктивності обмотки збудження, і тому режим переривистого струму виникає при більших середніх струмах та менших кутах керування.

### 3.1. Робота випрямляча у випрямному режимі

На рис.2 зображені діаграми випрямлених напруги та струму при нульовій проти-ЕРС (тобто при  $RL$ -навантаженні) та  $\alpha=45^\circ$ . Якщо ЕРС якоря відмінна від нуля та має напрямок, зображений на рис.1, це призводить до зменшення середнього значення струму, практично не змінюючи його форми (рис.3). Хоча на рис.3 миттєва випрямлена напруга і стає подекуди меншою від проти-ЕРС, але струм завдяки електромагнітній інерції обмотки не встигає впасти до нуля. Однак подальше збільшення ЕРС має наслідком зменшення похідної струму

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{u_d - E - i_d R_{я}}{L_{я}}$$

та ЕРС самоіндукції і появу пауз у струмі (рис.4). Коли миттєва випрямлена напруга стає меншою від проти-ЕРС (т.  $A$  на рис.4), струм тече у попередньому напрямку завдяки ЕРС самоіндукції, полярність якої збігається при зниженні струму з полярністю випрямленої напруги. У момент часу, що відповідає т.  $B$ , алгебраїчна сума ЕРС у колі якоря дорівнює нулю, і струм зникає:

$$i_d = \frac{u_d - E - L_{я} di_d/dt}{R_{я}} = 0.$$

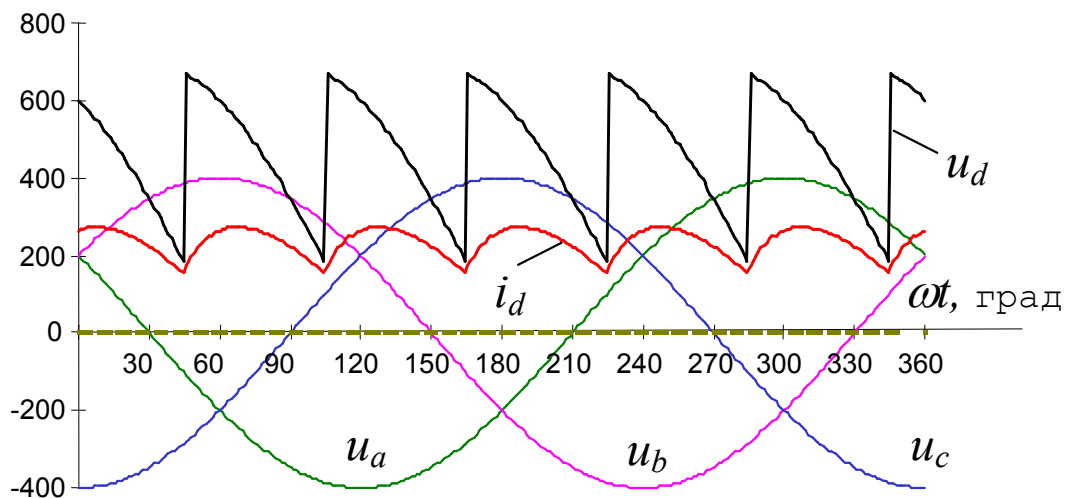


Рис.2 Процеси за  $RL$ -навантаження

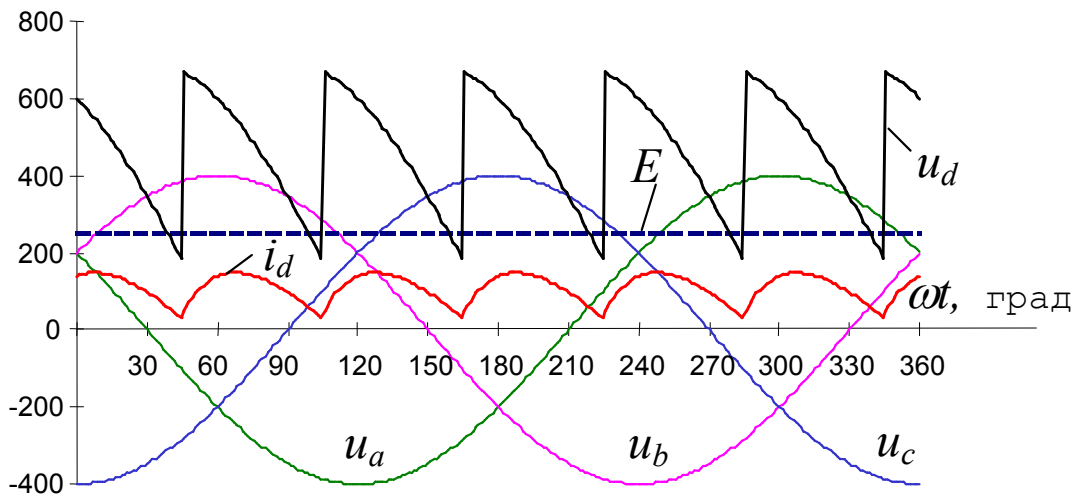


Рис.3 Процеси за ERL -навантаження (безперервний струм)

Праворуч т. *B*, коли струм відсутній, а тиристорі закриті, напруга на виході випрямляча дорівнює ЕРС якоря. Середня випрямлена напруга завдяки цьому дещо більша, ніж в режимі безперервного струму для того ж кута керування (див. рис.3).

Коли проти-ЕРС збільшується настільки, що перевищує максимальну миттєву випрямлену напругу, до анодів тиристорів завжди прикладений негативний потенціал, і протікання струму взагалі неможливе.

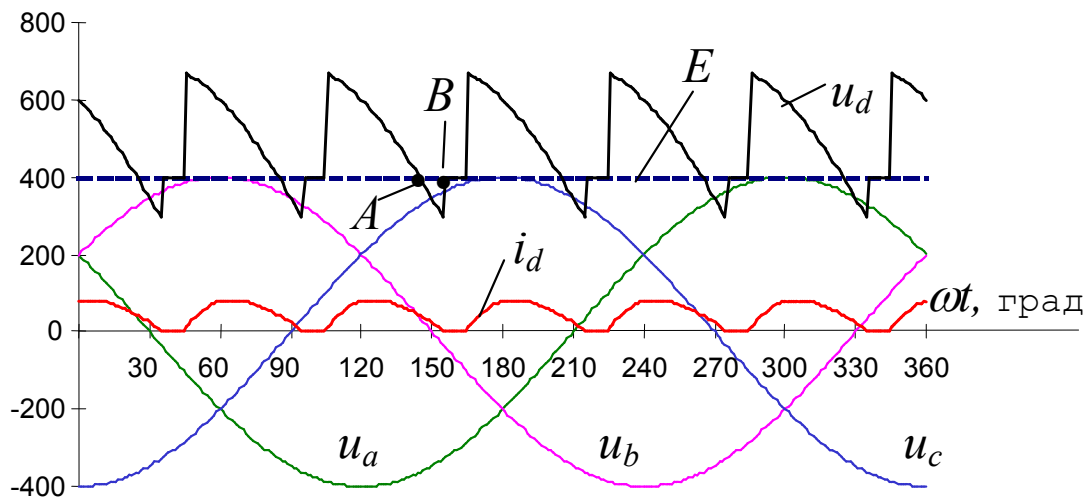


Рис.4 Процеси за ERL -навантаження (переривистий струм)

Зменшення кута керування за незмінної проти-ЕРС знову робить випрямлений струм безперервним (рис.5).

Форма та фаза струму вторинної обмотки трансформатора у випрямленому режимі за безперервного струму нічим не відрізняється від таких при роботі на *RL*-навантаження (на рис.6 зображені струм та напруга фази *a* при куті  $\alpha=45^\circ$ ). Фазний струм запізнюється в часі відносно фазної напруги на кут  $\varphi=\alpha$ . Але при збільшенні проти-ЕРС і незмінному куті керування, коли виникають паузи струму (рис.7), це співвідношення порушується. Збільшення проти-ЕРС зсуває момент зникнення фазного струму ліворуч, і тепер  $\varphi<\alpha$ . Цей ефект можна також пояснити збільшенням активної складової споживаного струму.

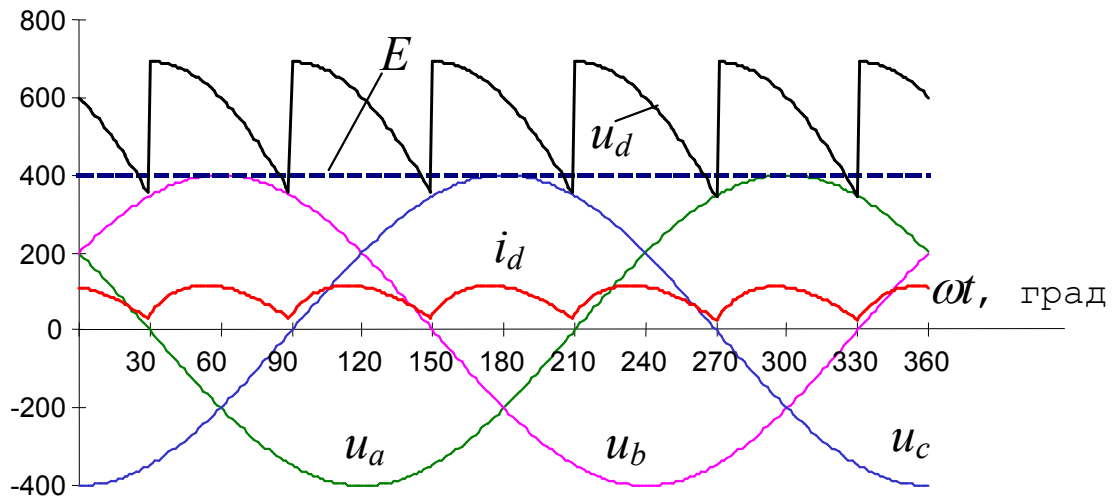


Рис.5 Процеси після збільшення кута керування

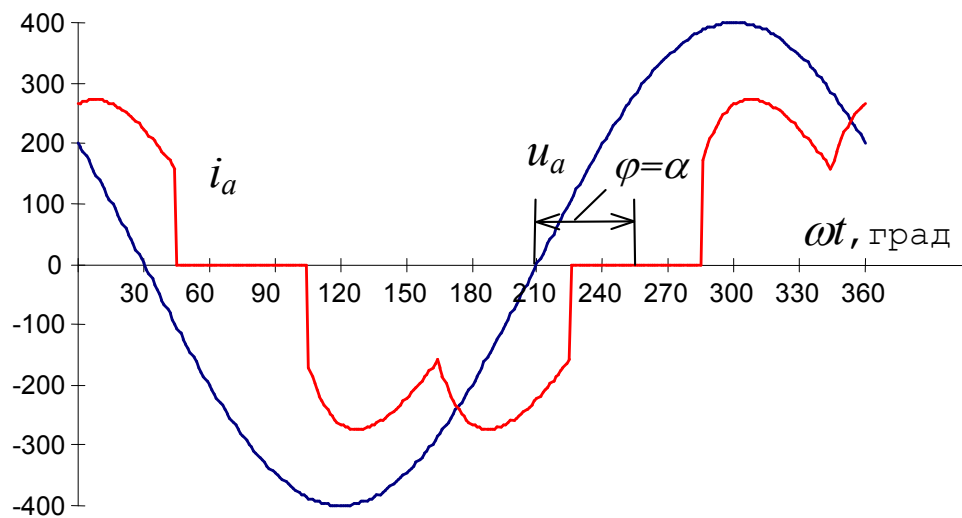


Рис.6 Струм та напруга фази  $a$  при куті  $\alpha=45^\circ$

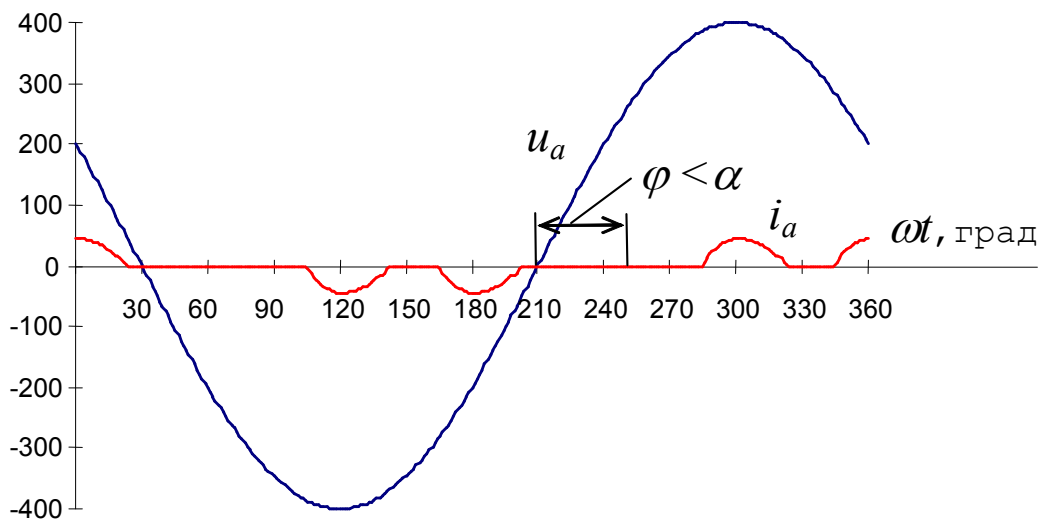


Рис.7 Струм та напруга фази  $a$  при куті  $\alpha > 45^\circ$

### 3.2. Робота в інверторному режимі

У випрямному режимі випрямляч споживає енергію з живильної мережі і віддає її навантаженню (у нашому випадку – електричній машині). У цьому режимі знаки середніх випрямлених напруги та струму завжди співпа-

дають, хоча миттєва напруга інколи свій знак змінює. В інверторному режимі, коли енергія споживається випрямлячем від електричної машини та передається мережі, знаки середніх напруги та струму повинні бути протилежними. Оскільки внаслідок однобічної провідності тиристорів випрямлений струм знак змінити не може, це можливо за двох умов:

- проти-ЕРС повинна мати напрям, який збігається з напрямом струму (інакше електрична машина не зможе змінити напрям передачі енергії);
- кут керування більший за  $90^\circ$ , а модуль проти-ЕРС більший від модуля середньої випрямленої напруги (тільки тоді може змінити знак середня випрямлена напруга).

Перехід випрямляча до інверторного режиму проілюстрований рис.8... 10. На рис.8 зображені діаграми напруг та струмів при  $\alpha=100^\circ$  та  $E=0$ . Як видно, незважаючи на досить великий кут керування, середня випрямлена напруга позитивна, і випрямляч працює у випрямному режимі (оскільки не виконується друга умова виникнення інверторного режиму).

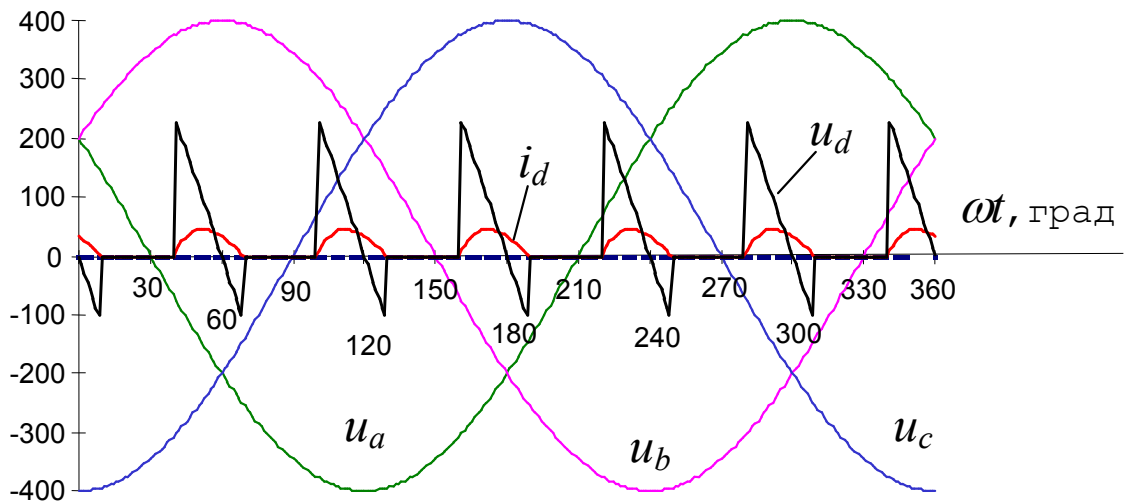


Рис.8 Діаграми напруг та струмів при  $\alpha=100^\circ$  та  $E=0$

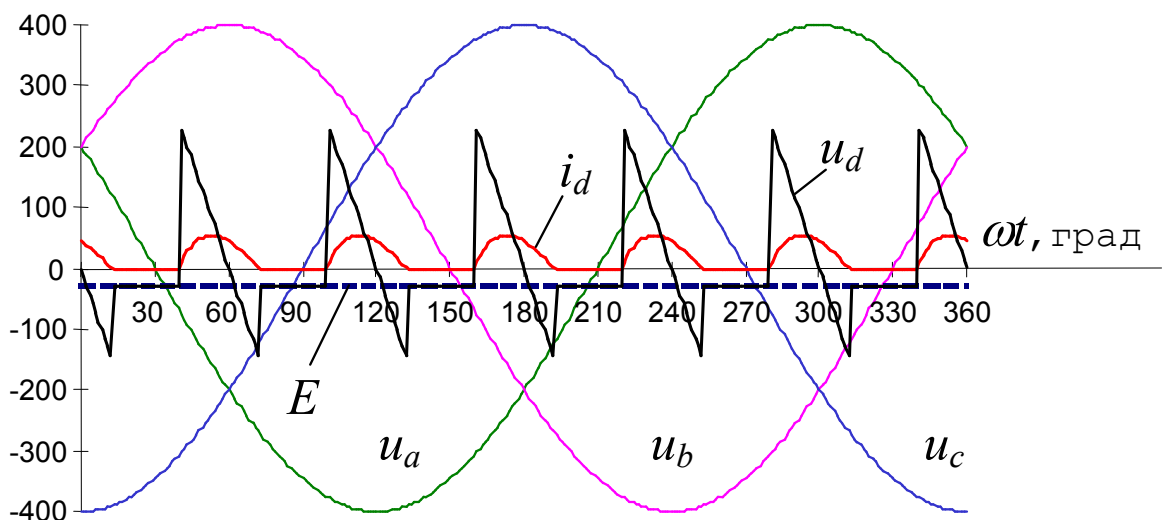


Рис.9 Діаграми напруг та струмів при  $\alpha=100^\circ$  та  $E<0$

На рис.9 проти-ЕРС вже змінила напрям порівняно з рис. 5. Електрична машина перейшла в генераторний режим і, перетворюючи механічну ене-

рگیю на електричну, віддає її у зовнішнє електричне коло. Завдяки цій додатковій енергії тривалість імпульсу струму збільшилася, а середнє значення випрямленої напруги наблизилося до нуля. Але рівень ЕРС якоря ще невеликий, і вся енергія, отримана від електричної машини, втратилася в колі випрямленого струму, не дійшовши до мережі. Знак середньої випрямленої напруги все ще співпадає зі знаком струму, а випрямляч продовжує працювати у випрямному режимі.

За більшої проти-ЕРС (рис.10) енергії, отриманої від обмотки якоря, вже достатньо для того, щоб тривалість протікання струму стала досить великою. Більшу частину цього часу миттєва випрямлена напруга негативна. Змінює знак середня випрямлена напруга і настає інверторний режим. Завдяки зміні знаків середньої випрямленої напруги та ЕРС знак струму залишається незмінним:

$$I = \frac{-U_d + E}{R_{\text{я}}} > 0.$$

На рис.11 проти-ЕРС уже настільки велика, що здатна забезпечити безперервне протікання струму.

