МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
Державний ВНЗ “НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ”

Кафедра електропривода

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторної роботи СПАЕ-3

“Дослідження однофазних випрямлячів з активним та активно-індуктивним навантаженням”

з дисципліни

“Силові перетворювачі в автоматизованому електроприводі”

для студентів спеціальності 7.05070204
“Електромеханічні системи автоматизації та електропривод”

Склав проф. М.М.Казачковський

Дніпропетровськ
2012

1. МЕТА РОБОТИ

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

2. ПРОГРАМА РОБОТИ

A. *Дослідження однопівперіодного 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 випрямлені 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 якім 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. Регулювальні характеристики:

• з’ясувати форму та взаємне розташування регулювальних характеристик випрямляча при різних індуктивностях навантаження;

C. *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 Тр (може бути відсутнім) та тиристора *VS1*. До первинної обмотки трансформатора прикладена напруга живильної мережі e_1, вихідна (випрямлена) напруга u_d випрямляча прикладається до навантаження $Z_{\text{н}}$. До керуючого електроду тиристора у потрібний момент подається позитивний імпульс керуючої напруги $u_{\text{ке}}$, який дозволяє відкриття тиристора.

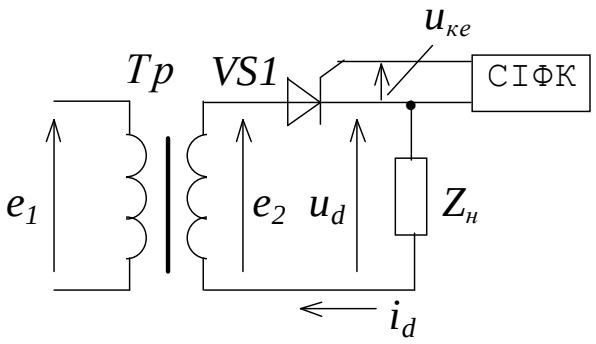

Рис. 1

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).

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 трансформатора $e_2 > 0$). Проте ця можливість буде реалізована лише тоді, коли буде виконано іншу умову: з'явиться позитивна напруга керування $u_{\text{ке}} > 0$. На рис. 2 обидві умови були виконані в момент часу $\omega t = \alpha < 180^0$. 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 $\omega t = 180^0$), 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.

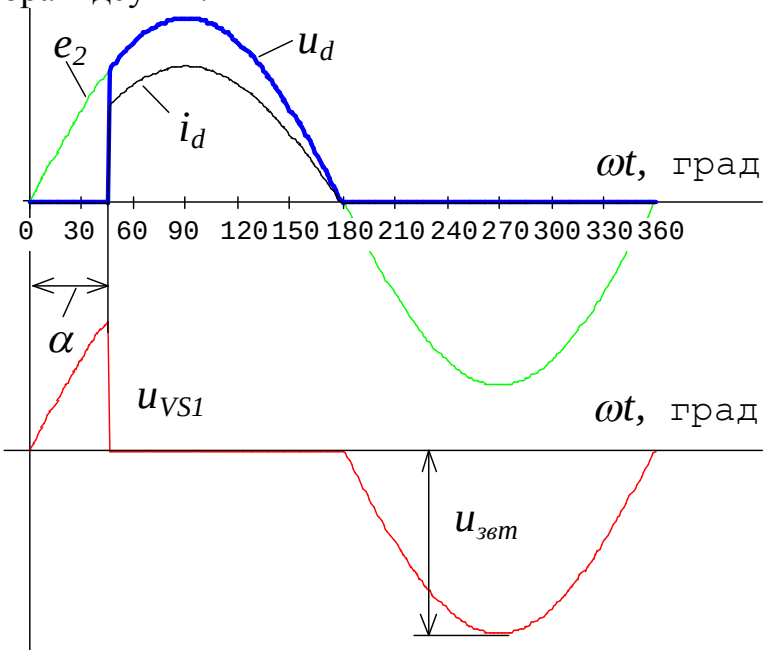

Рис. 2

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°.

Середня випрямлена напруга

$$U_d = \frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi} e_2 d\omega t = \frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi} E_{2m}\sin\omega t d\omega t = \frac{E_{2m}}{2\pi}\left[-\cos\pi + \cos\alpha\right] =$$

$$= \frac{E_{2m}}{2\pi}\left(1+\cos\alpha\right) = U_{d0}\frac{\left(1+\cos\alpha\right)}{2}, \qquad (1)$$

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

Середній випрямлений струм

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

Середній струм тиристора $I_a = I_d$.

Максимальні величини прямої та зворотної напруги на закритому тиристорі

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

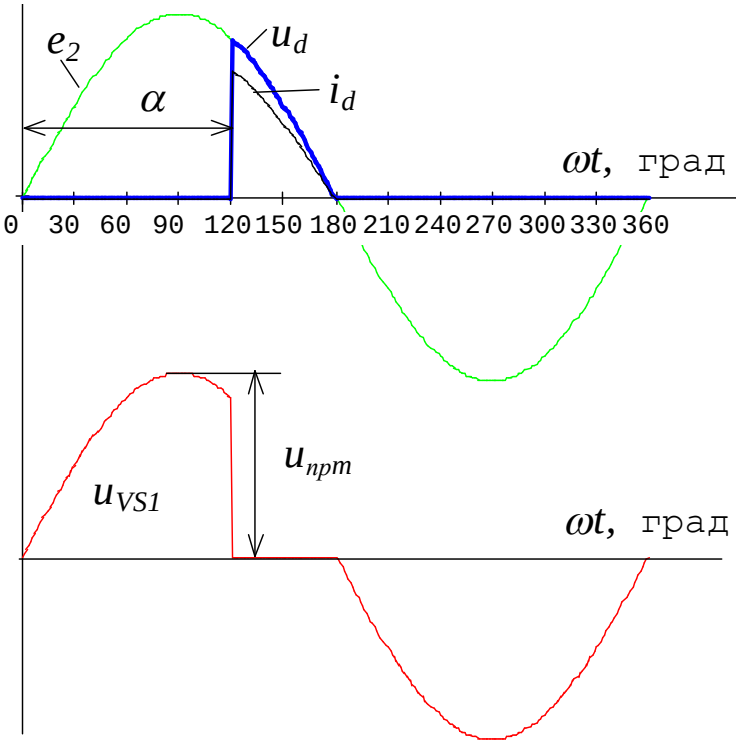

Рис.3

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.

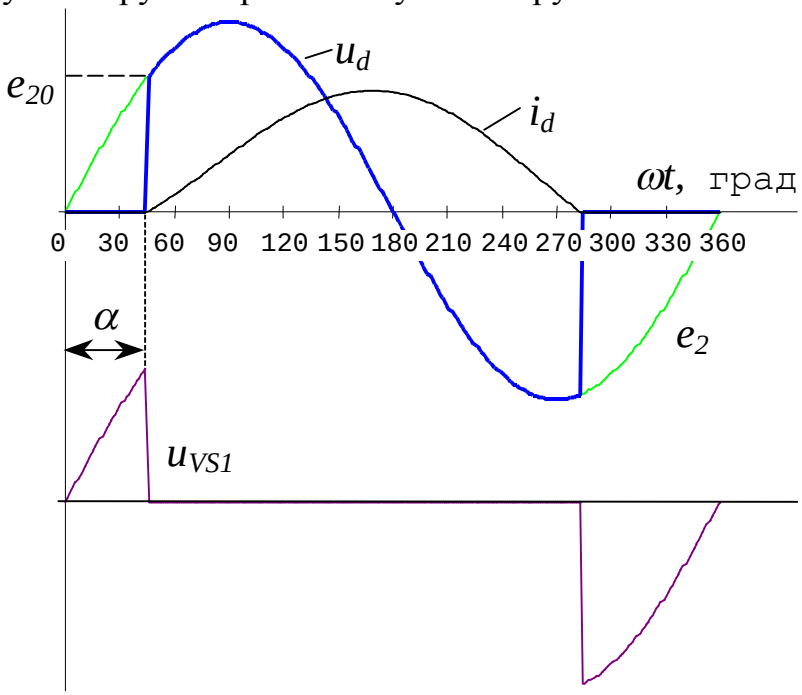

Рис.4

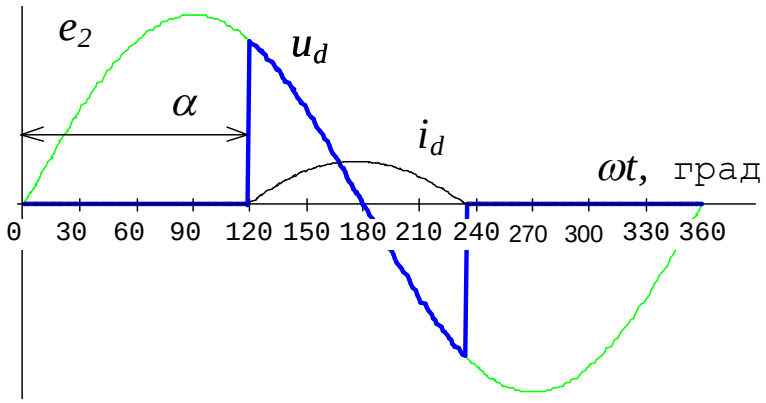

Рис.5

Процеси у випрямлячі описуються рівнянням напруг

$$e_2 = i_d R_н + L_н \frac{di_d}{dt}.$$

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

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 $e_L = -L_н \frac{di_d}{dt}$ 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 $i_d = \frac{e_2 + e_L}{R_н}$ 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 α=0) та індуктивностей завжди є безструмові паузи.