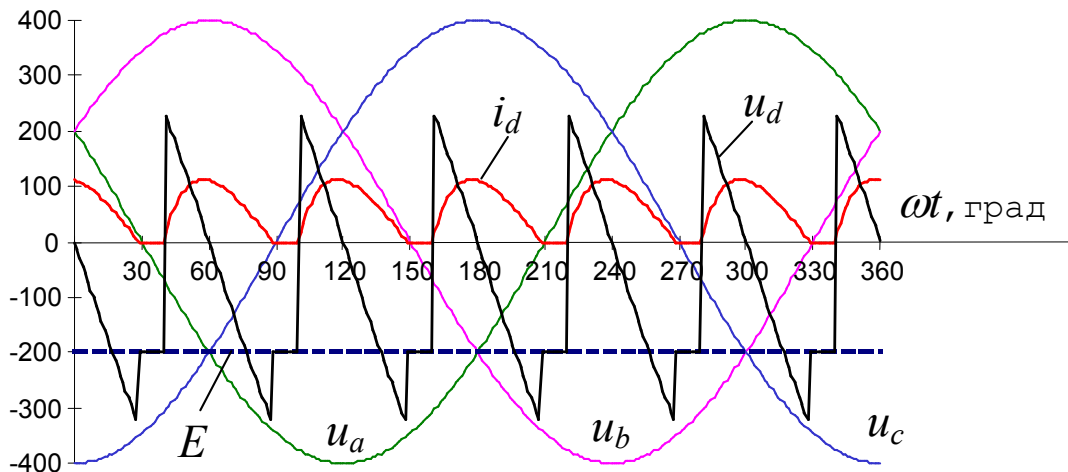


Рис.10 Напруги та струми в інверторному режимі (переривистий струм)

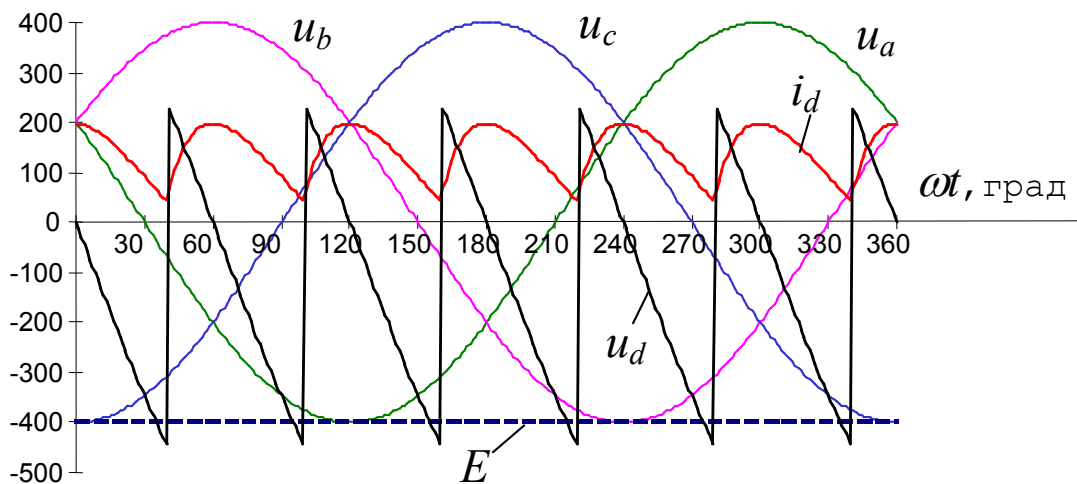


Рис.11 Напруги та струми в інверторному режимі (безперервний струм)



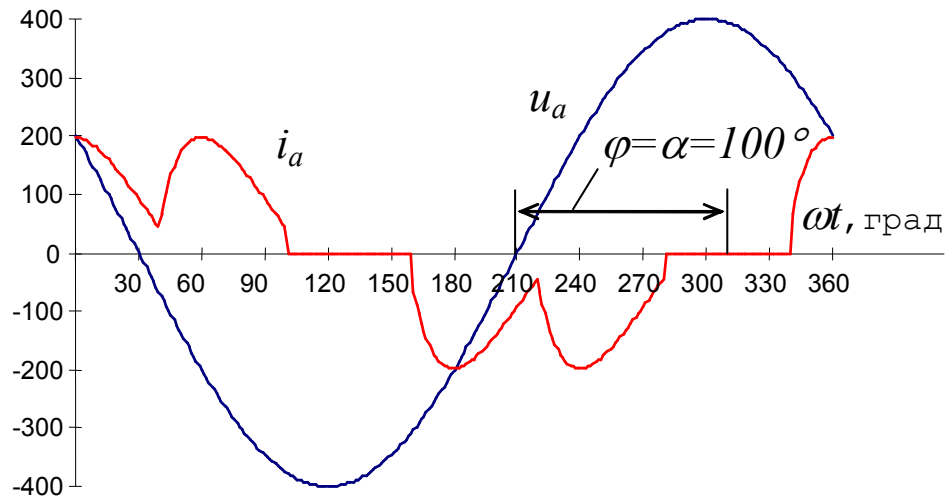


Рис.12 Споживаний струм в інверторному режимі

Струм вторинної обмотки трансформатора в інверторному режимі має зсув відносно фазної напруги, більший за  $90^\circ$  (рис.12). Причиною цього є те, що завдяки зміні напрямку передачі енергії активна складова фазного струму змінила знак. Як і у випрямному режимі, з появою пауз у випрямленому струмі кут зсуву дещо менший від кута керування.

### 3.3. Зовнішні і регульовальні характеристики

Зовнішні характеристики випрямляча, як і будь-якого джерела живлення, відображають залежність середньої вихідної напруги  $U_d$  від середнього струму  $I_d$  (тобто від навантаження джерела). Вони характеризують міру стабільності вихідної напруги зі зміною навантаження і тим самим міру близькості джерела до ідеального джерела напруги.

У випрямному режимі при безперервному струмі середня випрямлена напруга лінійно знижується зі зростанням струму:

$$U_d = E_{d0} \cos \alpha - I_d R - I_d R_n - \Delta U, \quad (3)$$

де  $E_{d0}$  – вихідна напруга при  $I_d=0$  та  $\alpha=0$  (тобто ЕРС);  $R = R_{\text{я}} + 2R_2$  – сумарний активний опір кола якоря (обмотки якоря та вторинної обмотки трансформатора);  $R_n = m X_2 / 2\pi$  – т.з. опір від перекриття (фіктивний активний опір, який враховує падіння напруги, обумовлене процесом природної комутації тиристорів);  $m$  – пульсність випрямляча (для трифазної мостової схеми  $m=6$ );  $\Delta U$  – падіння напруги в тиристорах (в потужних випрямлячах ним звичайно нехтують);  $X_2$  – індуктивний опір вторинної обмотки трансформатора.

Проте в зоні переривистого струму ця лінійність порушується. Зі збільшенням проти-ЕРС виникають паузи в струмі (порівняйте рис.3 та 4). Середній струм згідно з рівнянням (2) зменшується (як наслідок, зменшується і падіння напруги). Крім того, під час паузи струму тиристори закриті, і напруга в колі якоря дорівнює проти-ЕРС. Оскільки перед закриттям тиристорів миттєва випрямлена напруга була меншою від проти-ЕРС (див. рис.4), виникнення паузи в струмі призводить до додаткового збільшення середньої вихідної напруги. Зовнішня характеристика досить швидко підіймається вгору зі

зменшенням струму. На рис.13 зовнішні характеристики в зоні переривистого струму розташовані у межах еліпсу 1. На еліпсі (т.  $F$ ) має місце гранично-безперервний характер струму, праворуч від нього – безперервний. Перший квадрант рис.13 відповідає випрямному режиму.

Зменшення кута керування при незмінній проти-ЕРС має наслідком перехід до більш вищої характеристики з безперервним струмом (порівняйте рис.4 та 5). Зменшення проти-ЕРС при  $\alpha = const$  переміщує робочу точку праворуч від т.  $F$  уздовж тієї ж характеристики, збільшення – ліворуч, до зони переривистого струму.

Таким чином, внаслідок переривистого характеру струму зовнішня характеристика стає суттєво нелінійною з досить великим падінням напруги від навантаження. Це призводить до нестабільності швидкості електричних двигунів, які живляться від випрямляча.

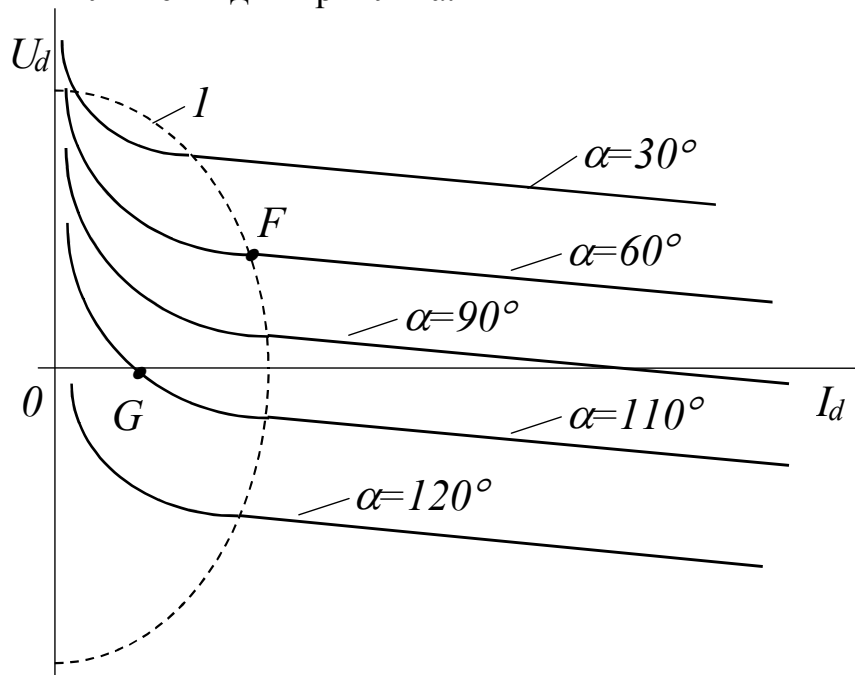


Рис.13 Зовнішні характеристики випрямляча

На рис.14 наведені регулювальні характеристики випрямляча, навантаженого на проти-ЕРС. Якщо  $E=0$ , характеристика співпадає з такою для  $RL$ -навантаження. Горизонтальна її ділянка в області малих напруг відповідає кутам керування, більшим за  $120^\circ$  (відомо, що відкриття тиристорів у трифазній мостовій схемі при  $RL$ -навантаженні за таких кутів неможливе). Виникнення подібної ділянки у випрямному режимі з  $E>0$  має іншу природу. Справа в тому, що збільшення кута керування зрештою приводить до того, що керуючий імпульс надходить до тиристора тоді, коли миттєва випрямлена напруга повинна бути меншою за проти-ЕРС (поміж т.  $A$  та  $B$  на рис.4).

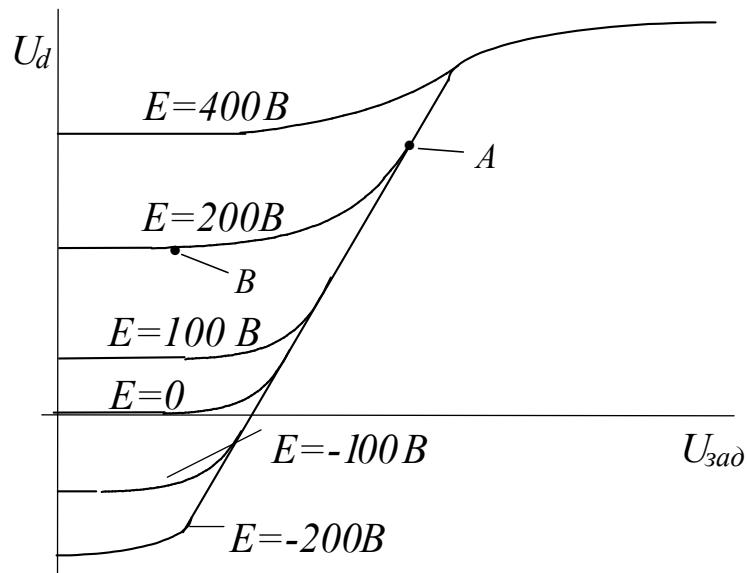


Рис.14 Регулювальні характеристики випрямляча

За таких умов тиристори відкритися не в змозі, бо до їх анодів прикладена негативна напруга. Чим більша проти-ЕРС, тим при меншому куті  $\alpha$  (та більшій задавальній напрузі) виникає це явище. Але при  $\alpha < 120^\circ$  (праворуч від т. *B* на рис.14) виникає струм (поки що переривистий), і випрямлена напруга збільшується зі зростанням задавальної напруги. Точка *A* на тому ж рисунку відповідає гранично-безперервному характеру струму. При подальшому збільшенні завдання паузи струму зникають, і всі регулювальні характеристики практично співпадають незалежно від рівня проти-ЕРС. Горизонтальна ділянка спільної характеристики виникає внаслідок обмеження мінімального кута керування.

Характеристики інверторного режиму мають подібну форму, але розташовані у четвертому квадранті.

#### 4. ОПИС ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ

Лабораторна установка для дослідження режимів роботи керованого випрямляча реалізована на базі автоматизованого тиристорного електропривода ЕТУ 3601. Зі складу цього електропривода використовуються трифазний мостовий випрямляч, силовий трансформатор *Tr* та система імпульсно-фазового керування (СІФК), яка формує керуючі імпульси, що подаються на керуючі електроди тиристорів. Схема лабораторної установки наведена на рис.15.

Проти-ЕРС створюється за допомогою електромашинного підсилювача (ЕМП), який складається зі спеціального генератора постійної напруги та приводного асинхронного двигуна. Запуск цього двигуна здійснюється за допомогою автоматичного вимикача *S8*. Для регулювання рівня проти-ЕРС передбачено потенціометр, ввімкнений до кола збудження ЕМП і розташований на лівому боці стенду. Зміна полярності проти-ЕРС здійснюється перемикачем *S6*. Вимикачі *S6*, *S8* та зазначений потенціометр на рис.15 не показані.

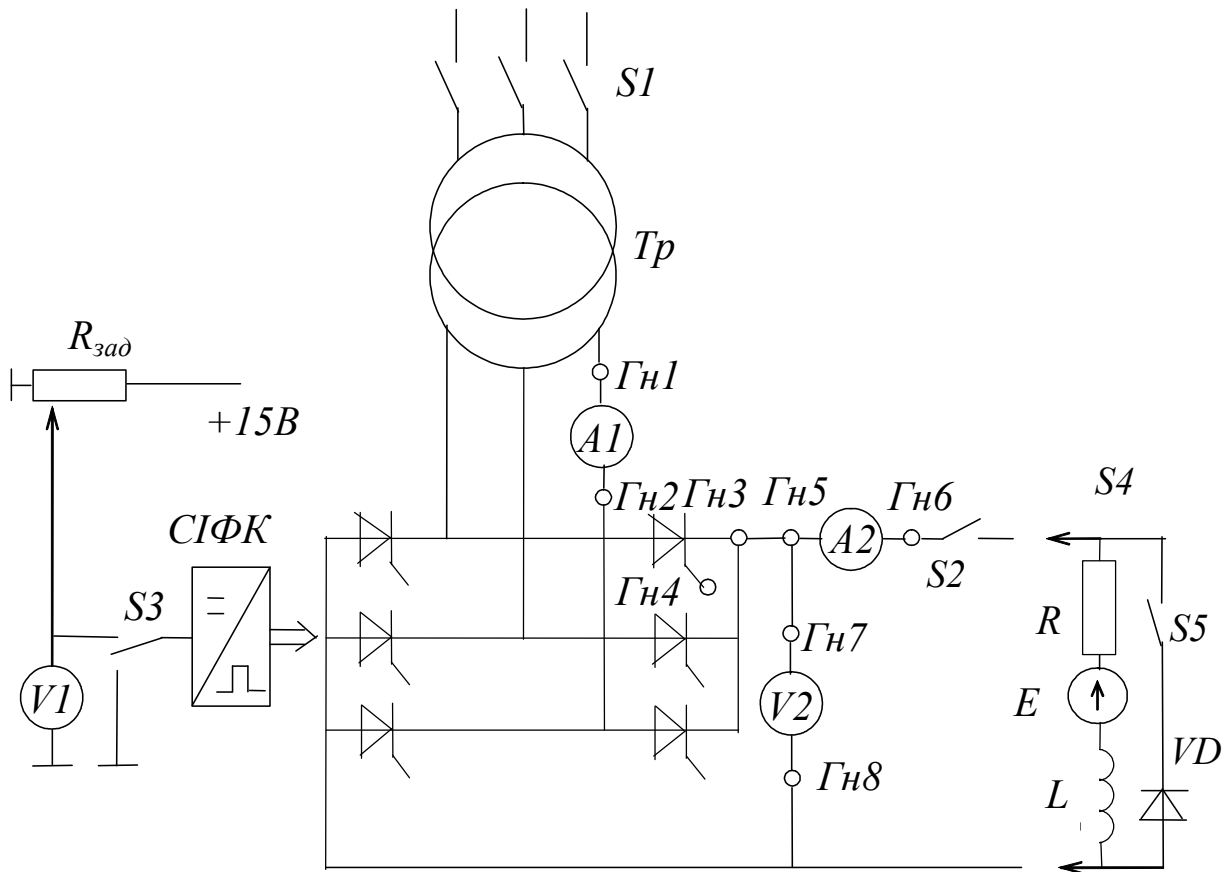


Рис.15 Схема лабораторної установки

Задавальна напруга, від рівня якої залежить кут керування і, зрештою, середня випрямлена напруга, знімається з потенціометра  $R_{зад}$  і вимірюється вольтметром  $V1$ .

У разі необхідності полярність вмикання вольтметра  $V2$  змінюється за допомогою перемикача  $S7$ .

Вибір характеру навантаження здійснюється за допомогою перемикача  $S4$ . Положення  $RL_1$  та  $RL_2$  відрізняються величиною індуктивності (в положенні  $RL_2$  індуктивність більша). Інші положення при виконанні даної роботи не використовуються.

Для осцилографування струмів та напруг передбачені гнізда  $\Gamma_{н1} \dots \Gamma_{н8}$ .

## 5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1) Вмикання лабораторної установки:

- подати напругу до первинної обмотки силового трансформатора;
- встановити нульову задавальну напругу;
- вибрати за допомогою перемикача  $S6$  випрямний режим;
- вибрати характер навантаження;
- встановити нульовий рівень проти-ЕРС (повзун потенціометра у найнижчому положенні);
- запустити двигун електромашинного перетворювача.

2) Зняття регульовальних характеристик випрямного режиму:

- змінюючи задавальну напругу від нуля до максимально можливої, фіксувати випрямлену напругу, випрямлений струм та струм вторинної обмотки трансформатора та заносити їх до таблиці 1.
- повторити вимірювання для 3 рівнів проти-ЕРС (від нуля до максимально можливого). Кількість точок кожної характеристики повинна бути не менше 12.

Табл.1

Рівень проти-ЕРС	№ вимірювання	$u_{зад}$ , В	$U_d$ , В	$I_d$ , А	$I_2$ , А
$E=0$	1				
	.				
	.				
	12				
$E=$	1				
	.				
	.				
	12				
$E=$	1				
	.				
	.				
	12				

## 3) Зняття регулювальних характеристик інверторного режиму:

- знизити проти-ЕРС до нуля;
- змінити полярність проти-ЕРС;
- встановити наступний рівень проти-ЕРС;
- змінюючи задавальну напругу від нуля до максимально можливої, фіксувати випрямлену напругу, випрямлений струм і струм вторинної обмотки трансформатора та заносити їх до таблиці 2.
- повторити вимірювання для 2 рівнів проти-ЕРС (від нуля до максимально можливого). Кількість точок кожної характеристики повинна бути не менше 12.

Табл.2

Рівень проти-ЕРС	№ вимірювання	$u_{зад}$ , В	$U_d$ , В	$I_d$ , А	$I_2$ , А
$E= -$	1				
	.				
	.				
	12				
$E= -$	1				
	.				
	.				
	12				

## 4) Зняття зовнішніх характеристик:

- встановити нульовий рівень проти-ЕРС;
- для випрямного режиму встановити потрібну задавальну напругу і, збільшуючи проти-ЕРС, фіксувати випрямлені напругу та струм. Повторити вимірювання для 4 рівнів задавальної напруги. Результати занести до табл.3.

Табл.3

Режим	$U_{зад}, В$	№					
		Параметр	1	2	3	...	12
Випр.		$U_d, В$					
		$I_d, А$					
		$U_d, В$					
		$I_d, А$					
		$U_d, В$					
		$I_d, А$					
		$U_d, В$					
		$I_d, А$					
Інв.		$U_d, В$					
		$I_d, А$					
		$U_d, В$					
		$I_d, А$					

- для інверторного режиму знизити проти-ЕРС до нуля та змінити її полярність за допомогою перемикача  $S6$ . Провести вимірювання для 2 рівнів задавальної напруги.

#### 5) Осцилографування напруг та струмів:

- осцилографувати миттєві випрямлену напругу, струм та струм вторинної обмотки трансформатора, а також напругу на керуючому електроді тиристора ( $Гн3...Гн4$ );
- для випрямного та інверторного режиму при  $E \neq 0$  зняти осцилограми для випадків безперервного випрямленого струму та для переривистого струму. Переривистий струм отримується шляхом зміни проти-ЕРС або задавальної напруги.

### 6. ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Назва, мета та програма роботи.
2. Схема лабораторної установки (рис.15).
3. Таблиці експериментальних даних.
4. Осцилограми напруг та струмів.
5. Регульовальні характеристики  $U_d(u_{зад}), I_d(u_{зад}), I_2(u_{зад})$  для різних рівнів проти-ЕРС у випрямному та інверторному режимах (усі характеристики в спільних системах координат).
6. Зовнішні характеристики  $U_d (I_d)$  для різних рівнів задавальної напруги у випрямному та інверторному режимах (усі характеристики в спільній системі координат).

## 7. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Як поява у складі навантаження проти-ЕРС впливає на середній випрямлений струм та граничний кут керування у випрямному та інверторному режимах?
2. Чому дорівнює випрямлена напруга під час безструмової паузи?
3. В якому режимі працює керований випрямляч, якщо двигун, що від нього живиться, працює в рушійному режимі?
4. В якому режимі працює керований випрямляч, якщо двигун, що від нього живиться, працює в рекуперативному режимі?
5. В якому напрямку передається енергія через випрямляч на інтервалі часу, коли  $|u_d| > |E|$  у випрямному та інверторному режимах?
6. В якому напрямку передається енергія через випрямляч на інтервалі часу, коли  $|u_d| < |E|$  у випрямному та інверторному режимах?
7. Як збільшення проти-ЕРС впливає на початкову похідну струму у випрямному та інверторному режимах?
8. За яких умов випрямляч переводиться до інверторного режиму?
9. В яких режимах працюють випрямляч та двигун на рис.9?
10. Яке співвідношення знаків середніх випрямлених струму та напруги, а також проти-ЕРС у випрямному та інверторному режимах?
11. Як, не змінюючи кут керування, перевести випрямляч з режиму переривистого струму до режиму безперервного струму у випрямному та інверторному режимах?
12. Що таке зовнішні та регульовальні характеристики керованого випрямляча?
13. Чому в зоні переривистих струмів нахил зовнішніх характеристик більший, ніж в зоні безперервних струмів?
14. Які негативні наслідки має нелінійність зовнішньої характеристики в зоні переривистих струмів?
15. В якому діапазоні може змінюватись кут керування в трифазній мостовій схемі за відсутності та наявності проти-ЕРС у складі навантаження?
16. Які зовнішні характеристики рис.13 відповідають випрямному і які – інверторному режиму?
17. За яких умов струм встигає знизитись до нуля до відкриття наступного тиристора?

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Казачковський М.М. Керовані випрямлячі. – Дніпропетровськ: НГА України, 1999. – 229 с.
2. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Преобразовательная техника. – К.: Вища школа, 1983. – 431 с.
3. Справочник по преобразовательной технике. Под ред. И.М.Чиженко. – К.: Техніка, 1978. – 447 с.
4. Шипилло В.П. Автоматизированный вентиляльный электропривод. – М.: Энергия, 1969. – 400 с.
5. Ривкин Г.А. Преобразовательные устройства. – М.: Энергия, 1970. – 544 с.

Лабораторна робота СПАЕ-3  
“Дослідження однофазних випрямлячів  
з активним та активно-індуктивним навантаженням”

## 1. МЕТА РОБОТИ

Вивчити особливості електромагнітних процесів та статичних характеристик однофазних керованих випрямлячів з активним та активно-індуктивним навантаженням.

## 2. ПРОГРАМА РОБОТИ

### *A. Дослідження однопівоперіодного випрямляча.*

#### 1. Активне навантаження:

- дослідити вплив кута керування та опору навантаження на форму миттєвих випрямлених напруги  $u_d$  та струму  $i_d$ , а також на середні випрявлені напругу  $U_d$  та струм  $I_d$ ;
- дослідити вплив кута керування на форму напруги на тиристорі.

#### 2. Активно-індуктивне навантаження:

- дослідити вплив кута керування, активного опору та індуктивності навантаження на форму миттєвих випрямлених напруги та струму, їх середнє значення, коливання випрямленого струму, тривалість імпульсу випрямленого струму.

### *B. Дослідження однофазного мостового випрямляча при активно-індуктивному навантаженні.*

#### 1. Режим безперервного струму:

- дослідити вплив кута керування та індуктивності навантаження на форму миттєвих випрямлених напруги та струму, їх середнє значення, коливання випрямленого струму;
- дослідити вплив кута керування на форму струму вторинної обмотки трансформатора та його фазовий зсув відносно напруги.

#### 2. Режим гранично-безперервного струму:

- дослідити вплив індуктивності навантаження на кут керування, при яким виникає гранично-безперервний режим
- з'ясувати форму струму вторинної обмотки трансформатора.

#### 3. Режим переривистого струму:

- дослідити вплив кута керування та індуктивності навантаження на форму миттєвих випрямлених напруги та струму, їх середнє значення, коливання випрямленого струму, тривалість імпульсу випрямленого струму та форму струму вторинної обмотки трансформатора.

#### 4. Регульовальні характеристики:

- з'ясувати форму та взаємне розташування регульовальних характеристик випрямляча при різних індуктивностях навантаження;



- С. Дослідження однофазного мостового випрямляча зі зворотним діодом.
1. Дослідити вплив кута керування та індуктивності навантаження на форму миттєвих випрямлених напруги та струму, їх середнє значення, коливання випрямленого струму;
  2. Зіставити форму миттєвих випрямлених напруги та струму та їх середніх значень з такими для випрямляча без діода.
  3. Зіставити фазовий зсув вторинного струму трансформатора відносно його напруги з такими для випрямляча без діода.

### 3. ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

#### 3.1. Однофазний однопівперіодний випрямляч

Схема однофазного однопівперіодного випрямляча наведена на рис. 1. Він складається з трансформатора  $Tr$  (може бути відсутнім) та тиристора  $VSI$ . До первинної обмотки трансформатора прикладена напруга живильної мережі  $e_1$ , вихідна (випрямлена) напруга  $u_d$  випрямляча прикладається до навантаження  $Z_n$ . До керуючого електроду тиристора у потрібний момент подається позитивний імпульс керуючої напруги  $u_{ке}$ , який дозволяє відкриття тиристора.

Тут і надалі матимемо на увазі такі припущення:

- активний опір та індуктивність вторинної обмотки трансформатора дорівнюють нулю;
- прямий опір тиристора у відкритому стані – нульовий, у закритому – безкінечно великий;
- падіння напруги поміж анодом та катодом відкритого тиристора відсутнє;
- зворотній опір тиристора безкінечно великий;
- тиристор, що має позитивний потенціал на аноді відносно катоду та отримав позитивний потенціал на керуючому електроді, відкривається миттєво;
- відкритий тиристор закривається миттєво після того, як струм поміж анодом та катодом знижується до нуля (для його наступного відкриття знов потрібні будуть позитивні потенціали на аноді та керуючому електроді).

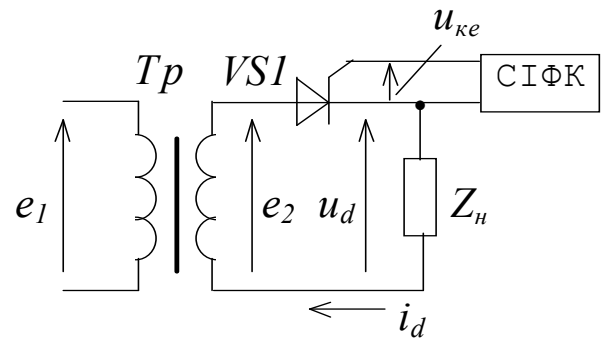


Рис. 1 Однофазний однопівперіодний випрямляч

#### Робота на активне навантаження

На рис. 2 наведені часові діаграми, які відображають електромагнітні процеси в схемі рис. 1.

Тиристор спроможний відкритися лише тоді, коли має на аноді позитивний потенціал відносно катоду (тобто, коли вторинна напруга трансфор-

матора  $e_2 > 0$ ). Проте ця можливість буде реалізована лише тоді, коли буде виконано іншу умову: з'явиться позитивна напруга керування  $u_{ке} > 0$ . На рис. 2 обидві умови були виконані в момент часу  $\omega t = \alpha < 180^\circ$ . Після відкриття тиристора вторинна напруга трансформатора прикладається до навантаження. Оскільки навантаження суто активне, форма струму  $i_d$  повторює форму прикладеної до навантаження напруги  $u_d$ . Форма струму вторинної обмотки трансформатора ідентична формі випрямленого струму. Коли вихідна напруга трансформатора знижується до нуля (при  $\omega t = 180^\circ$ ), струм через тиристор зникає, і він закривається. Випрямлена напруга теж дорівнює нулю. На наступному періоді живильної напруги процеси повторюються. Доки тиристор закритий, до нього через навантаження прикладена напруга вторинної обмотки трансформатора (лінія  $u_{VS1}$  на рис. 2). Напруга між анодом та катодом відкритого тиристора відсутня.

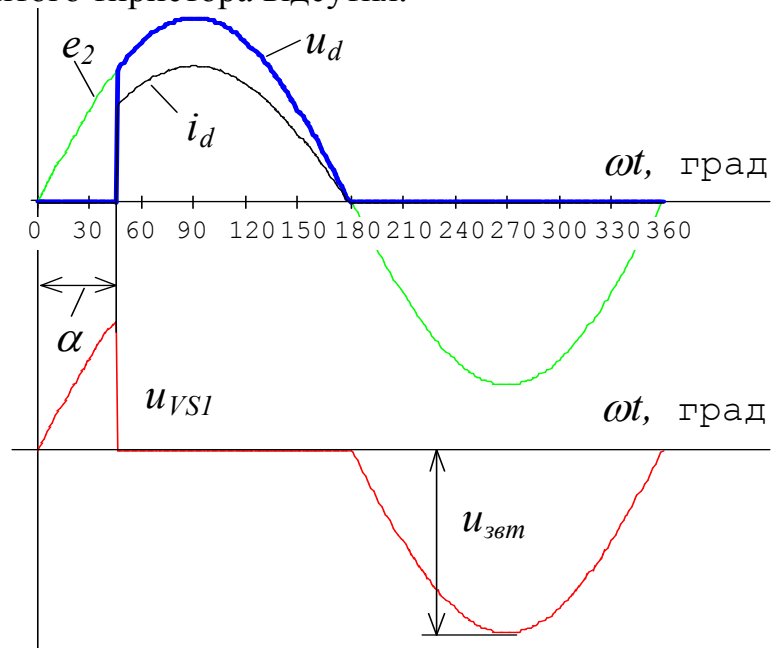


Рис. 2 Процеси в однофазному однопівперіодному випрямлячі за малого  $\alpha$

На рис. 3 зображені діаграми напруг та струмів для більшого кута керування. Як видно з рис. 2 та 3, випрямлений струм однофазного однопівперіодного випрямляча за активного навантаження завжди має паузу, не меншу від  $180^\circ$ .

Середня випрямлена напруга

$$\begin{aligned}
 U_d &= \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} e_2 d\omega t = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} E_{2m} \sin \omega t d\omega t = \frac{E_{2m}}{2\pi} [-\cos \pi + \cos \alpha] = \\
 &= \frac{E_{2m}}{2\pi} (1 + \cos \alpha) = U_{d0} \frac{(1 + \cos \alpha)}{2}, \tag{1}
 \end{aligned}$$

де  $U_{d0} = \frac{E_{2m}}{\pi}$  – середня випрямлена напруга при нульовім куті керування (чисельно дорівнює середній випрямленій напрузі некерованого випрямляча).

Середній випрямлений струм

$$I_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} i_d d\omega t = \frac{U_d}{R_H}.$$

Середній струм тиристора  $I_a = I_d$ .

Максимальні величини прямої та зворотної напруги на закритому тиристорі

$$U_{прт} = U_{звм} = E_{2m} = \frac{\pi U_{d0}}{2}.$$

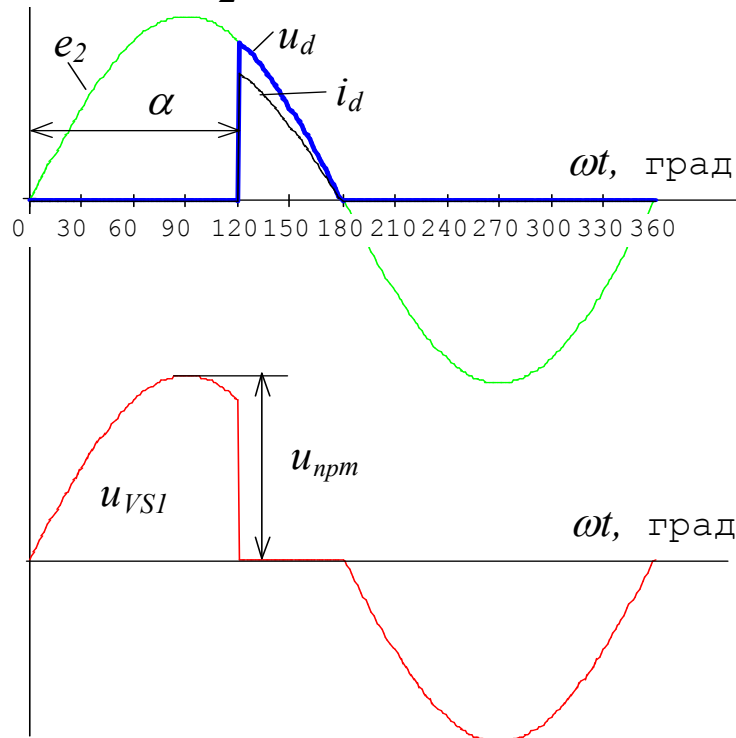


Рис.3 Процеси в однофазному однопівперіодному випрямлячі за великого  $\alpha$

### **Робота на активно-індуктивне навантаження**

Наявність у складі навантаження індуктивності суттєво змінює характер електромагнітних процесів у випрямлячі. Це насамперед стосується форми миттєвих струмів та моменту закриття тиристора. На рис. 4 та 5 зображені діаграми напруг та струмів з різними кутами керування.

Процеси у випрямлячі описуються рівнянням напруг

$$e_2 = i_d R_H + L_H \frac{di_d}{dt}.$$

Після відкриття тиристора випрямлений струм зростає не миттєво, як у випадку активного навантаження. Темп його зростання  $\frac{di_d}{dt} = \frac{e_{20}}{L_H}$  тим менший, чим більша індуктивність навантаження  $L_H$  та менша напруга вторинної обмотки на момент відкриття тиристора  $e_{20}$  (див. рис. 4). Тому випрямлений струм має більш згладжений характер.

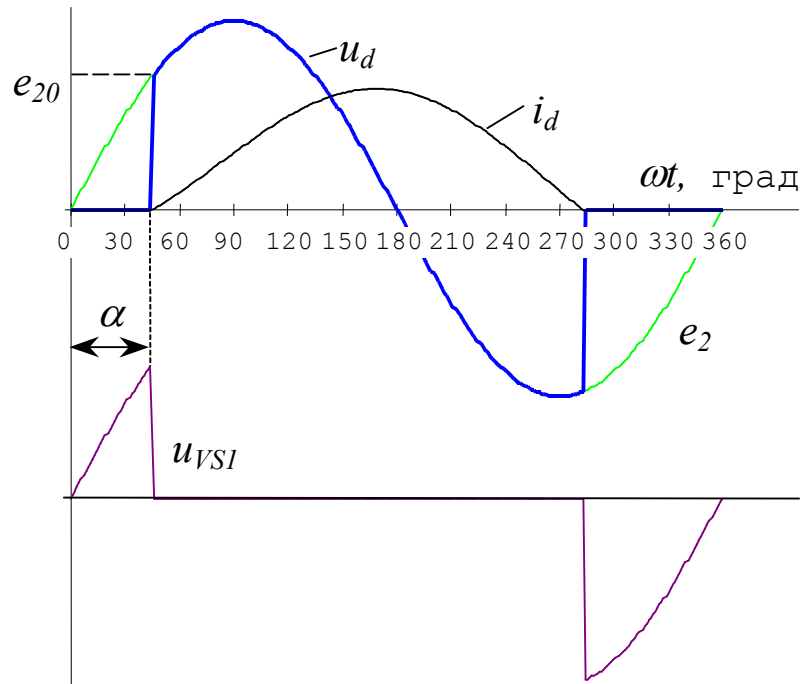


Рис.4 Процеси за  $RL$ -навантаження (малий  $\alpha$ )

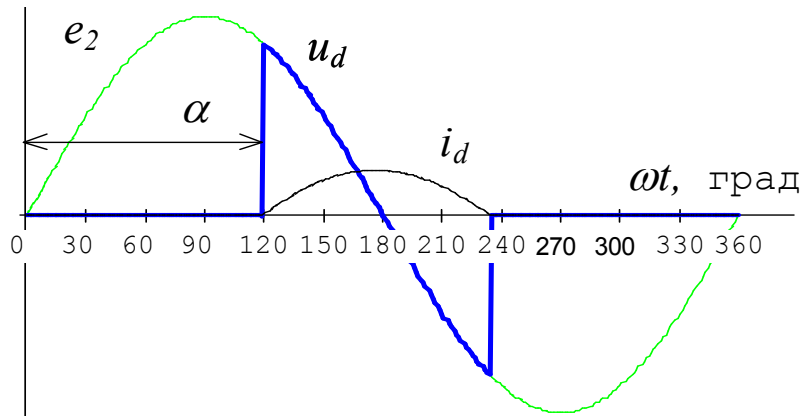


Рис.5 Процеси за  $RL$ -навантаження (великий  $\alpha$ )

На інтервалі зростання струму відбувається накопичення електромагнітної енергії в індуктивних елементах, а під час його зменшення – віддача її до зовнішнього кола (тобто, назад до трансформатора). ЕРС самоіндукції

$e_L = -L_H \frac{di_d}{dt}$  під час зменшення струму має той самий напрямок, що й сам

струм. Тому навіть тоді, коли напруга трансформатора змінить знак, струм деякий час тектиме у попередньому напрямі під впливом позитивної ЕРС самоіндукції. Коли вторинна напруга та ЕРС самоіндукції зрівняються, струм

$i_d = \frac{e_2 + e_L}{R_H}$  впаде до нуля, і тиристор закриється.

Тривалість відкритого стану тиристора більша, ніж за активного навантаження, внаслідок чого середня випрямлена напруга зменшується порівняно зі знайденою за формулою (1). Зменшується також середнє значення струму (бо воно пропорційне середній напрузі) та амплітуда його коливань.

За більшої індуктивності навантаження темп зміни струму нижчий, в індуктивних елементах накопичується більше енергії, тиристор закривається пізніше і тривалість імпульсу струму збільшується (рис. 6).

Завдяки наявності активного опору в контурі протікання струму завжди є втрати енергії, і тому тривалість зниження струму завжди менша від тривалості його збільшення.

Внаслідок цього в однофазній однопівперіодній схемі тиристор завжди встигає закритись ще до того, як отримає наступний керуючий імпульс. Тому тут за будь-яких кутів керування (крім  $\alpha=0$ ) та індуктивностей завжди є безструмові паузи.

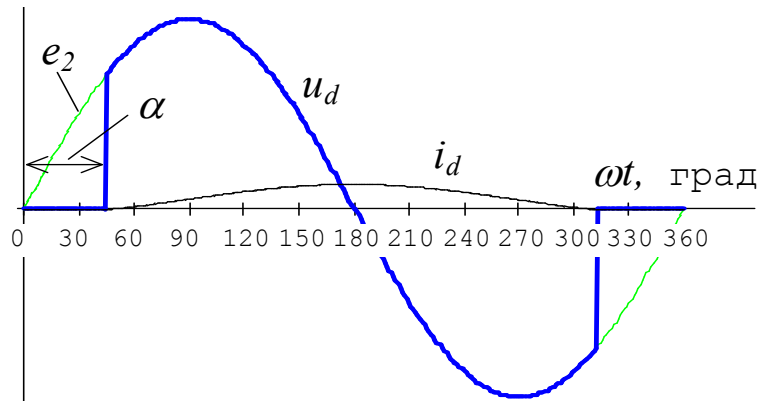


Рис. 6 Процеси за суто індуктивного навантаження

### 3.2. Однофазний мостовий випрямляч

#### Робота на активне навантаження

Схема однофазного мостового керованого випрямляча зображена на рис. 7,а.

На рис. 8 та 9 подані часові діаграми напруг та струмів при куті керування  $\alpha=30^\circ$  та  $120^\circ$ .

На інтервалі  $0 < \omega t < \alpha$  всі тиристори закриті, струм відсутній, а до тиристора *VS1* (та послідовно з'єднаного з ним *VS4*) прикладена пряма напруга  $u_{VS1} = e_2/2$ . Напруга до навантаження не прикладена.

У момент  $\omega t = \alpha$  тиристори *VS1* та *VS4* отримують на свої керуючі електроди позитивні потенціали і відкриваються.

На інтервалі  $\alpha < \omega t < 180^\circ$  під дією ЕРС трансформатора колом «Тр – *VS4* – навантаження – *VS1* – Тр» (див. рис. 7,б) протікає струм, і до навантаження прикладається напруга  $u_d = e_2$ .