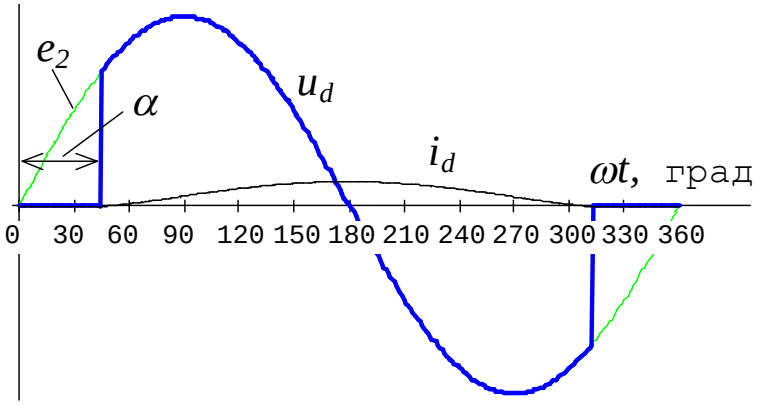

Рис. 6

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 α=30° та 120°.

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.

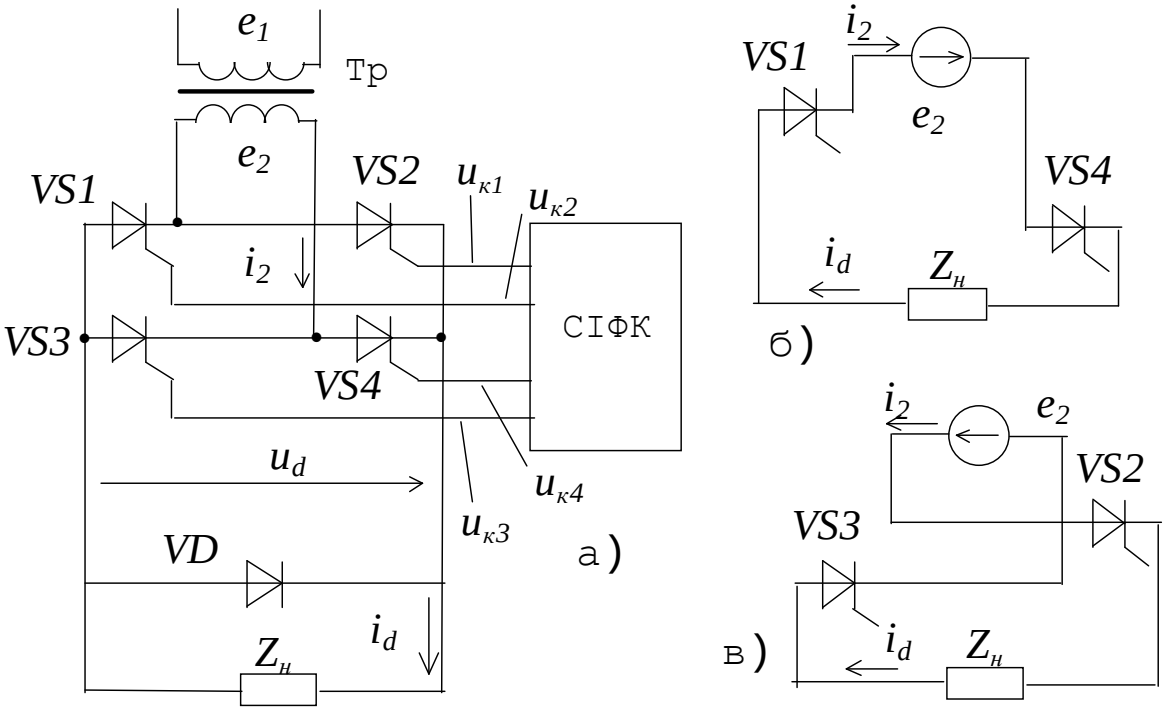

Рис.7

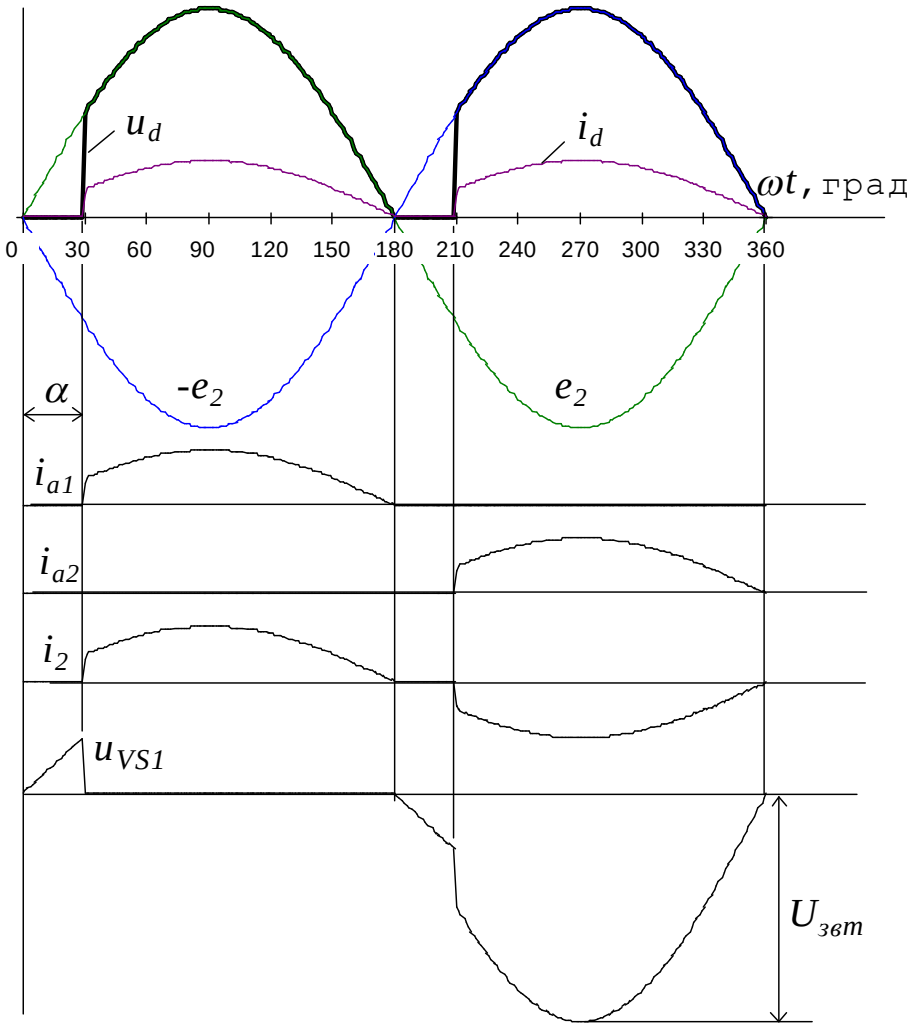

Рис.8

На інтервалі $\alpha < \omega t < 180^0$ 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 $u_{VS1} = e_2/2$.

У момент $\omega t = 360^0$ знову міняється знак ЕРС трансформатора, і тиристори *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 $u_{VS1} = e_2$.