У момент  $\omega t = \pi$  змінює знак ЕРС трансформатора, і тиристори *VS1* та *VS4* закриваються.

На інтервалі  $180 < \omega t < 180 + \alpha$  струм та напруга на навантаженні відсутні, а до закритого тиристора (наприклад, *VS1*) прикладена негативна напруга  $u_{VS1} = e_2/2$ .

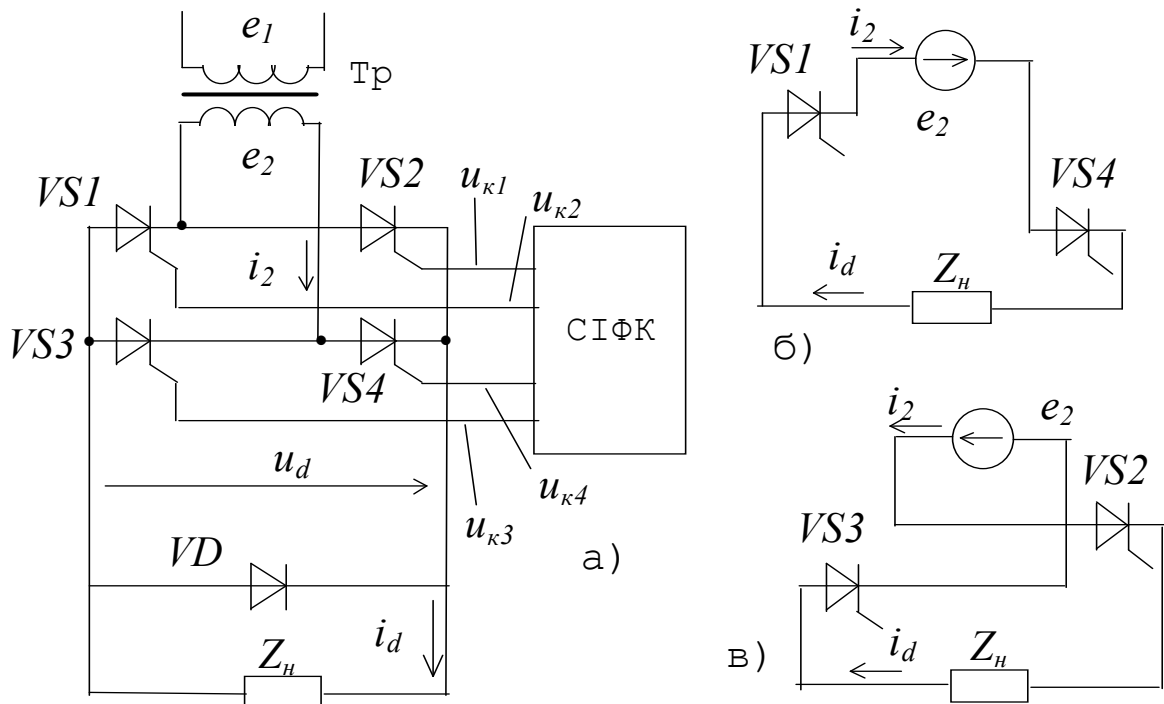


Рис.7 Однофазна мостова схема випрямлення

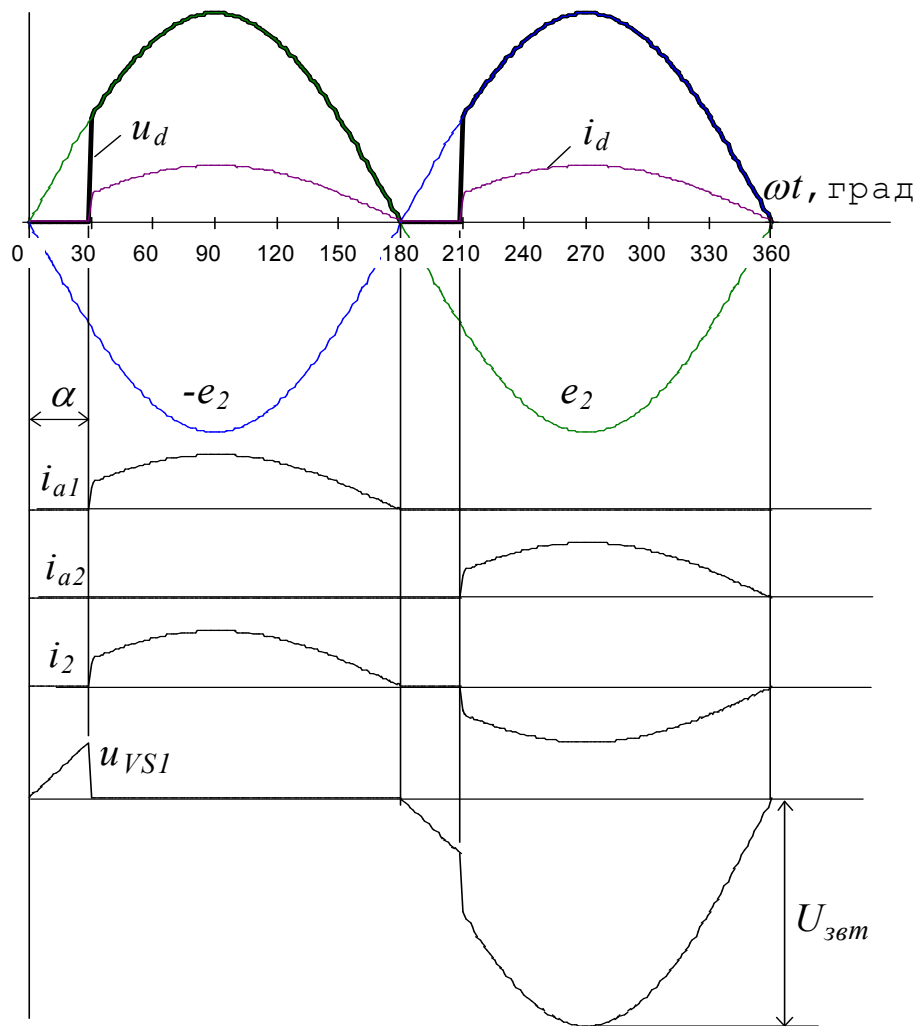


Рис.8 Процеси в мостовій схемі за суто активного навантаження

У момент  $\omega t = 360^0$  знову міняється знак ЕРС трансформатора, і тиристри  $VS2$  та  $VS3$  закриваються. Наступного періоду процеси повторюються.

На інтервалі  $180^0 + \alpha < \omega t < 360^0$  відкриті  $VS2$  та  $VS4$  (див. рис. 7,в), до навантаження прикладена напруга тієї ж полярності, що й на попередньому півперіоді. Випрямлений струм  $i_d$  має також незмінну полярність, але струм  $i_2$  вторинної обмотки трансформатора тепер тече в протилежному напрямі. До закритого тиристора  $VS1$  через відкритий  $VS3$  прикладена негативна напруга  $u_{VS1} = e_2$ .

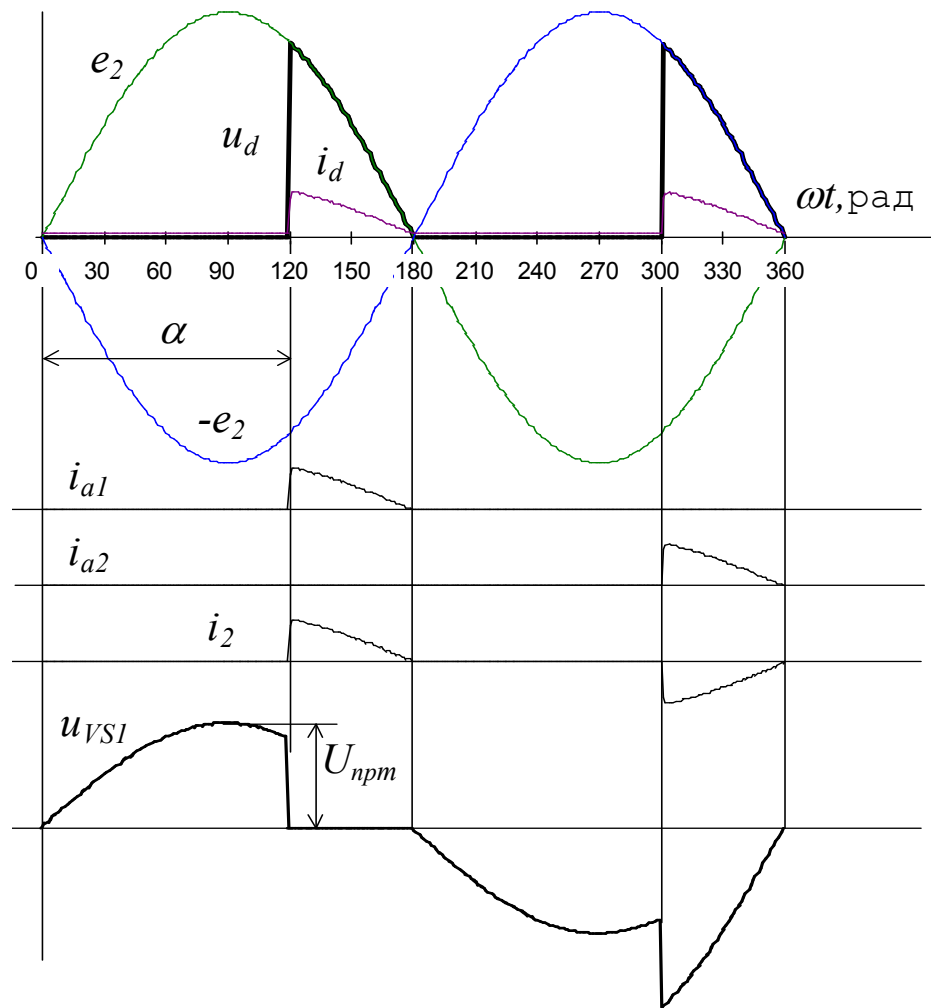


Рис. 9 Процеси в мостовій схемі після збільшення кута курування

Середня випрямлена напруга вдвічі більша, ніж у однопівперіодному випрямлячі

$$\begin{aligned}
 U_d &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} e_2 d\omega t = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} E_{2m} \sin \omega t d\omega t = \frac{E_{2m}}{\pi} [-\cos \pi + \cos \alpha] = \\
 &= \frac{E_{2m}}{\pi} (1 + \cos \alpha) = U_{d0} \frac{(1 + \cos \alpha)}{2}, \tag{2}
 \end{aligned}$$

де  $U_{d0} = \frac{2E_{2m}}{\pi}$ .

Середній випрямлений струм

$$I_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} i_d d\omega t = \frac{U_d}{R_n}.$$

Середній струм тиристора  $I_a = I_d/2$ .

Максимальна величина зворотної напруги поміж анодом та катодом

$$U_{звт} = E_{2m} = \frac{\pi U_{d0}}{2}.$$

Максимальна величина прямої напруги на закритому тиристорі (під час безструмової паузи)

$$U_{прт} = \frac{E_{2m}}{2} = \frac{\pi U_{d0}}{4}.$$

Чим більший кут керування, тим більша тривалість безструмової паузи, менші середній випрямлений струм та середня випрямлена напруга. Такий спосіб регулювання називають фазовою або фазо-імпульсною модуляцією.

Слід зауважити, що знак  $i_d$  завжди збігається зі знаком  $u_d$ , а знак  $i_2$  – зі знаком  $e_2$ . Це свідчить про те, що потік енергії в кожний момент часу має один напрямок – від живильної мережі до навантаження. Форма миттєвого випрямленого струму за активного навантаження подібна до форми миттєвої випрямленої напруги. Струм вторинної обмотки трансформатора – знакозмінний, але несинусоїдний. Фазовий зсув його відносно кривої ЕРС збільшується зі зростанням кута керування  $\alpha$ . Тому навіть за суто активного навантаження керований випрямляч для живильної мережі як споживач енергії має індуктивний характер. До того ж споживаний із мережі струм містить у собі вищі гармоніки. Усе це за досить великої потужності випрямляча ускладнює режим роботи живильної мережі та збільшує втрати енергії в ній.

### **Робота на активно-індуктивне навантаження**

Наявність у складі навантаження індуктивності суттєво змінює характер електромагнітних процесів у випрямлячі. Це насамперед стосується форми миттєвих струмів та процесу закриття тиристорів. На рис. 10, 11 та 12 зображені діаграми напруг та струмів при різних кутах керування.

При досить малих  $\alpha$  випрямлений струм, знижуючись завдяки зниженню ЕРС, не встигає впасти до нуля на той момент, коли напруга вже міняє свій знак ( $\omega t = 180^\circ$ ). Це обумовлене наявністю в контурі випрямленого струму не тільки негативної вже ЕРС  $e_2$ , а й позитивної ЕРС самоіндукції

$e_L = -L \frac{di_d}{dt}$ . На інтервалі часу  $180^\circ < \omega t < 180^\circ + \alpha$  енергія, що її накопичили

індуктивні елементи навантаження на попередньому етапі, віддається до живильної мережі. Про це свідчить те, що знаки відповідних миттєвих струмів та напруг ( $e_2$  та  $i_2$ ,  $u_d$  та  $i_d$ ) не збігаються. Доки ЕРС самоіндукції більша від ЕРС трансформатора, струм тектиме, підтримуючи у відкритому стані тиристори  $VS1$  та  $VS4$ . Тому можливий режим, коли на момент отримання



тиристорами  $VS2$ ,  $VS3$  керуючих імпульсів тиристори  $VS1$  та  $VS4$  ще відкриті (рис. 10). Утворюються два так звані контури природної комутації (рис. 13).

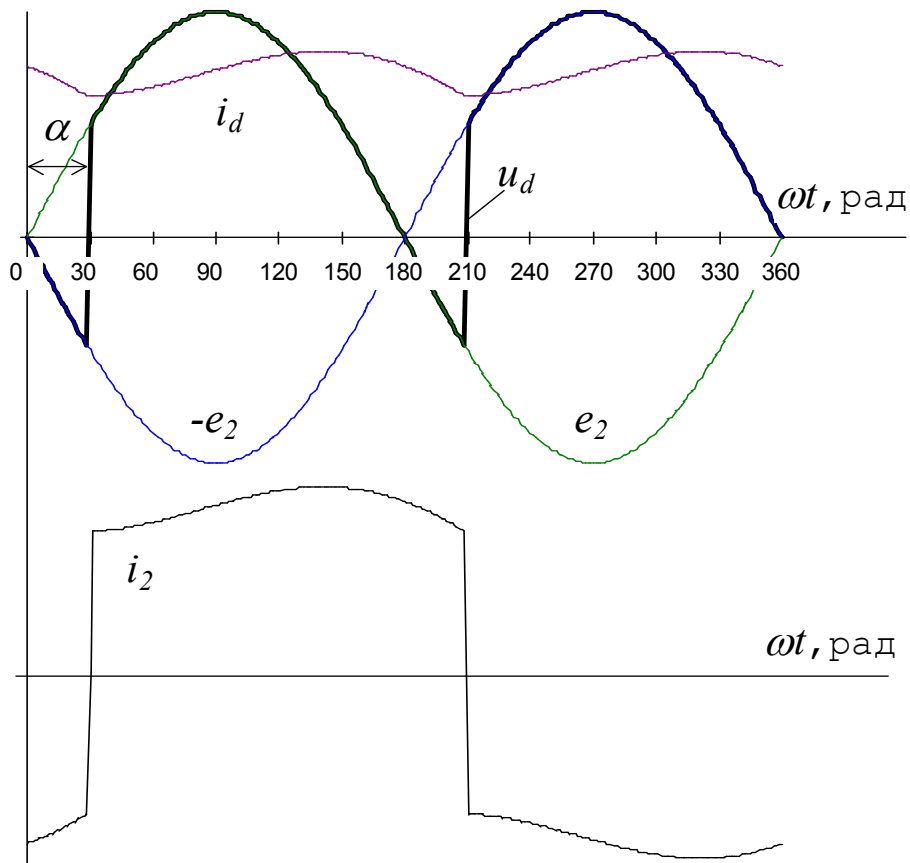


Рис. 10 Процеси в мостовій схемі за  $RL$ -навантаження (малий  $\alpha$ )

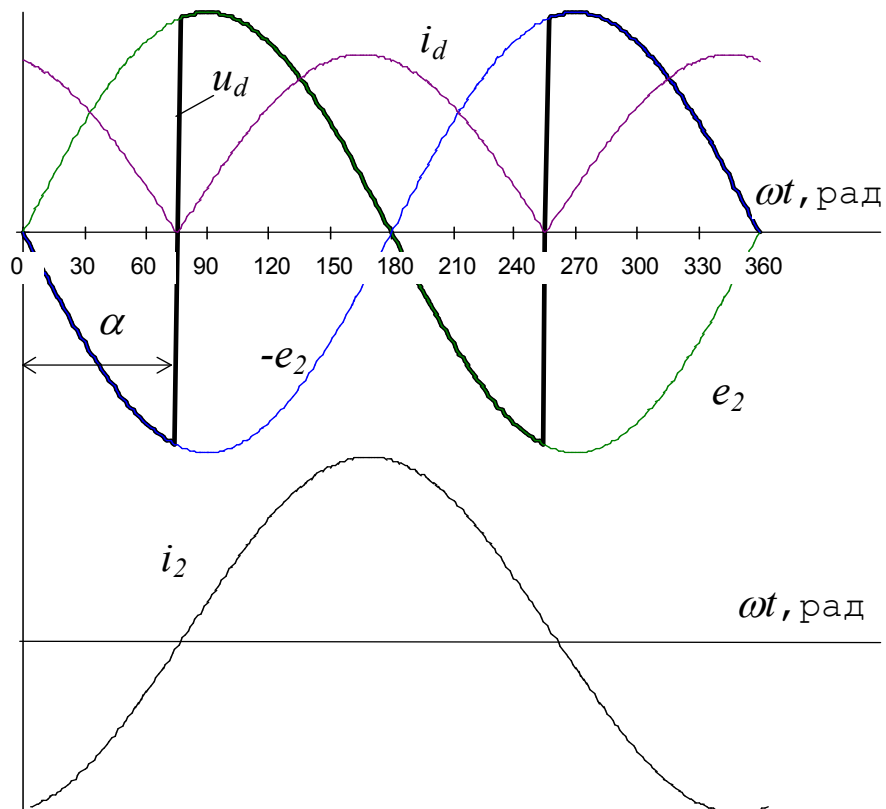


Рис. 11 Процеси в мостовій схемі за  $RL$ -навантаження (великий  $\alpha$ )

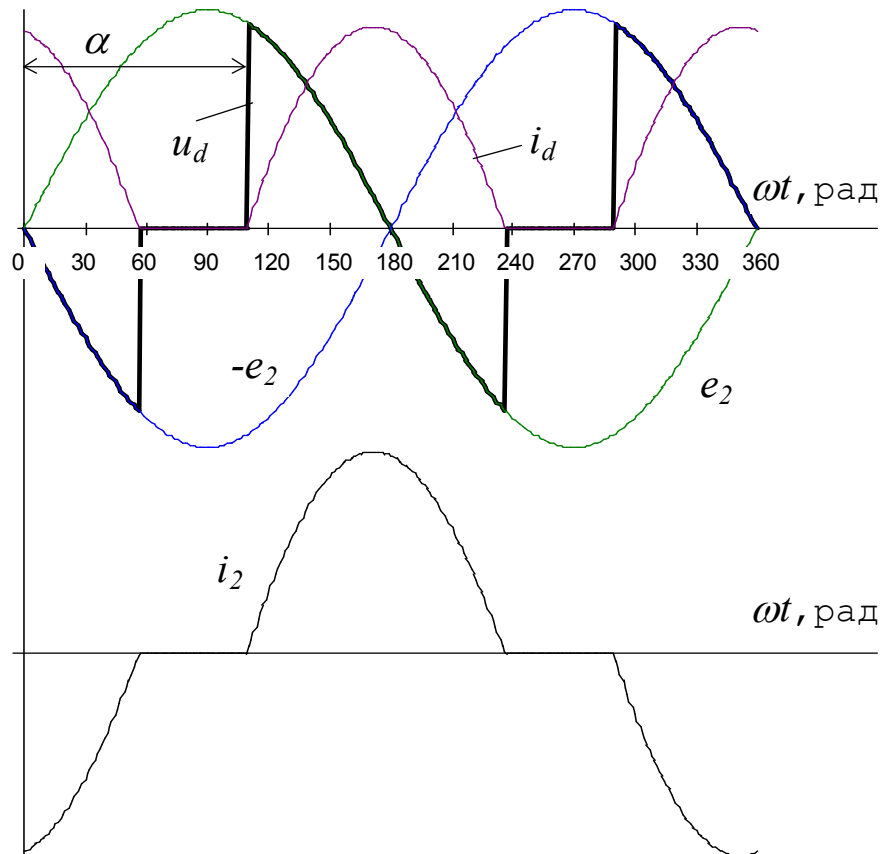


Рис. 12 Процеси в мостовій схемі за  $RL$ -навантаження (переривистий струм)

У цих контурах під впливом ЕРС трансформатора, яка вже встигла змінити знак, виникають комутаційні струми  $i_{к1}$  та  $i_{к2}$ . Обидва вони сприяють вимкненню тих тиристорів, що були відкриті досі ( $VS1$  та  $VS4$ ), та відкриттю тих, які щойно отримали керуючі імпульси. Оскільки ми знехтували індуктивністю вторинної обмотки трансформатора, процес зниження струму в  $VS1$  та  $VS4$  та збільшення його в  $VS2$  та  $VS3$  треба вважати миттєвим.

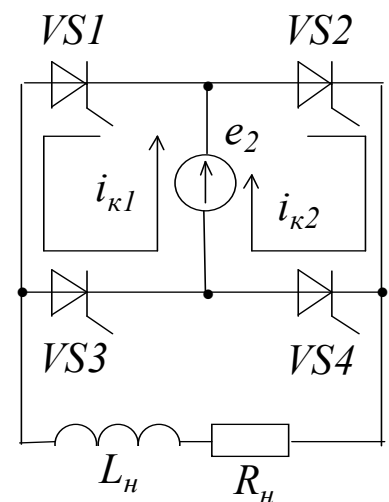


Рис. 13 Контури комутації

Після відкриття наступної пари тиристорів продовжується протікання випрямленого струму, але вже без паузи, на відміну від активного навантаження. Такий режим зветься режимом безперервного струму.

На інтервалі часу  $180^\circ < \omega t < 180^\circ + \alpha$  до навантаження прикладена негативна напруга. Тому середня випрямлена напруга за активно-індуктивного навантаження завжди менша, ніж за активного:

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} E_{2m} \sin \omega t d\omega t = \frac{E_{2m}}{\pi} [-\cos(\pi + \alpha) + \cos \alpha] =$$

$$= \frac{2E_{2m}}{\pi} \cos \alpha = U_{d0} \cos \alpha. \quad (3)$$

Коливання випрямленого струму значно менші, ніж при активному навантаженні. Тому при розрахунках випрямлячів з  $RL$ -навантаженням та під час аналізу процесів в них цими коливаннями нерідко нехтують, вважаючи випрямлений струм незмінним у часі. Тоді споживаний випрямлячем струм має практично прямокутний характер.

При подальшому збільшенні кута керування настає ситуація, коли миттєвий випрямлений струм падає до нуля саме в момент отримання черговими тиристорами керуючого імпульсу. Починається так званий граничний режим. Паузи в струмі ще відсутні (рис. 11). Якщо збільшувати  $\alpha$  і надалі, енергії, накопиченої в індуктивних елементах під час зростання струму, вже не вистачає для підтримки його протікання до моменту відкриття наступної пари тиристорів. У кривій струму з'являються паузи, настає режим переривистого струму (рис. 12).

Збільшення співвідношення  $L_n/R_n$  сприяє розширенню області безперервного струму та зменшенню пульсацій  $i_d$ . Тому послідовно з навантаженням часто вмикають додаткову індуктивність – згладжувальний дросель.

### **3.3 Мостовий випрямляч зі зворотнім діодом**

В нереверсивних схемах з переважно індуктивним навантаженням на виході випрямляча вмикають т.з. зворотній діод  $VD$  (пунктир на рис. 7,а). Діаграми напруг та струмів у такій схемі зображені на рис. 14 та 15.

Одразу після відкриття тиристорів характер процесів такий самий, як і в схемі без діода. Проте, як тільки напруга вторинної обмотки міняє знак, вона відкриває діод, який шунтує навантаження випрямляча. Струм навантаження під дією ЕРС самоіндукції, експоненціально знижуючись, продовжує текти у попередньому напрямку, але вже через діод. Темп його зниження менший, ніж у схемі без діода, коли негативна випрямлена напруга сприяла швидкому зменшенню струму. На момент відкриття наступної пари тиристорів струм навантаження не встигає впасти до нуля. Тому у схемі зі зворотнім діодом паузи у струмі взагалі неможливі.

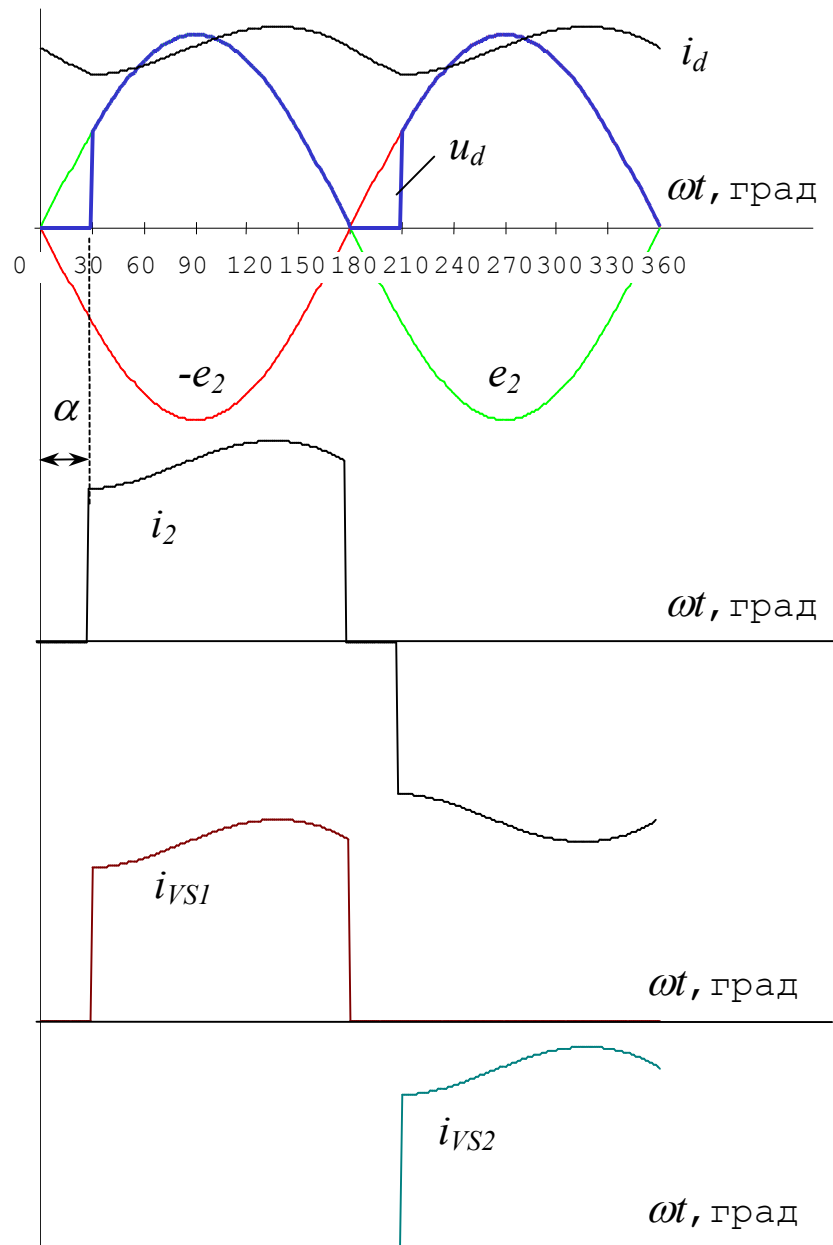


Рис. 14 Вплив зворотного діода (малий  $\alpha$ )

Після відкриття діода всі тиристори закриваються, а випрямлена напруга залишається нульовою.

Переваги схеми з діодом:

- більша середня випрямлена напруга;
- більший коефіцієнт потужності (крива струму трансформатора розташована лівіше, див. рис. 15);
- менші ЕРС самоіндукції і перенапруження в навантаженні та тиристорах після закриття останніх.

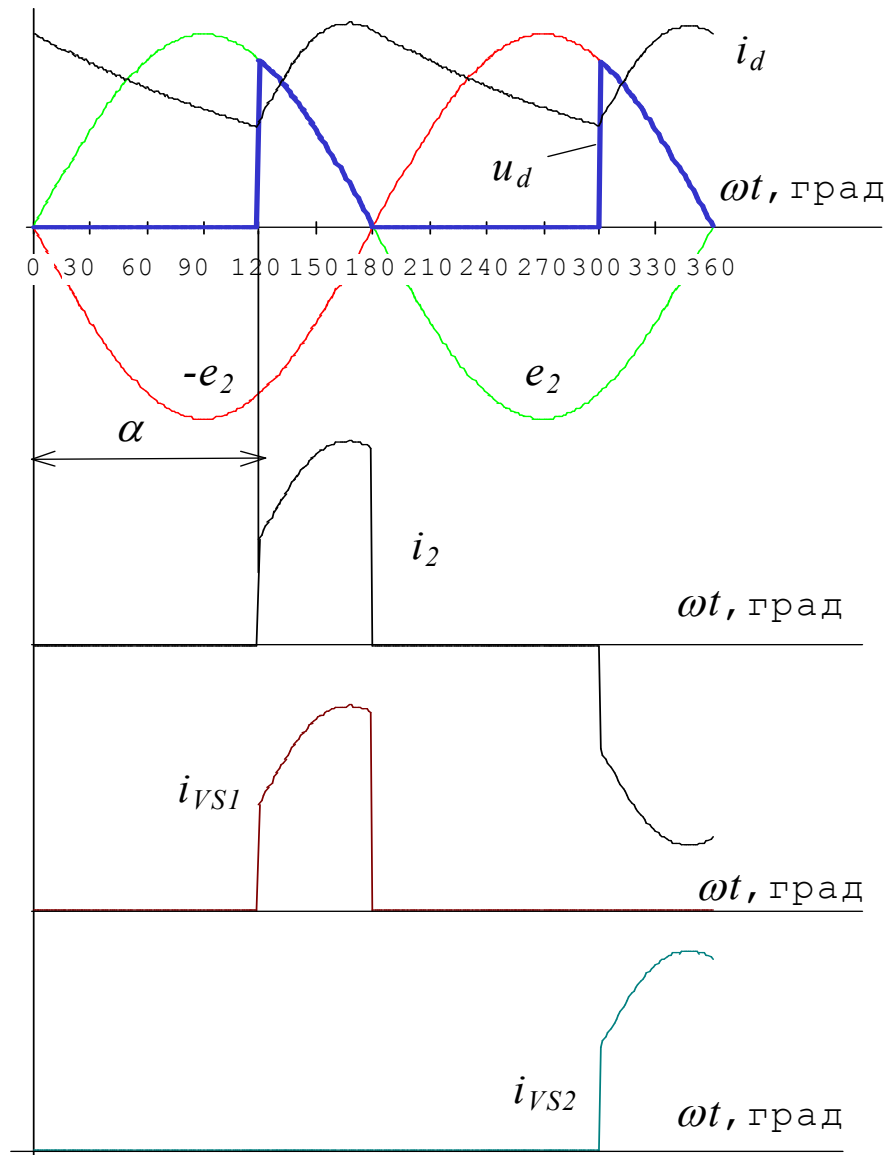


Рис. 15 Вплив зворотного діода (великий  $\alpha$ )

### 3.4. РЕГУЛЮВАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Регулювальними характеристиками (РХ) керованого випрямляча називають залежність середньої випрямленої напруги від кута керування або вхідної (задавальної) напруги. Розглянемо РХ для однофазної мостової схеми без зворотного діода.

За безперервного струму РХ описується рівнянням (3). При суто активному навантаженні, коли струм завжди переривистий, – рівнянням (2). На рис. 16 зображені регулювальні характеристики за активно-індуктивного навантаження для різних індуктивностей навантаження.

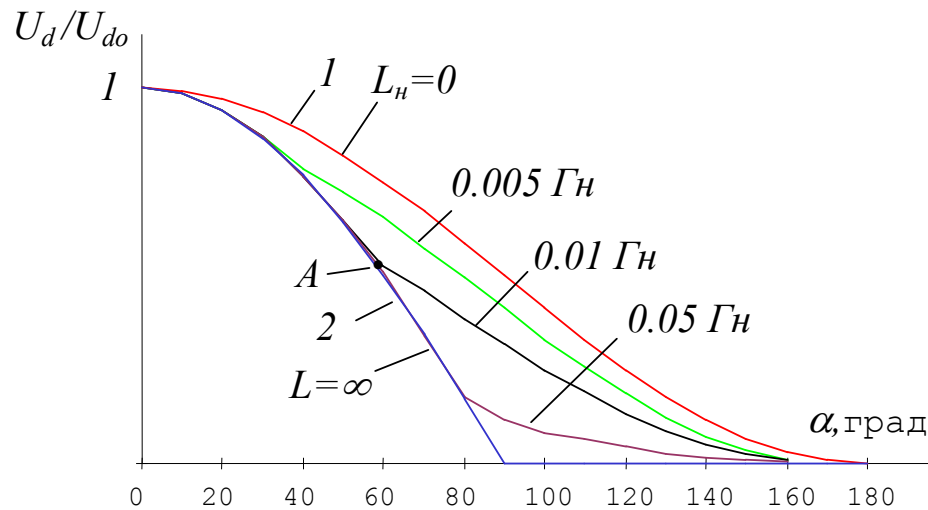


Рис. 16 Регулювальні характеристики

При збільшенні кута керування від нуля струм спочатку безперервний, і робоча точка переміщується вздовж лінії 2. Подальше збільшення кута керування призводить до гранично-безперервного режиму (т. А для індуктивності  $L_n=0,01$  Гн). При ще більших кутах виникає безструмова пауза, завдяки чому середня випрямлена напруга більша, ніж могла би бути за безперервного струму. Чим більша індуктивність, тим при більших кутах виникає переривистий струм і тим нижче на лінії 2 буде точка граничного режиму. Усі РХ лежать поміж лініями 1 (суто активне навантаження) та 2 (суто індуктивне).

#### 4. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

- 4.1. Робота виконується на математичних моделях випрямлячів, реалізованих за допомогою електронних таблиць Excel.
- 4.2. Клітинки, в яких розташовані змінні вихідні дані, виділені кольором.
- 4.3. Змістом роботи є дослідження електромагнітних процесів на готових моделях шляхом зміни вихідних даних (параметрів навантаження, кутів керування тощо).
- 4.4. Результатом виконання роботи є файл Excel, який, крім самих моделей, містить у собі діаграми, отримані у процесі досліджень. Файл повинен мати ім'я, яке складається з фамілії студента та номера лабораторної роботи.

#### 5. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Внаслідок чого за  $RL$ -навантаження випрямлений струм не зникає одразу після зміни полярності миттєвої випрямленої напруги?
2. Як зміниться момент закривання тиристора на рис. 4, якщо збільшити кут керування?
3. Як зміниться момент закривання тиристора на рис. 4, якщо зменшити індуктивність навантаження?
4. Як зміниться момент закривання тиристора на рис. 4, якщо збільшити активний опір навантаження?
5. На яких інтервалах часу (рис. 4) енергія передається від мережі до навантаження і на яких – у протилежному напрямку?

6. Як треба змінювати кут керування, індуктивність навантаження та його активний опір, щоб зменшити тривалість безструмової паузи порівняно з ситуацією на рис. 13?
7. Скільки тиристорів одночасно відкрито в однофазному мостовому випрямлячеві на міжкомутаційному інтервалі?
8. Скільки тиристорів одночасно відкрито під час комутації в однофазному мостовому випрямлячеві?
9. Покажіть можливі шляхи протікання випрямленого струму в мостовому випрямлячеві.
10. Як збільшення кута керування впливає на тривалість відкритого стану зворотного діода в схемі мостового випрямляча?
11. Як співвідносяться між собою середні випрямлений струм та струм тиристора мостового випрямляча?
12. Як збільшення індуктивності навантаження впливає на рівень середньої випрямленої напруги в режимі переривистого струму?
13. В якому діапазоні кутів керування можливий безперервний струм у мостовій схемі?

### **СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Казачковський М.М. Керовані випрямлячі. – Дніпропетровськ: НГА України, 1999. – 228 с.
2. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Преобразовательная техника. – К.: Вища школа, 1983. – 431 с.
3. Справочник по преобразовательной технике. Под ред. И.М.Чиженко. – К.: Техніка, 1978. – 447 с.
4. Шипилло В.П. Автоматизированный вентильный электропривод. – М.: Энергия, 1969. – 400 с.
5. Ривкин Г.А. Преобразовательные устройства. – М.: Энергия, 1970. – 544 с.

## Лабораторна робота СПАЕ-4

### “Дослідження однофазного мостового випрямляча при роботі на проти-ЕРС”

#### 1. МЕТА РОБОТИ

Вивчити особливості електромагнітних процесів та статичних характеристик однофазного мостового випрямляча при роботі на проти-ЕРС.

#### 2. ПРОГРАМА РОБОТИ

- 2.1. Дослідження електромагнітних процесів у мостовому випрямлячі при роботі у випрямному режимі.
  - 2.1.1. Дослідити вплив проти-ЕРС та кута керування на форму миттєвих випрямлених напруги та струму, а також на середні випрявлені напругу та струм у режимі безперервного та переривистого струму;
  - 2.1.2. Дослідити вплив проти-ЕРС на тривалість імпульсу випрямленого струму у режимі переривистого струму;
  - 2.1.3. Дослідити вплив проти-ЕРС на кут керування, при якому виникає режим гранично-безперервного струму;
  - 2.1.4. Дослідити роботу випрямляча при малих кутах керування ( $\alpha < \alpha_{\min}$ ).
- 2.2. Дослідження електромагнітних процесів у мостовому випрямлячі при роботі в інверторному режимі.
  - 2.2.1. Дослідити вплив проти-ЕРС та кута керування на форму миттєвих випрямлених напруги та струму, а також на середні випрявлені напругу та струм у режимі безперервного та переривистого струму;
  - 2.2.2. Дослідити вплив проти-ЕРС на тривалість імпульсу випрямленого струму у режимі переривистого струму;
  - 2.2.3. Дослідити вплив проти-ЕРС на кут керування, при якому виникає режим гранично-безперервного струму.
  - 2.2.4. Порівняти фазовий зсув струму вторинної обмотки трансформатора відносно напруги у випрямному та інверторному режимах.
- 2.3. Дослідження електромагнітних процесів у мостовому випрямлячі з урахуванням механічних перехідних процесів у двигуні.
  - 2.3.1. Дослідити залежність середнього випрямленого струму від моменту статичного навантаження двигуна.
  - 2.3.2. Дослідити роботу випрямляча при малих кутах керування (не більших від  $30^\circ$ ).
- 2.4. Дослідження регулювальних характеристик  $U_d = f(\alpha)$  при різних проти-ЕРС у випрямному та інверторному режимі.



- 2.4.1. Задавши позитивну проти-ЕРС, монотонно збільшувати кут керування від нуля до  $165^\circ$  і спостерігати форму випрямленої напруги та її середнє значення. Порівняти характер зміни середньої напруги с регульовальними характеристиками;
- 2.4.2. Повторити те ж саме для інших рівнів проти-ЕРС (у тому числі менших від нуля).
- 2.5. Дослідження зовнішніх характеристик  $U_d = f(I_d)$  при різних кутах керування при роботі на двигун постійного струму.
- 2.5.1. Встановити кут керування  $\alpha$ , збільшуючи статичний струм двигуна, спостерігати форму та середнє значення випрямленої напруги. Порівняти характер зміни середньої напруги із зовнішніми характеристиками.

### 3. ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Найпоширеніша область застосування керованих випрямлячів - електричний привод, де їх навантаженням найчастіше є обмотка якоря двигуна постійного струму. Характерна особливість обмотки якоря як навантаження - наявність у ланцюзі якоря не тільки активного опору та індуктивності, а і проти-ЕРС, яка пропорційна швидкості обертання якоря двигуна. Розглянемо спочатку електромагнітні процеси у випрямлячі при роботі на проти-ЕРС, що не змінюється у часі. Схема заміщення якорного ланцюга зображена на рис.1.