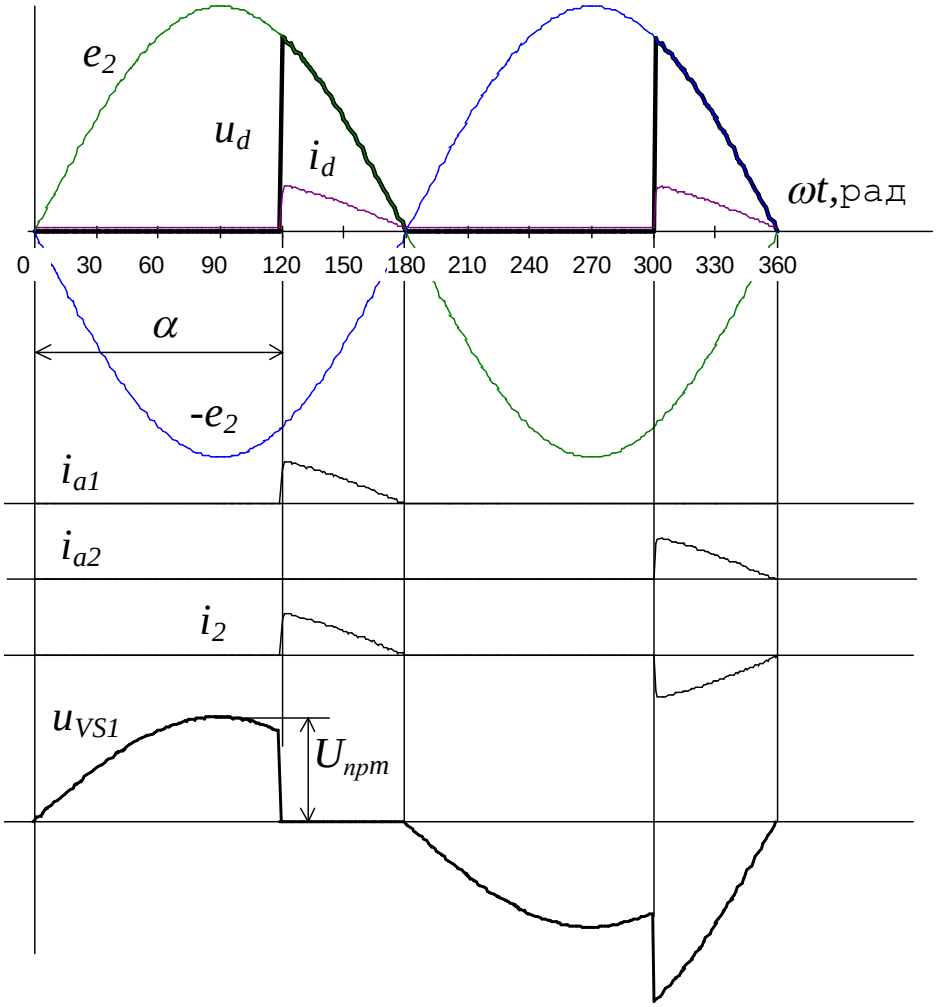

Рис. 9

Середня випрямлена напруга вдвічі більша, ніж у однопівперіодному випрямлячі

$$U_d = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi} e_2 d\omega t = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi} E_{2m}\sin\omega t d\omega t = \frac{E_{2m}}{\pi}\left[-\cos\pi + \cos\alpha\right] =$$

$$= \frac{E_{2m}}{\pi}\left(1+\cos\alpha\right) = U_{d0}\frac{\left(1+\cos\alpha\right)}{2}, \qquad (2)$$

де $U_{d0} = \frac{2E_{2m}}{\pi}$.

Середній випрямлений струм

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

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)

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

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 α. 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.

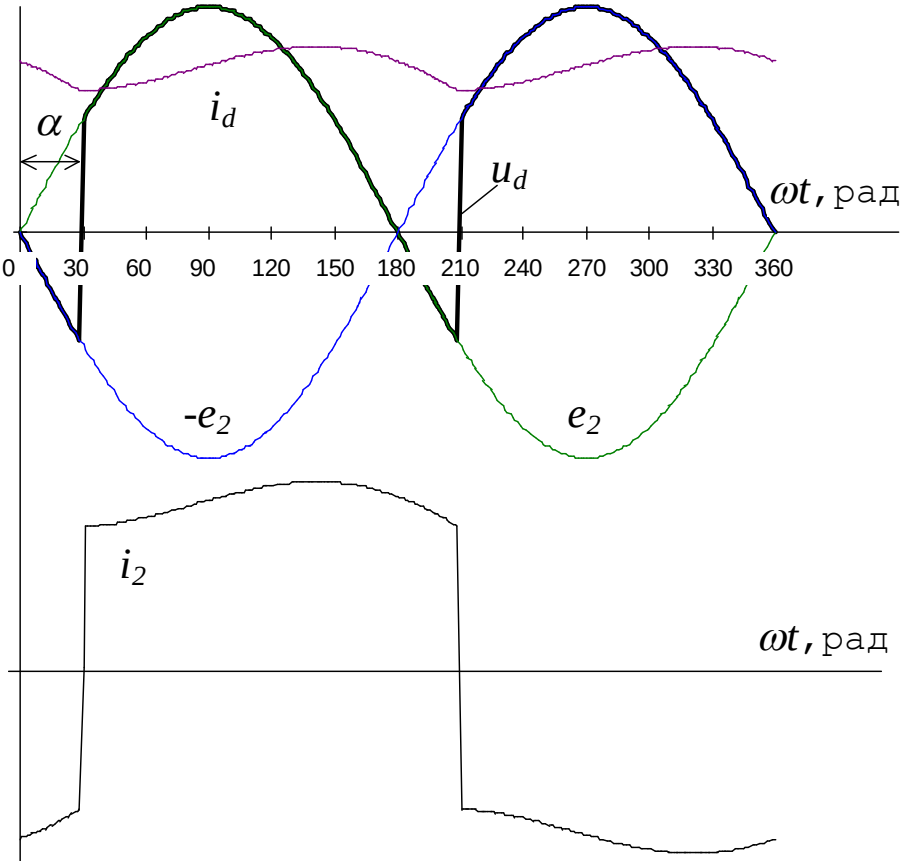

Рис. 10

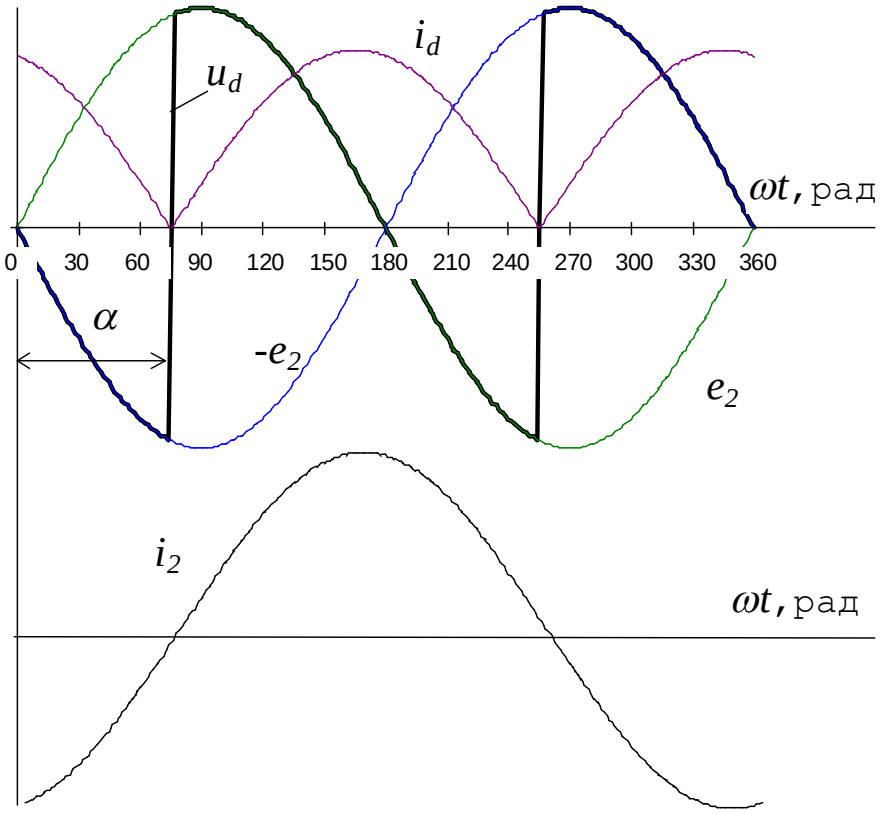

Рис. 11

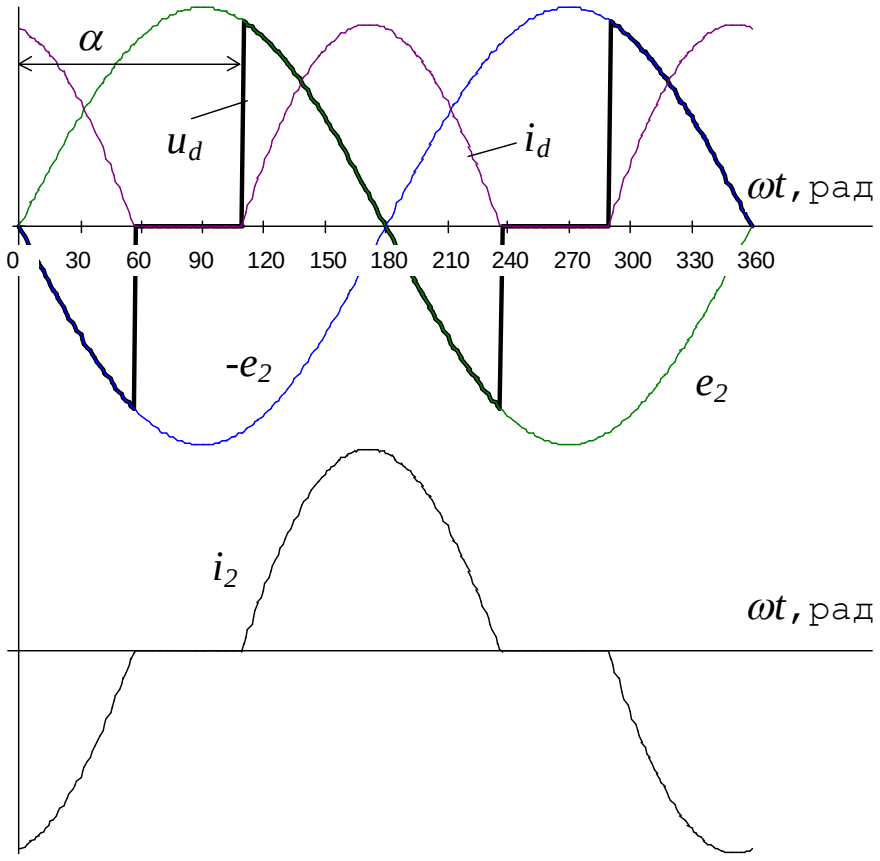

Рис. 12

При досить малих α випрямлений струм, знижуючись завдяки зниженню ЕРС, не встигає впасти до нуля на той момент, коли напруга вже міняє свій знак ($\omega t = 180^0$). Це обумовлене наявністю в контурі випрямленого

струму не тільки негативної вже ЕРС e_2, а й позитивної ЕРС самоіндукції $e_L = -L\dfrac{di_d}{dt}$. На інтервалі часу $180^0 < \omega t < 180^0 + \alpha$ 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).