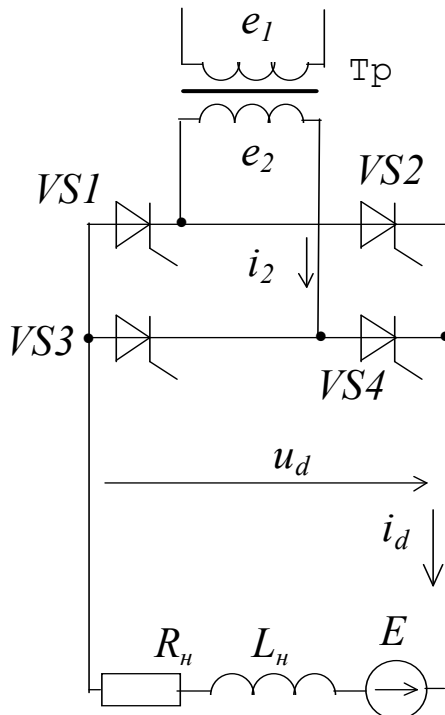


Рис.1 Схема випрямляча

#### 3.1. Випрямний режим

У випрямному режимі проти-ЕРС  $E$  має напрямок, протилежний середній випрямленій напрузі, а по модулю завжди менша від неї (на рис.1 показаний напрямок проти-ЕРС саме для цього випадку). Тому випрямлений струм спрямований згідно з середньою випрямленою напругою та назустріч проти-ЕРС. Це означає, що електрична енергія віддається випрямлячем обмотці якоря, де вона кінець кінцем перетворюється на механічну.

Електромагнітні процеси в колі випрямленого струму описуються рівнянням

$$u_d = i_d R_n - E - L_n \frac{di_d}{dt} \quad (1)$$

На рис. 2 зображені випрямлені напруга та струм для  $E=0$  (тобто, при непорушному якорі). На рис. 3-5 – для різних рівнів проти-ЕРС та тих самих активного опору, індуктивності навантаження та кута керування. Порівнюючи згадані рисунки, можна помітити, що збільшення проти-ЕРС зменшує середнє значення випрямленого струму. При досить великій проти-

ЕРС різниця між середньою випрямленою напругою та проти-ЕРС вже невелика, середній струм зменшується настільки, що індуктивні елементи не встигають накопичити досить електромагнітної енергії для підтримки струму. Струм зникає раніш, ніж відкриється наступна пара тиристорів (див.

рис.4). Умовою для зникнення струму  $i_d = \frac{e_2 - E - L_n \frac{di_d}{dt}}{R_n}$  є рівність

$$e_2 - E = L_n \frac{di_d}{dt}.$$

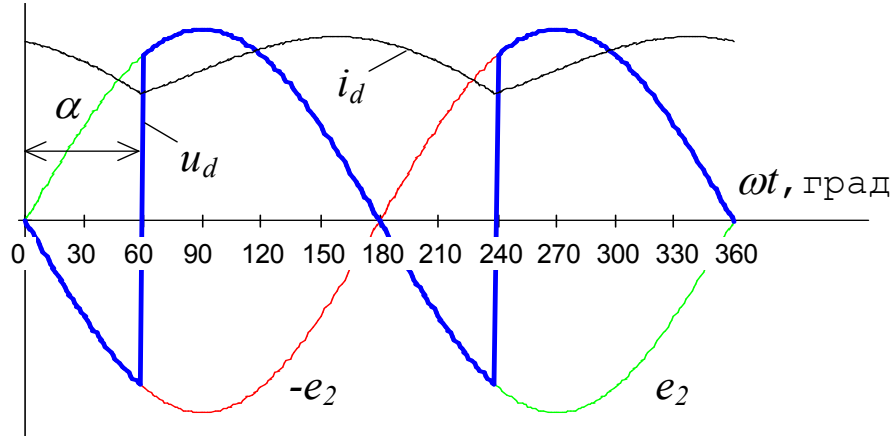


Рис.2 Напруги і струм за відсутності проти-ЕРС

Поки струм відсутній, напруга у ланцюзі навантаження дорівнює проти-ЕРС. Тому у режимі переривистого струму збільшення проти-ЕРС збільшує також і середнє значення випрямленої напруги (порівн. рисунки 3-5).

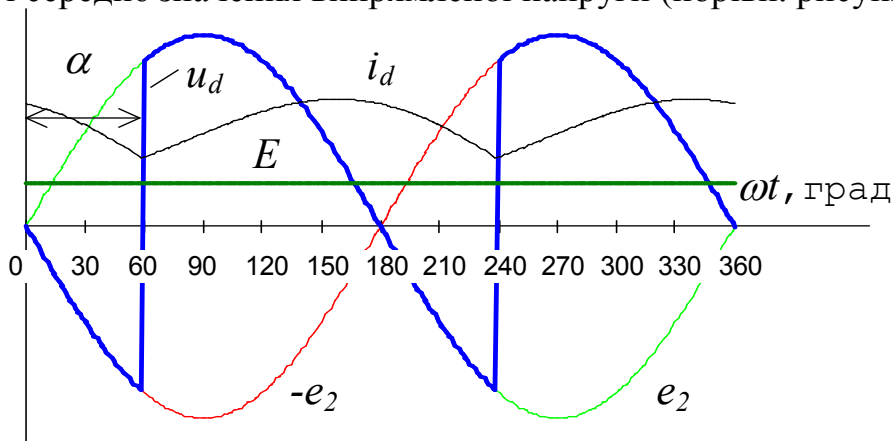


Рис.3 Напруги і струм за наявності проти-ЕРС (безперервний струм)

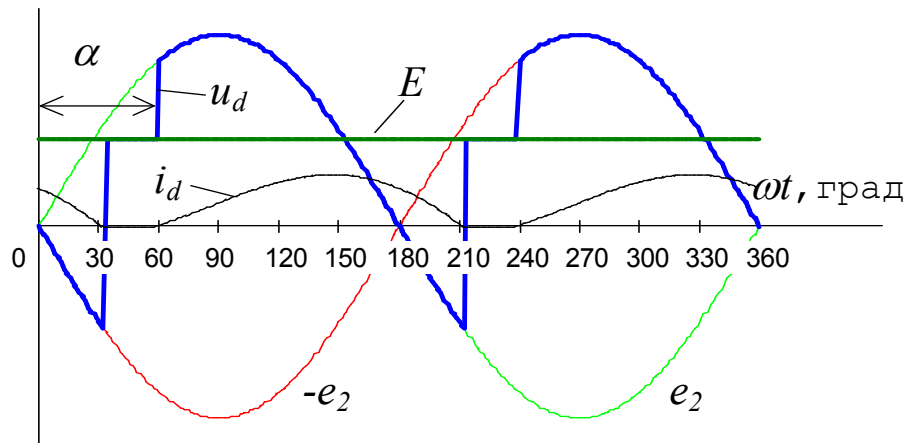


Рис.4 Напруги і струм за наявності проти-ЕРС (переривистий струм)

Якщо проти-ЕРС стане більша від максимальної ЕРС трансформатора, тиристори не зможуть відкритися, оскільки до їх анодів буде завжди прикладений позитивний потенціал. Зміна кута керування призводить до тих самих наслідків, що і при активно-індуктивному навантаженні.

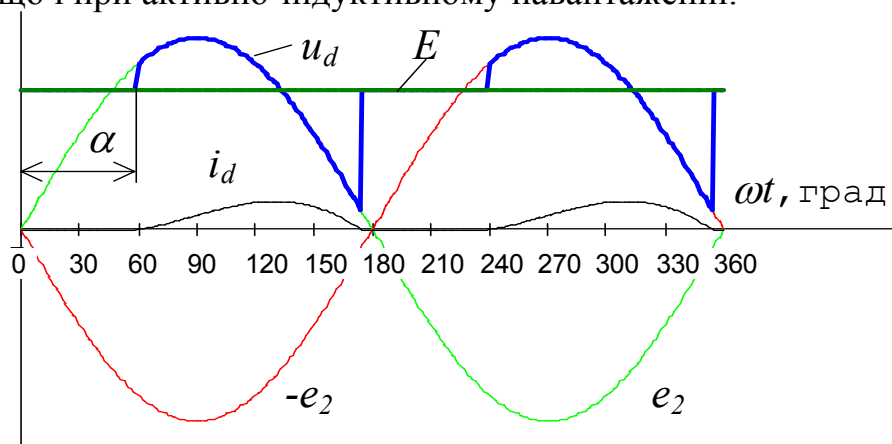


Рис.5 Напруги і струм за наявності великої проти-ЕРС

Одразу після відкриття тиристорів миттєва випрямлена напруга більша від проти-ЕРС, миттєвий струм співпадає за напрямком з напругою, електрична енергія віддається випрямлячем джерелу проти-ЕРС (обмотці якоря), накопичується в індуктивності у вигляді енергії електромагнітного поля та частково виділяється у вигляді тепла в активному опорі навантаження. Як тільки миттєва напруга стає меншою від проти-ЕРС, струм під впливом останньої починає зменшуватися і енергія, накопичена в індуктивних елементах, знову перетворюється на електричну та віддається обмотці якоря. На інтервалі, коли знаки струму та напруги не співпадають (див. рис.3, 4), частка цієї енергії потрапляє також і назад до вторинної обмотки трансформатора. Напрямок передачі енергії від випрямляча до обмотки якоря у випрямному режимі незмінний, оскільки незмінні знаки струму та проти-ЕРС.

Специфічною особливістю роботи на проти-ЕРС є неможливість відкриття тиристорів при досить малих кутах керування. На рис.6 тиристори отримують керуючі імпульси у момент часу  $\omega t = \alpha$ , коли миттєва живильна напруга  $e_2$  поки ще менша від проти-ЕРС.

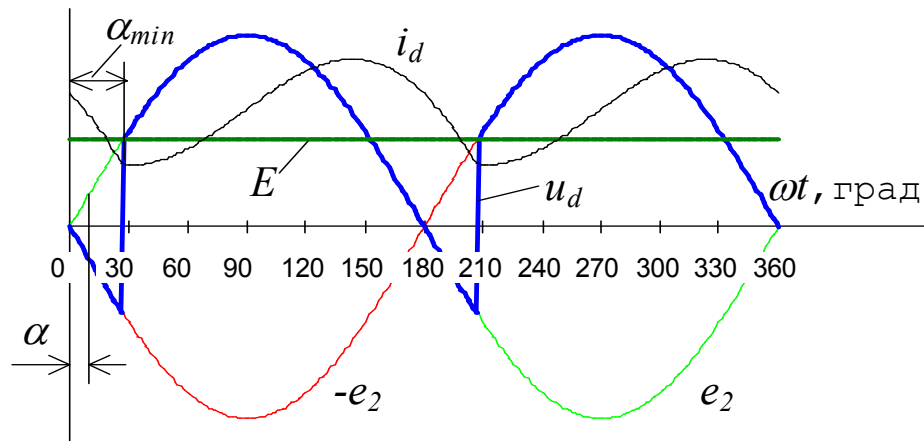


Рис.6 Щодо природи мінімального кута керування

Оскільки до катодів тиристорів прикладена позитивна напруга  $E - e_2 > 0$ , тиристири не відкриються, поки не зміниться знак цієї напруги.

Це стане можливим тільки момент часу  $\omega t > \alpha_{\min} = \arcsin \frac{E}{U_{2m}}$ . До того

часу залишаться відкритими ті тиристири, які працювали на попередньому півперіоді. Для відкриття наступної пари тиристорів потрібно, щоб керуючий імпульс не був знятий з керуючих електродів до моменту  $\omega t = \alpha_{\min}$ . Інакше тиристири взагалі не відкриються. Звичайно, що кожному значенню проти-ЕРС відповідає своє значення мінімального кута керування.

### 3.2. Інверторний режим

Якщо змінити знак проти-ЕРС та зробити кут керування більшим від  $90^\circ$  (середня випрямлена напруга при таких кутах теж може мати інший знак), випрямляч переходить до інверторного режиму. На рис.7 зображені діаграми напруг та струму при  $\alpha=120^\circ$  і  $E=0$ . На рис.8,9 - те ж саме при різних проти-ЕРС.

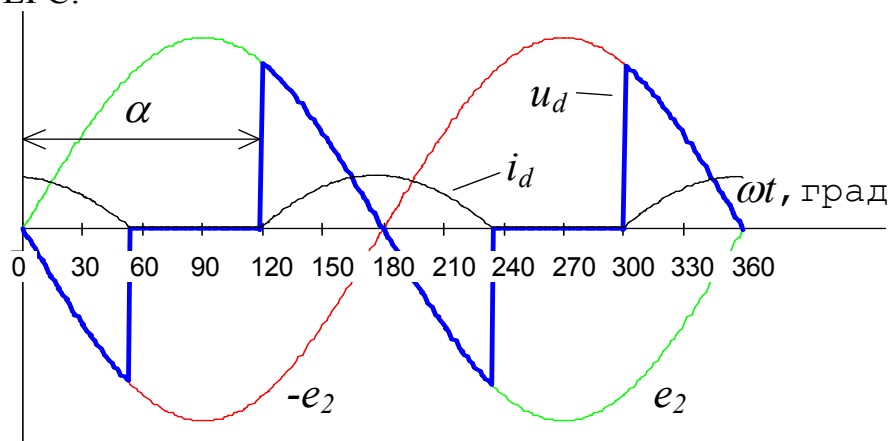


Рис.7 Процеси за відсутності проти-ЕРС

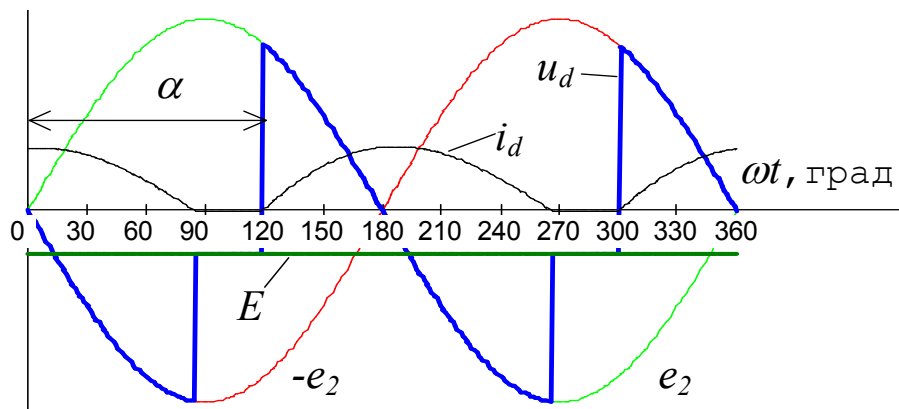


Рис.8 Процеси за наявності проти-ЕРС, направленої за струмом

Поява проти-ЕРС, ввімкненої згідно з напрямком струму, призводить до збільшення його середнього значення та тривалості протікання (див. рис.8). Завдяки цьому середня випрямлена напруга стає негативною, хоч і меншою по модулю від проти-ЕРС (на падіння напруги в активному опорі). Оскільки протягом усього інтервалу провідності напрями струму та проти-ЕРС співпадають, енергія віддається від джерела проти-ЕРС до випрямляча та вторинної обмотки трансформатора і далі до живильної мережі. Подальше збільшення проти-ЕРС сприяє зменшенню і взагалі зникненню безструмової паузи (рис.9).

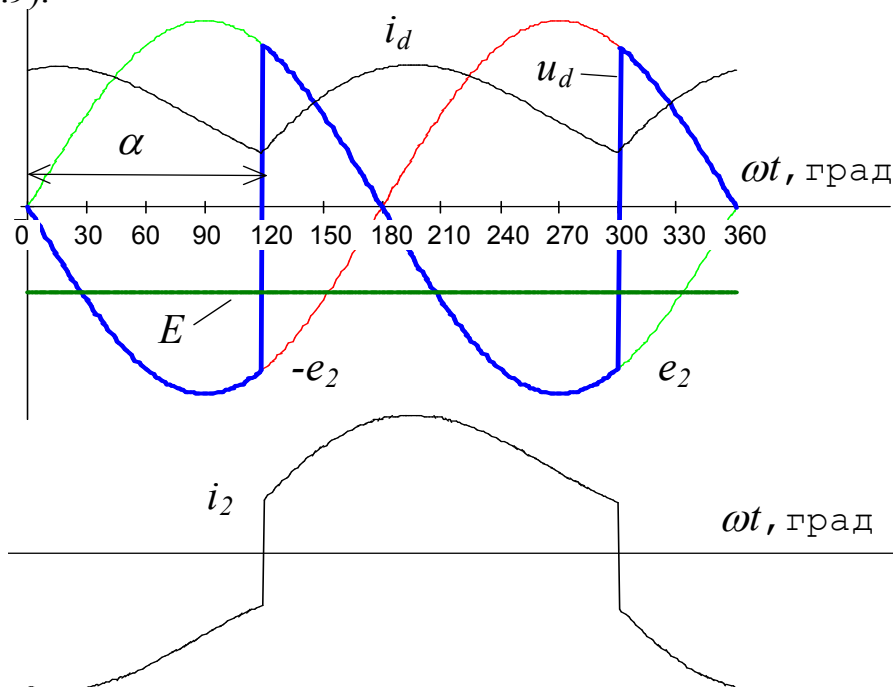


Рис.9 Вплив збільшення величини проти-ЕРС

Слід зауважити, що в інверторному режимі зсув між споживаним випрямлячем струмом та ЕРС вторинної обмотки трансформатора більший за  $90^\circ$  (див. рис.9).

### 3.3. Особливості процесів з урахуванням механічної інерції двигуна

У попередніх розділах при розгляді електромагнітних процесів у випрямлячі проти-ЕРС вважалася незалежною від часу. Фактично це означало,

що момент інерції двигуна настільки великий, що зміною швидкості та ЕРС обмотки якоря при коливаннях струму можна знехтувати.

Насправді ж зміна струму, споживаного двигуном, матиме наслідком зміну рушійного моменту, швидкості та проти-ЕРС. Процеси в такій електромеханічній системі описують системою диференціальних рівнянь, куди, крім рівняння (1), входить рівняння другого закону Ньютона для обертального руху (т.з. рівняння руху електропривода):

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (2)$$

а також два алгебраїчних рівняння:

$$M = c\Phi i_d; \quad (3)$$

$$E = c\Phi \omega. \quad (4)$$

В рівняннях (2)-(4)  $M$  - рушійний момент двигуна;  $M_c$  - статичний момент (момент опору, який виникає в механізмі під час його руху);  $J$  - момент інерції двигуна;  $c\Phi$  - незмінний (для даної задачі) коефіцієнт пропорційності.

Процеси в електричній частині електропривода, які описуються рівнянням (1), і в механічній його частині, що характеризуються рівнянням (2), впливають один на одного завдяки рівнянням (3) та (4). Оскільки найчастіше механічна інерція набагато більша від електромагнітної, у багатьох випадках процес зміни струму відбувається на фоні практично незмінної швидкості та проти-ЕРС. Рівень проти-ЕРС можна знайти як усталене значення з рівняння

(1), прийнявши  $u_d = U_d$ ,  $i_d = I_d = I_c = \frac{M_c}{c\Phi}$  та  $\frac{di_d}{dt} = 0$ :

$$E = U_d - I_c R_n. \quad (5)$$

Як видно з рівняння (5), рівень проти-ЕРС залежить від середнього значення прикладеної до обмотки якоря напруги та статичного (усталеного) струму, пропорційного моменту навантаження. Тобто проти-ЕРС двигуна встановлюється природним шляхом завдяки внутрішнім властивостям двигуна.

Завдяки самовстановленню ЕРС двигуна і його залежності від прикладеної напруги мінімальний кут керування для конкретної схеми випрямлення залежить лише від середнього струму. Цей кут можна знайти, прирівнявши ЕРС з рівняння (5)  $E = U_d - I_c R_n \approx U_{d0} \cos \alpha$  до миттєвого значення змінної напруги  $e_2 = E_{2m} \sin \alpha$ :

$$\alpha = \alpha_{\min} = \arctg \frac{U_{d0}}{E_{2m}} = \arctg \frac{2}{\pi} = 32,5^\circ.$$

З урахуванням падіння напруги в активному опорі цей кут може бути трохи більшим.

### 3.4. Регулювальні та зовнішні характеристики

У режимі безперервного струму незалежно від рівня проти-ЕРС регулювальна характеристика має той же вигляд, що і при роботі на активно-індуктивне навантаження

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha. \quad (6)$$

Збільшення кута керування зменшує випрямлену напругу, пересуваючи робочу точку донизу і вправо вздовж косинусоїди (6). Це неминуче призводить до виникнення гранично-безперервного режиму (т.А на рис.10).

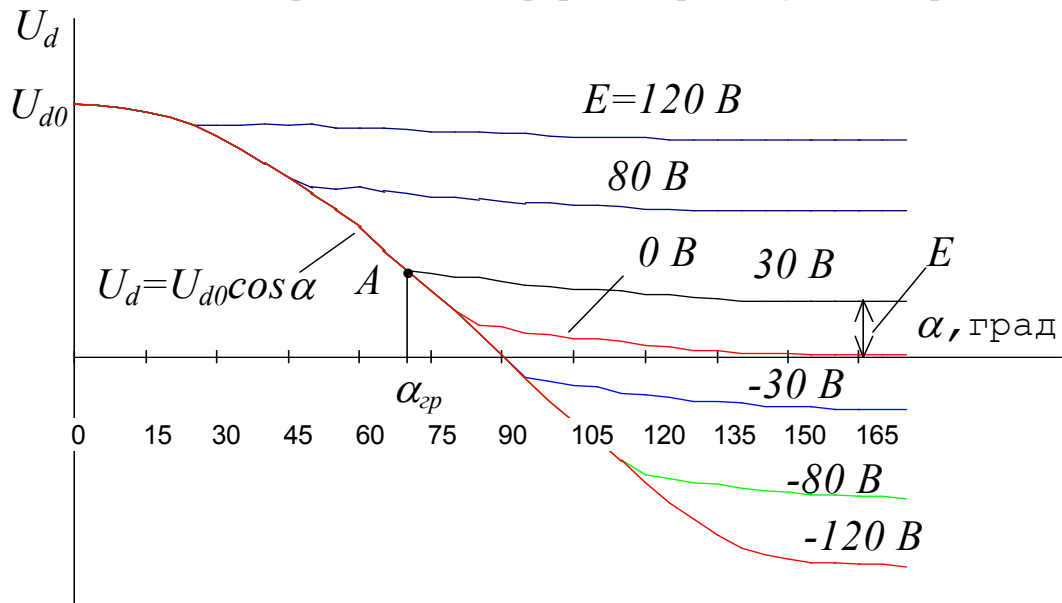


Рис.10 Регулювальні характеристики

При подальшому збільшенні кута керування випрямляч переходить до режиму переривистого струму, в якому середня випрямлена напруга більша, ніж при безперервному струмі, і ніколи не може стати меншою від проти-ЕРС. Граничний кут керування  $\alpha_{cp}$ , при якому починається перехід до переривистого струму, збільшується зі зменшенням проти-ЕРС. Тому при різних проти-ЕРС матимемо сім'ю регулювальних характеристик (рис.10). На рис.10 вище осі абсцис розташовані характеристики для випрямного режиму, нижче - для інверторного. Як видно з рис.10, регулювальні характеристики є суттєво нелінійними.

Зовнішньою характеристикою випрямляча називають залежність середньої випрямленої напруги від середнього випрямленого струму. При досить великих середніх струмах при будь-яких кутах керування миттєвий струм безперервний. Оскільки ще спочатку ми знехтували активним опором трансформатора, середня випрямлена напруга при цьому залежить лише від кута керування згідно з (6). Зовнішня характеристика в режимі безперервного струму є горизонтальною лінією (рис.11). Це означає, що випрямляч є ідеальним джерелом напруги (звичайно, за умовою знехтування його внутрішнім опором).

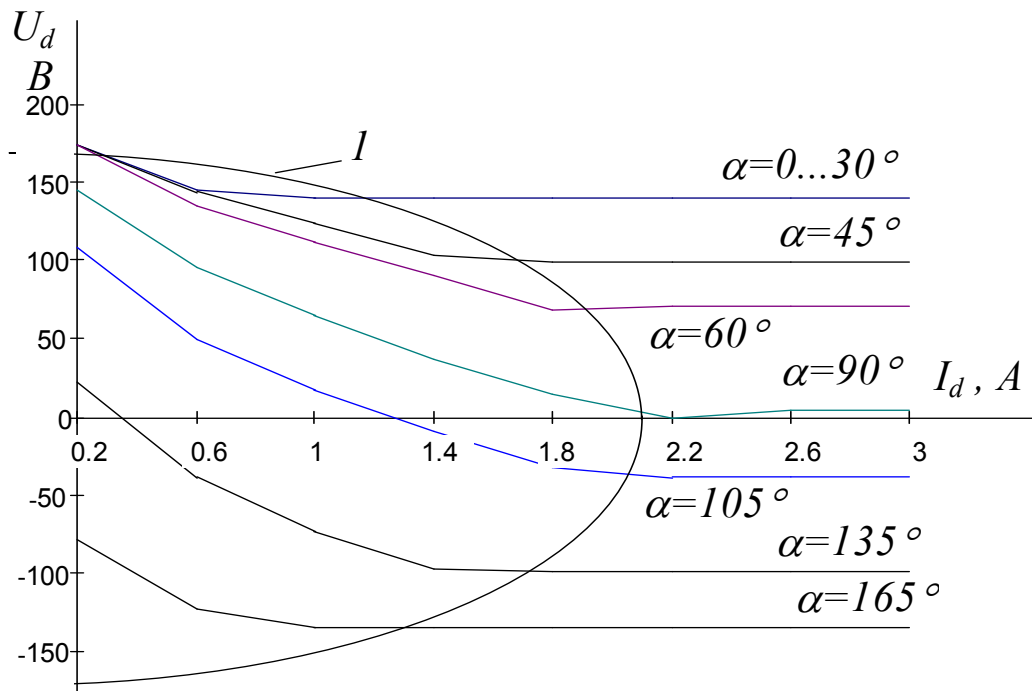


Рис.11 Зовнішні характеристики

Зменшення середнього струму, яке можливе лише завдяки збільшенню проти-ЕРС, призводить до гранично-безперервного режиму, а надалі - і до режиму переривистого струму. Оскільки в цьому режимі середня напруга більша, ніж при безперервному струмі, випрямлена напруга тим більша, чим менший середній струм. Лінійність зовнішніх характеристик різко порушується, що еквівалентно появі деякого нелінійного внутрішнього опору. Це має наслідком порушення лінійності механічних характеристик двигуна, що живиться від випрямляча, та значним ускладненням проблеми стабілізації його швидкості.

Геометричним місцем точок гранично-безперервного режиму є еліпс 1 (рис.11). Вище осі абсцис розташовані зовнішні характеристики для випрямного режиму, нижче - для інверторного.

#### 4. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

- 4.1. Робота виконується на математичних моделях випрямляча, реалізованих за допомогою електронних таблиць Excel.
- 4.2. Файл Excel складається з двох листів (за кількістю вирішуваних задач).
- 4.3. Клітинки, в яких розташовані змінні вихідні дані, виділені рожевим кольором.
- 4.4. Змістом роботи є дослідження електромагнітних процесів на готових моделях шляхом зміни вихідних даних (параметрів навантаження, кутів керування тощо).
- 4.5. Результатом виконання роботи є файл Excel, який, крім самих моделей, містить у собі рисунки, що є копіями діаграм, отриманих у процесі досліджень. Файл повинен мати ім'я, яке складається з фамілії студента та номера лабораторної роботи.



## 5. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Зі скількох тиристорів складається однофазний мостовий випрямляч?
2. Скільки тиристорів одночасно відкрито в такому випрямлячі?
3. Покажіть два можливих шляхи протікання струму у випрямлячі за схемою рис. 1
4. Покажіть на рис. 2 інтервали часу, протягом яких енергія передається: а) від мережі до навантаження; б) від навантаження до мережі.
5. Покажіть на рис. 2 інтервали часу, протягом яких індуктивний елемент навантаження: а) споживав енергію; б) віддавав енергію.
6. Як поява у складі навантаження проти-ЕРС, направленої проти струму, впливає на середнє значення випрямленого струму?
7. У якому режимі працює електрична машина постійного струму, підключена до виходу випрямляча, якщо процеси в схемі подібні до зображених на рис. 4?
8. Як збільшення проти-ЕРС вплине на тривалість безструмової паузи на рис. 4?
9. Чому за наявності проти-ЕРС подача керуючих імпульсів на тиристири з малим кутом керування не призводить одразу до їх відкриття?
10. Назвіть умови переведення випрямляча до інверторного режиму.
11. У якому режимі працює електрична машина, підключена до виходу випрямляча, якщо останній працює в інверторному режимі?
12. Як збільшення абсолютної величини проти\_ЕРС вплине на тривалість безструмової паузи на рис. 8?

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Преобразовательная техника. – К.: Вища школа, 1983. – 431 с.
2. Справочник по преобразовательной технике. Под ред. И.М.Чиженко. – К.: Техніка, 1978. – 447 с.
3. Шипилло В.П. Автоматизированный вентильный электропривод. – М.: Энергия, 1969. – 400 с.
4. Ривкин Г.А. Преобразовательные устройства. – М.: Энергия, 1970. – 544 с.
5. Казачковський М.М. Керовані випрямлячі. – Дніпропетровськ: НГА України, 1999. – 229 с.

## “Дослідження СІФК однофазного мостового випрямляча”

### 1. МЕТА РОБОТИ

Вивчити структуру та принцип дії системи імпульсно-фазового керування (СІФК) однофазного мостового випрямляча.

### 2. ПРОГРАМА РОБОТИ

- 2.1. Вивчення загальної структури СІФК та призначення її основних функціональних вузлів.
- 2.2. Дослідження пристрою синхронізації (ПС):
  - вивчення принципу дії ПС;
  - дослідження впливу напруг  $U_{01}$ ,  $U_{02}$  на фазовий зсув вихідних напруг  $u_1$ ,  $u_2$  відносно напруги синхронізації, а також на положення та ширину спускового імпульсу.
- 2.3. Дослідження генератора пилоподібної напруги (ГПН):
  - вивчення принципу дії ГПН;
  - дослідження способів зміни амплітуди опорної напруги.
- 2.4. Дослідження способів зміни форми вихідної напруги формувача імпульсів.
- 2.5. Дослідження впливу напруги зміщення на кут початкового фазування при нульовій керуючій напрузі.
- 2.6. Дослідження впливу керуючої напруги на кут керування.
- 2.7. Дослідження впливу амплітуди опорної напруги на кут керування при незмінній керуючій напрузі.

### 3. ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

#### *3.1. Структура СІФК та принцип вертикального керування*

Оскільки принцип регулювання вихідної напруги в керованих випрямлячах – фазовий, а для відкриття тиристора досить короткого імпульсу, системи керування випрямлячами звать системами імпульсно-фазового керування.

СІФК призначена для:

- визначення кута керування залежно від подаваної ззовні керуючої напруги;
- формування керуючих імпульсів, які подаються до керуючих електродів тиристорів у момент часу, відповідний до визначеного кута керування;
- обмеження (якщо потрібно) кутів керування.

Структура СІФК однофазного мостового випрямляча наведена на рис.1.

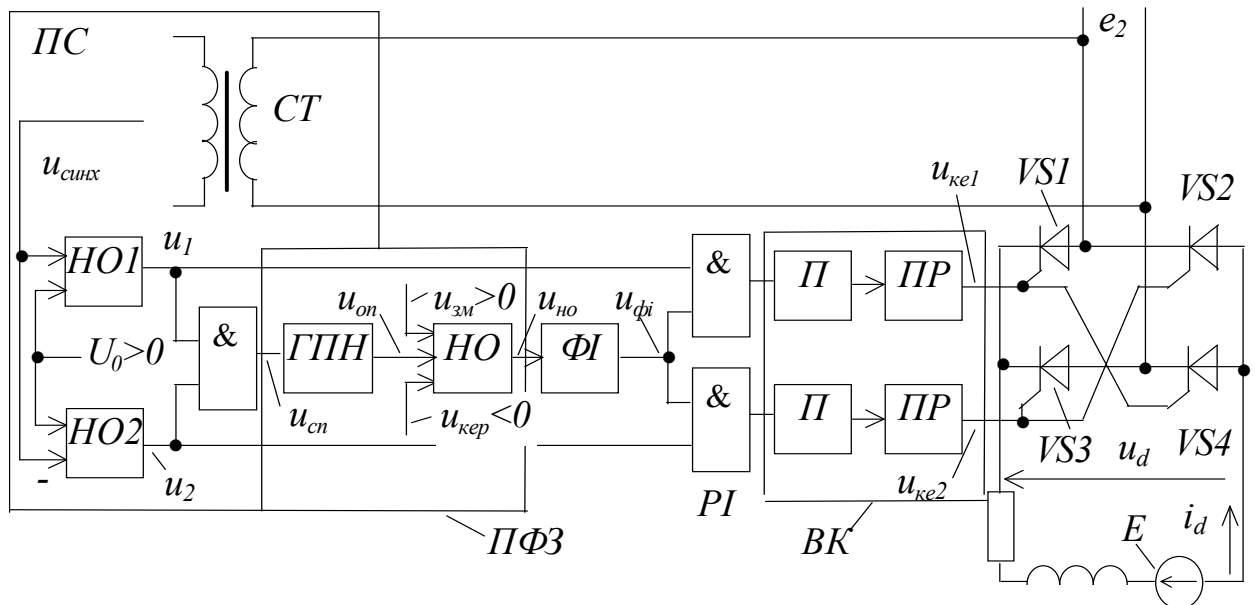


Рис.1 Загальна структура СІФК

До складу СІФК входять:

- пристрій фазозміщення ПФЗ (складається з генератора пилоподібної напруги ГПН та нуль-органа НО);
- пристрій синхронізації (складається з синхронізуючого трансформатора СТ, двох нуль-органів НО1 та НО2, елемента І);
- формувач імпульсів ФІ;
- розподільник імпульсів РІ;
- вихідні каскади ВК (складаються з потенційних розв'язок ПР та підсилювачів П).

Пристрій фазозміщення призначений для виконання першої задачі СІФК: визначення фази  $\alpha$  керуючого імпульсу виходячи з напруги керування  $u_{кер}$ , яка в електроприводі найчастіше надходить від регулятора системи автоматичного керування. Тобто ПФЗ є перетворювачем «напруга-фаза».

Оскільки випрямляч - перетворювач, ведений мережею, керуючі імпульси повинні бути сфазовані відносно напруги живильної мережі. Щоб синхронізувати роботу ПФЗ з мережею, до складу СІФК входить пристрій синхронізації ПС, який своїм спусковим імпульсом  $u_{сн}$  задає цикл роботи ГПН.

Діаграма роботи СІФК наведена на рис. 2.

Напруга синхронізації  $u_{синх}$  на виході синхронізуючого трансформатора СТ пропорційна напрузі живильної мережі  $e_2$ . Вона подається до входів нуль-органів (компараторів) НО1 та НО2, причому на вході НО1 вона складається з напругою  $U_0$ , а на вході НО2 - віднімається від неї. Напруга на виході нуль-органа міняє свій знак тоді, коли міняє знак алгебраїчна сума сигналів на його входах. Тому, хоча у цілому вихідні напруги нуль-органів  $u_1$  та  $u_2$  протифазні, їх фронти у часі не збігаються. Коли обидві вихідні напруги до-

рівнюють нулю, на виході логічного елемента І формується логічна одиниця ( $u_{cn} > 0$ ).

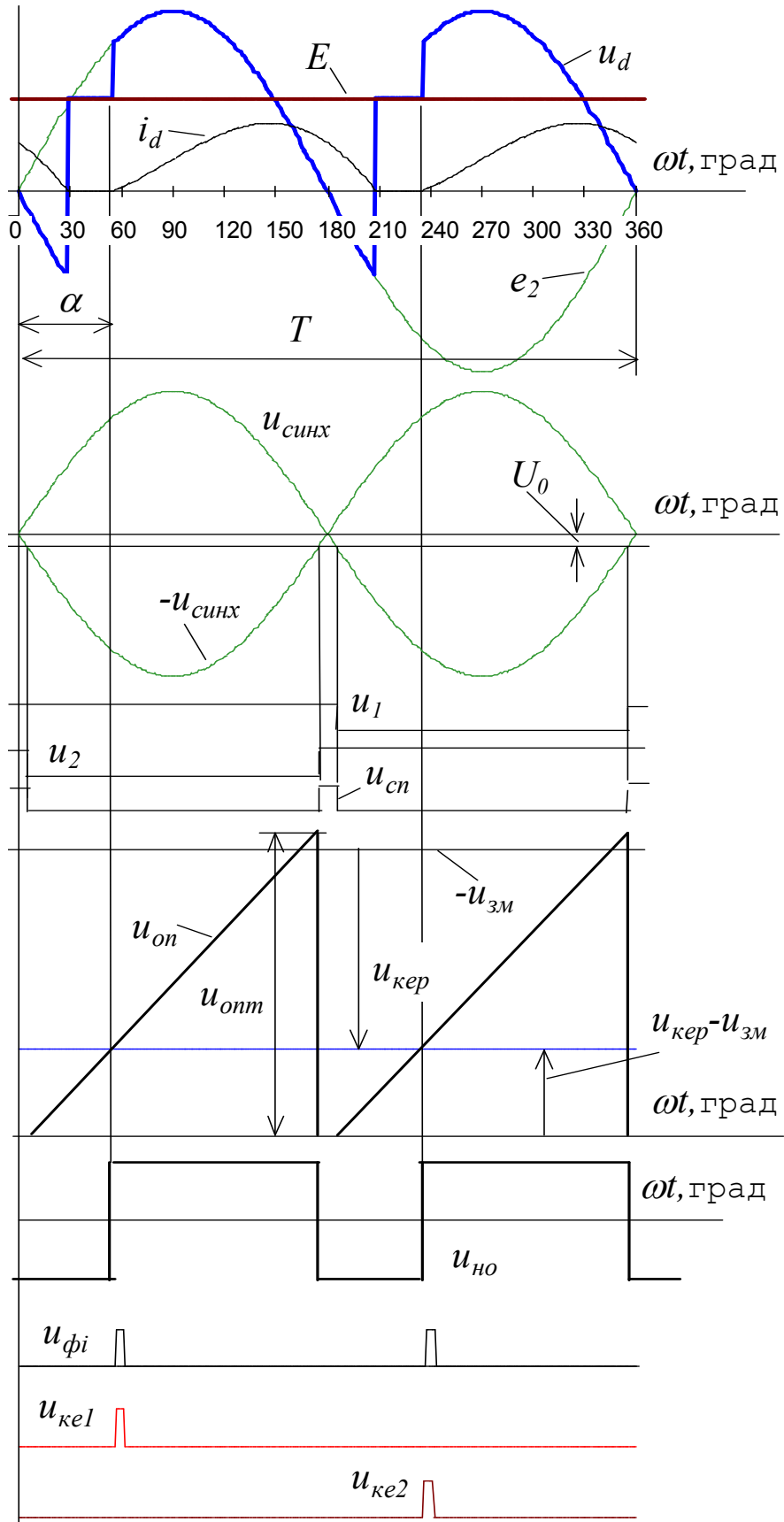


Рис.2 Процеси в СІФК та у випрямлячі

Позитивний потенціал, поданий до входу генератора пилкоподібної напруги ГПН, забороняє його роботу, і напруга на виході генератора відсутня. Після зникнення позитивного потенціалу починається лінійне зростання негативної опорної напруги  $u_{on}$  на виході ГПН. Поява через півперіод  $T/2$  спускової напруги  $u_{cn} > 0$  знову призводить до зникнення опорної напруги.

Таким чином, на виході ГПН формується пилкоподібна опорна напруга з періодом, удвічі більшим за період живильної напруги, причому початок зростання опорної напруги синхронізований з моментом переходу живильної напруги через нуль.

До входу нуль-органа НО подано три сигнали: негативна опорна напруга, негативна керуюча напруга та позитивна напруга зміщення  $u_{зм}$ . Коли абсолютне значення опорної напруги стає більшим від суми двох інших вхідних напруг, на виході НО з'являється негативний потенціал, інакше - позитивний.

Формувач імпульсів ФІ формує вузький позитивний імпульс у момент зміни напругою  $u_{но}$  знаку з позитивного на негативний, тобто два рази за період.

Оскільки у мостовому випрямлячі пари тиристорів працюють по черзі, сформовані імпульси слід розподілити між ними. Цю функцію виконує розподільник імпульсів РІ, який складається з двох елементів І. У силовому колі складаються сприятливі умови для відкриття відповідних тиристорів тільки тоді, коли з'являються позитивні потенціали на їх анодах. Інформація про знак живильної напруги закладена у напругах нуль-органів НО1 та НО2. Тому проходження керуючого імпульсу дозволяється тільки через той елемент І, на іншому вході якого присутній позитивний потенціал. Таким чином, керуючий імпульс по черзі (один раз за період) надходить до тієї чи іншої пари тиристорів.

Підсилювачі П призначені для підсилення сформованих імпульсів до рівня, придатного до відкриття тиристорів. Потенційні розв'язки ПР забезпечують гальванічну розв'язку силового кола та системи керування, що запобігає проходженню високих потенціалів до СІФК. Це підвищує надійність системи та забезпечує безпечні умови для проведення налагоджувальних робіт. Потенційними розв'язками найчастіше є імпульсні трансформатори. При використанні у випрямлячі оптотиристорів потенційні розв'язки не потрібні.

Якщо зменшувати керуючу напругу, збільшується різниця  $u_{зм} - u_{кер}$ , задній фронт напруги  $u_{но}$  зміщується праворуч, керуючий імпульс формується пізніше, кут керування збільшується і середня випрямлена напруга зменшується (рис.3). Таким чином, завдяки вертикальному переміщенню лінії керуючої напруги відносно опорної напруги змінюється кут керування. Такий спосіб формування кута керування називають принципом вертикального керування.