У цих контурах під впливом ЕРС трансформатора, яка вже встигла змінити знак, виникають комутаційні струми $i_{к1}$ та $i_{к1}$. 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.

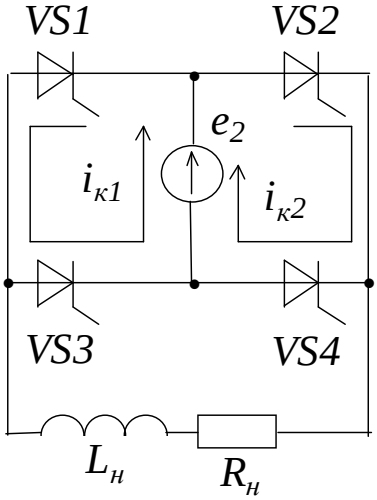

Рис. 13

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 $180^0 < \omega t < 180^0 + \alpha$ до навантаження прикладена негативна напруга. Тому середня випрямлена напруга за активно-індуктивного навантаження завжди менша, ніж за активного:

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

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

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 α 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 $L_н/R_н$ 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.

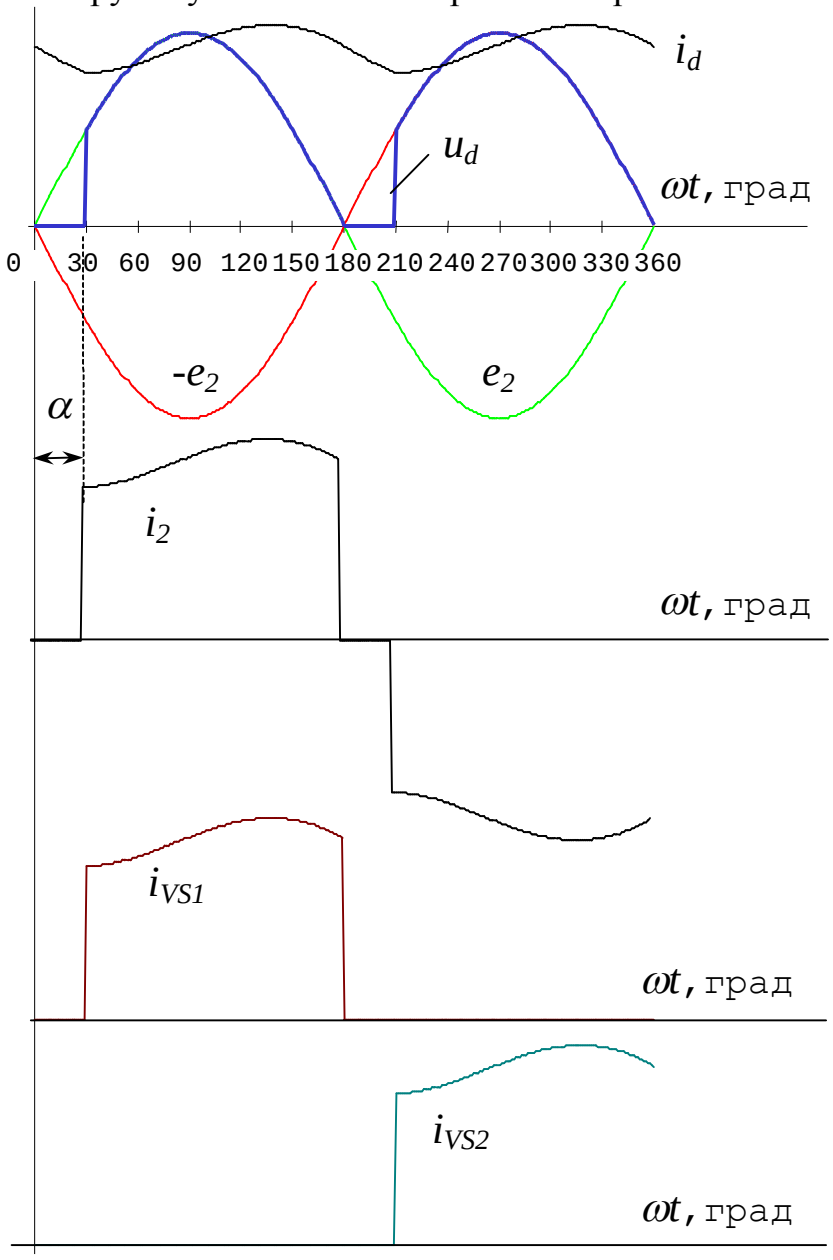

Рис. 14

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 наванта-

женння 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.

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.