Напруга зміщення  $u_{зм}$  подається до входу нуля-органа НО, аби забезпечити нульову випрямлену напругу при нульовій напрузі керування (при активно-індуктивному навантаженні). На рис.4 наведені діаграми для випадку  $u_{кер} = 0$ . Кут керування, який відповідає такій напрузі керування, називають кутом початкового фазування ( $\alpha_{поч}$ ). Для однофазного мостового випрямляча при настроюванні встановлюють  $\alpha_{поч} \approx 170-175^\circ$ .

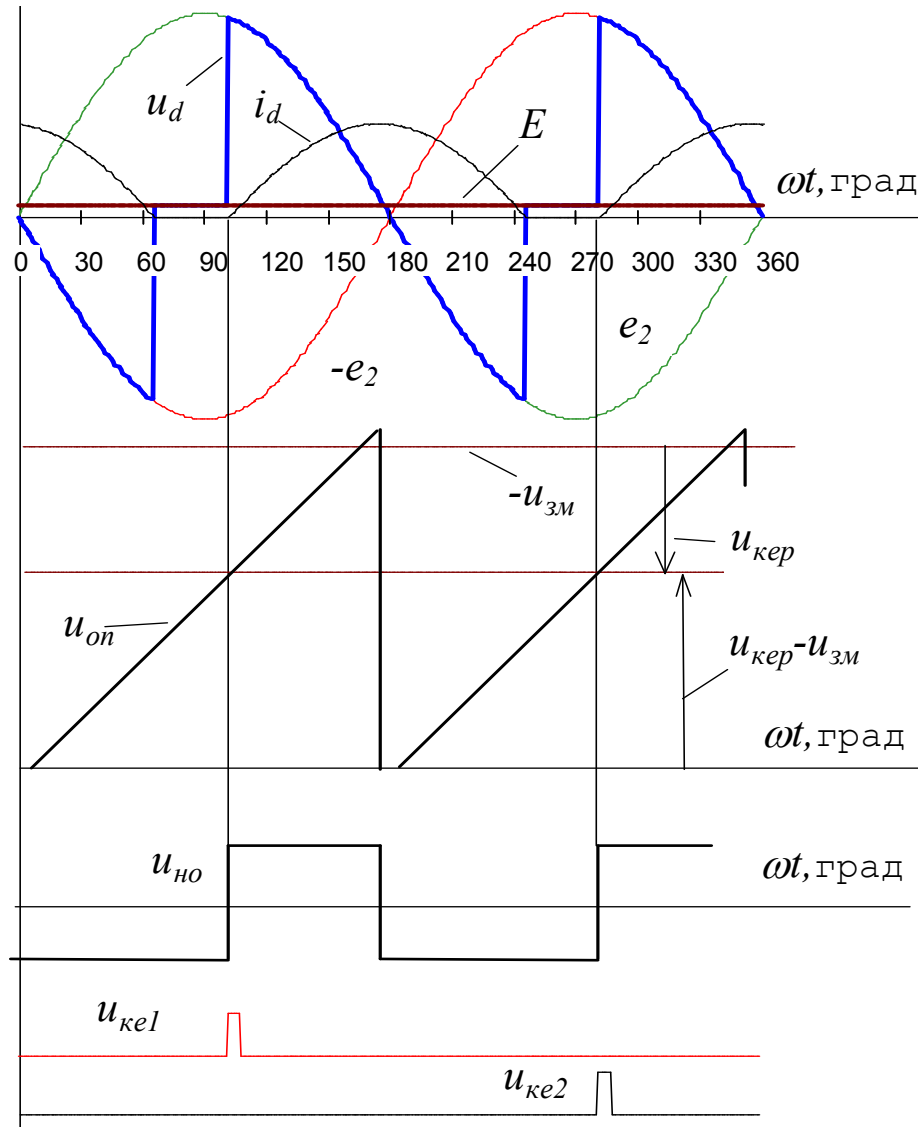


Рис.3 Процеси в СІФК та у випрямлячі при збільшеному куті керування

### 3.2. Принципові схеми вузлів СІФК

Принципова схема ПС зображена на рис. 5. Операційні підсилювачі А1, А2 є нуля-органами, до входів яких подані напруга синхронізації  $u_{синх}$  та напруги  $U_{01}$ ,  $U_{02}$ . Рівень напруг  $U_{01}$ ,  $U_{02}$  визначає моменти зміни стану нуля-органів (рис. 6).

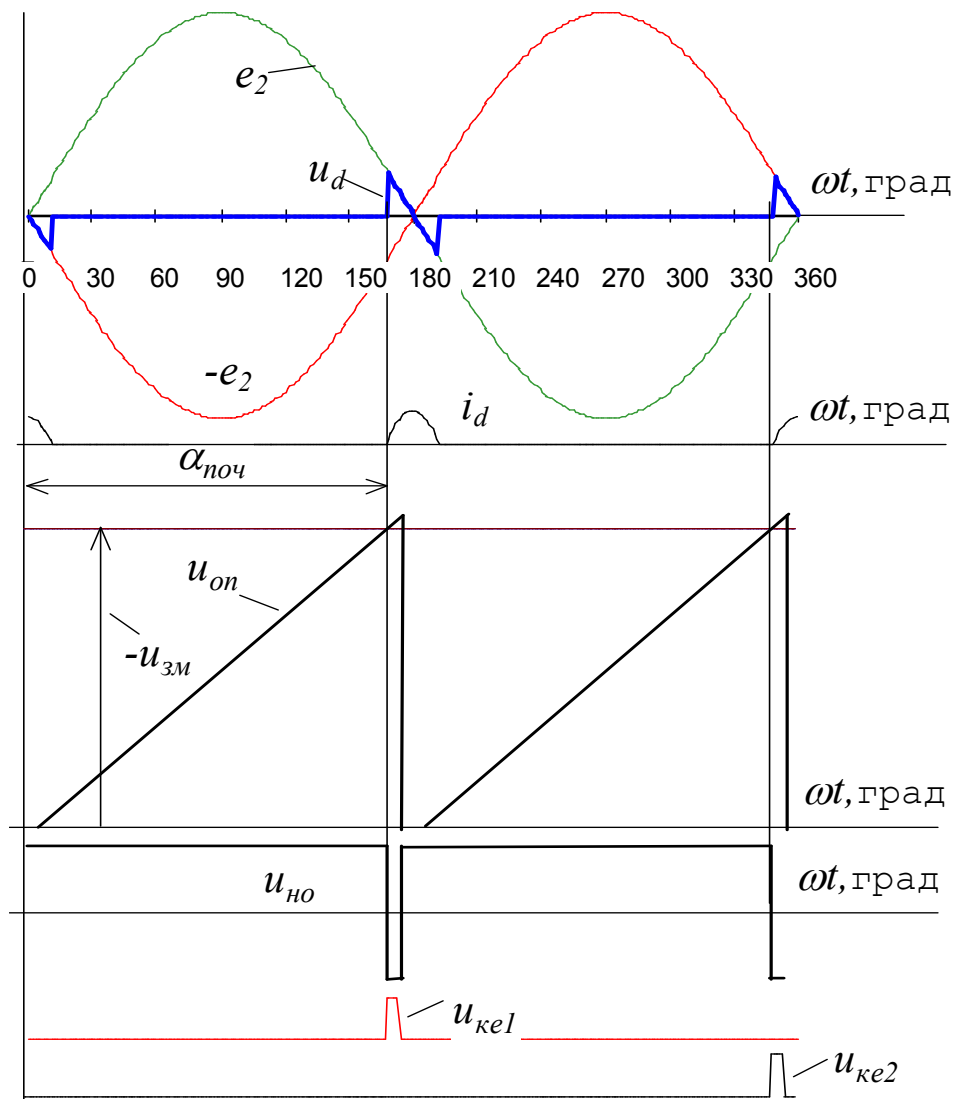


Рис.4 Процеси в СІФК та у випрямлячі при нульовій керуючій напрузі

За допомогою подільників  $R1$  та  $R2$  при налагодженні СІФК забезпечується:

- потрібна тривалість спускових імпульсів;
- їх симетричність відносно точок природної комутації;
- однаковість інтервалів часу  $t_1 = t_2$  (рис.6).

Це забезпечує зрештою симетрію опорної напруги.

Схема пристрою фазозміщення наведена на рис.7.

Генератор опорної напруги реалізований на підсилювачі А3. За відсутністю спускового імпульсу транзистор закритий негативним зміщенням від джерела  $-15$  В, а підсилювач працює, як інтегратор, лінійно збільшуючи свою вихідну

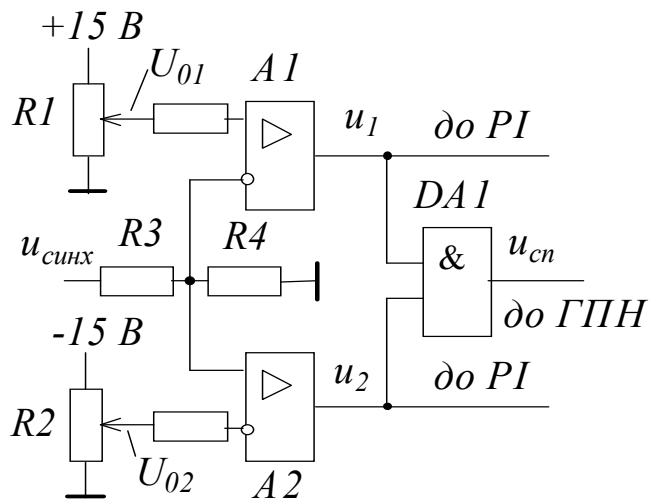


Рис.5 Пристрій синхронізації

напругу. Темп зростання опорної напруги пропорційний напрузі на інверсному вході та зворотно-пропорційний сталій часу  $T = R5 \cdot C1$ . З надходженням позитивного спускового імпульсу від ПС відкривається транзистор, швидко розряджається конденсатор, і опорна напруга зникає. Внаслідок періодичного надходження спускових імпульсів формується періодична пилкоподібна опорна напруга, сфазована відносно напруги живлення випрямляча.

До нуля-органа А4 надходять опорна напруга від ГПН та різниця  $U_{зм} - u_k$  від суматора А5. Напруга зміщення змінюється за допомогою подільника R6.

Формувач імпульсів складається з резистора R10, конденсатора C2, діода VD1. Струм через конденсатор пропорційний похідній вихідної напруги нуля-органа. Коли  $u_{но}$  стрибком зростає (рис.2), конденсатор заряджається з полярністю, позначеною на рис.7, і до входів розподільника імпульсів надходить вузький позитивний імпульс. При зменшенні  $u_{но}$  полярність заряду конденсатора протилежна, відкривається діод, і імпульс до входів PI не надходить.

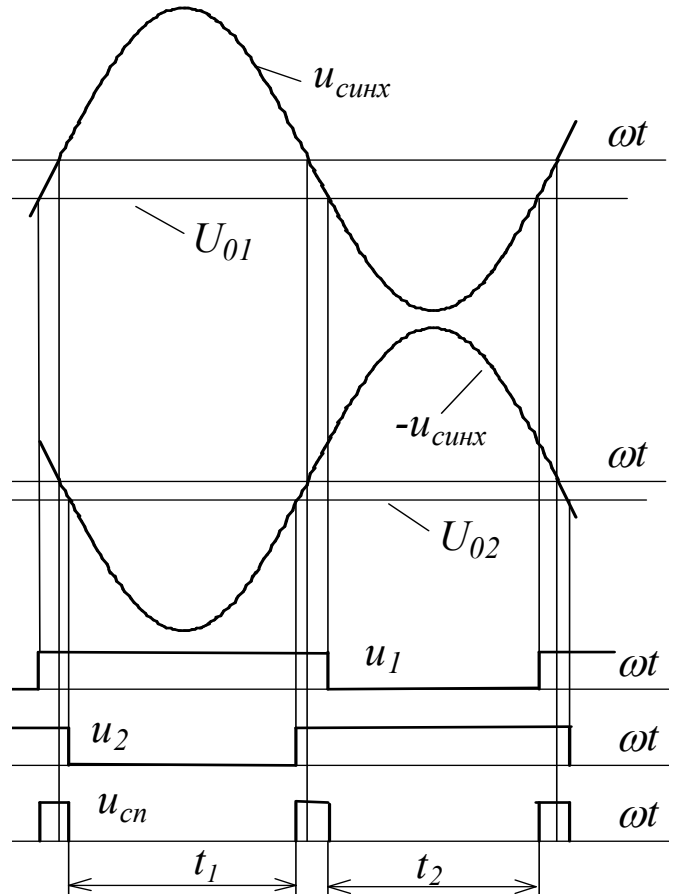


Рис.6 Часові діаграми ПС

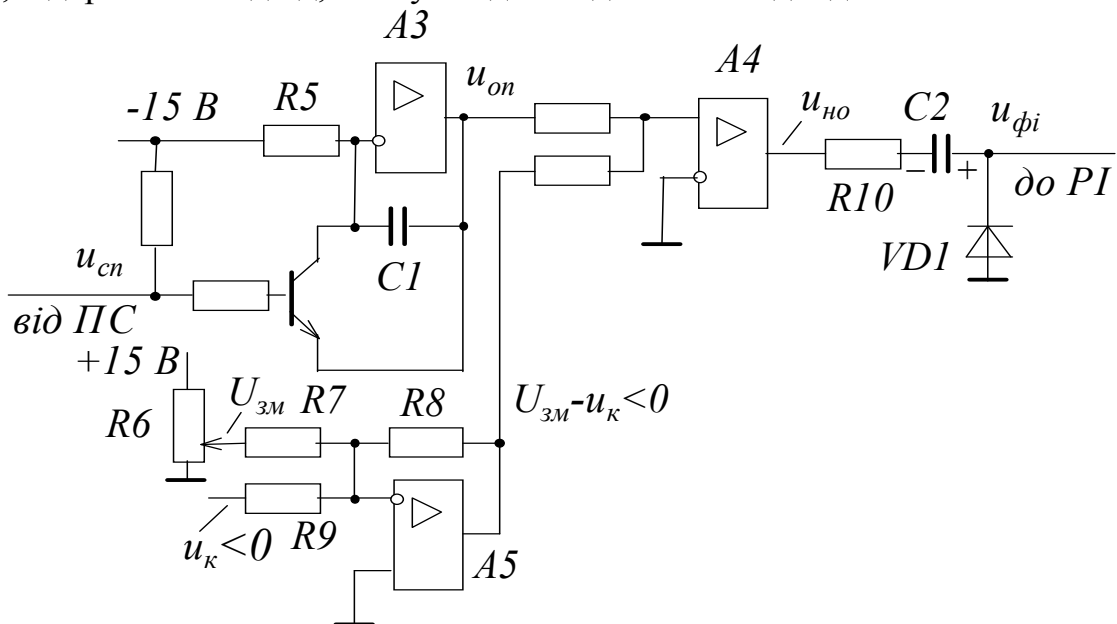


Рис.7 Пристрій фазозміщення



## 4. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

- 4.1. Робота виконується на математичній моделі СІФК, реалізованій за допомогою пакету *Electronics WorkBench* (рис.8). Вхідні напруги моделі змінюються за допомогою подільників та контролюються за допомогою вольтметрів. Змінні у часі напруги контролюються за допомогою осцилографа та логічного аналізатора. На підсилювачах А1,А2 та елементі «І» DD1 реалізовано пристрій синхронізації, підсилювачі А3 та транзисторі – генератор опорної напруги, А6 – нуль-орган, резисторах 1 kOhm та 300 Ohm, конденсаторі 0,4 μF і діоді – формувач імпульсів, елементах «І» DD2, DD3 – розподільник імпульсів.
- 4.2. Змістом роботи є дослідження процесів у СІФК на готових моделях шляхом зміни вхідних даних (керуючої напруги та напруги зміщення, напруг  $U_{01}$ ,  $U_{02}$  пристрою синхронізації, амплітуди опорної напруги тощо).

## 5. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Яке призначення системи імпульсно-фазового керування?
2. Назвіть основні складові частини СІФК та покажіть їх на моделі.
3. Яке призначення пристрою синхронізації?
4. Покажіть на рис. 2 результат дії пристрою синхронізації.
5. З якою частотою змінюється опорна напруга в СІФК однофазного мостового випрямляча, якщо напруга живлення випрямляча змінюється з частотою 50 Гц?
6. Дайте визначення кута початкового фазування.
7. Яку інформацію несуть сигнали  $u_1$  та  $u_2$  на виході пристрою синхронізації?
8. Яке призначення розподільника імпульсів?
9. Як збільшення напруги зміщення впливає на величину кута початкового фазування?
10. Як зменшення керуючої напруги на вході СІФК впливає на величину кута керування?

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Писарев А.Л., Деткин Л.П. Управление тиристорными преобразователями. – М.: Энергия, 1975. – 264 с.
2. Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.
3. Казачковський М.М. Керовані випрямлячі. – Дніпропетровськ: НГА України, 1999. – 229 с.

Підготовлено до виходу в світ  
у Національному технічному університеті  
«Дніпровська політехніка».

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842  
4960050, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19

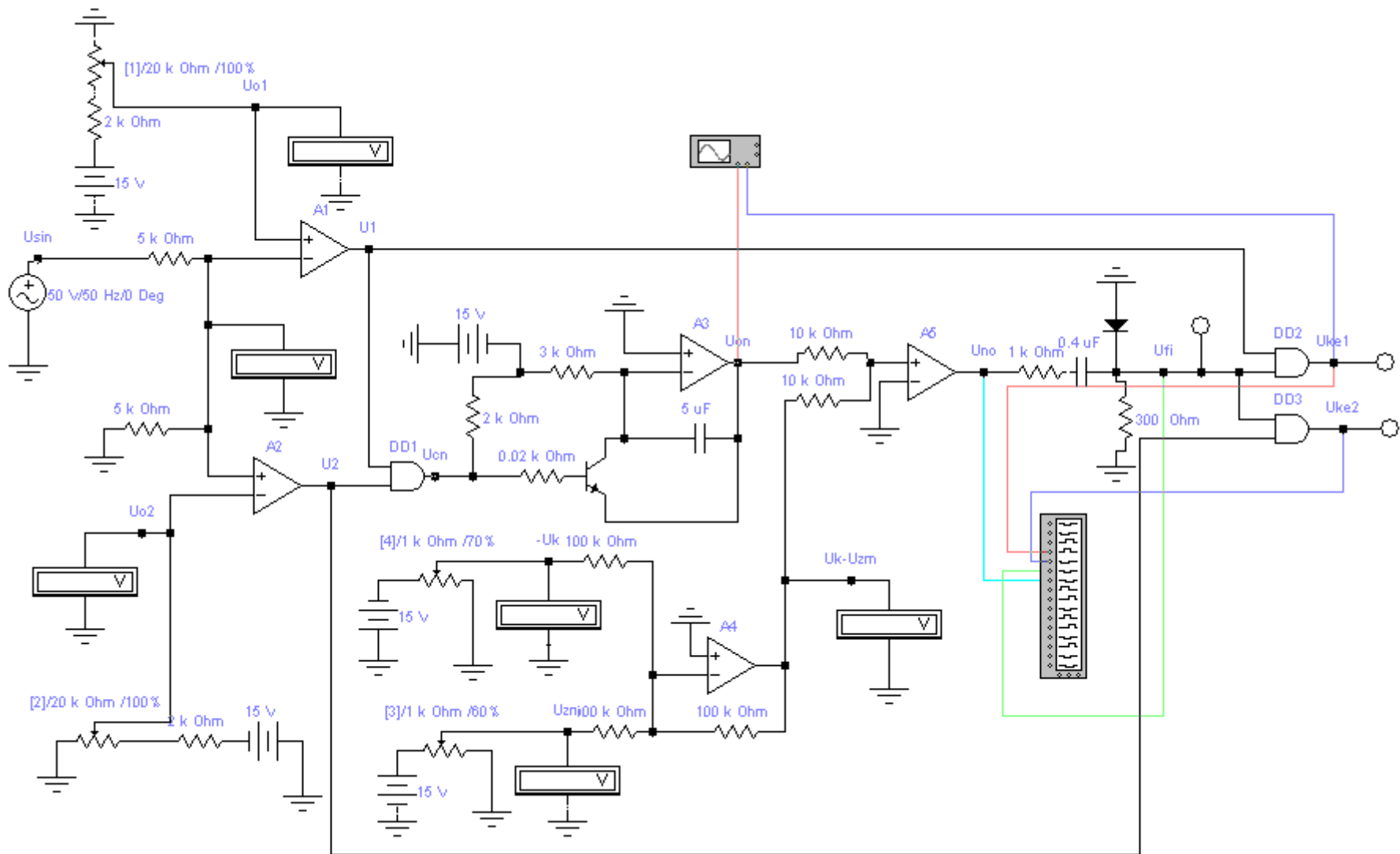


Рис. 8 Схема моделі