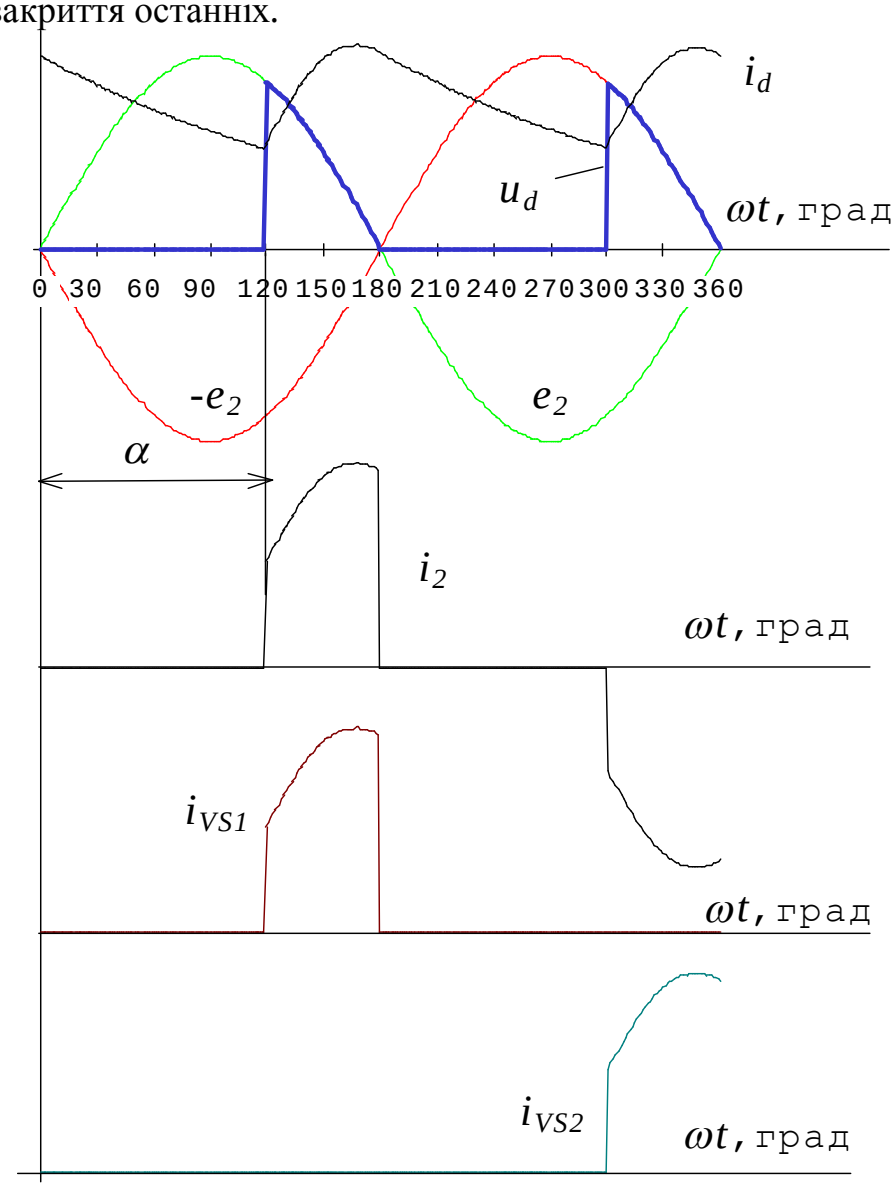

Рис. 15

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.

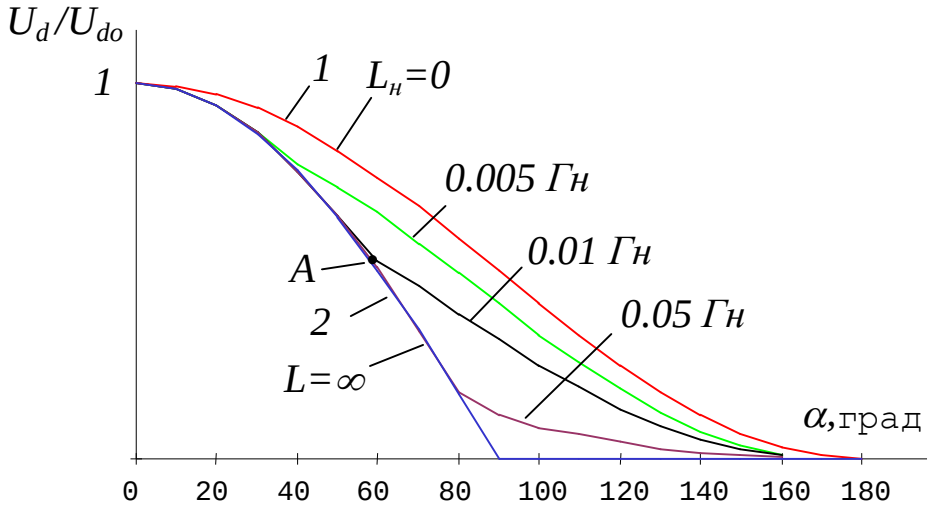

Рис. 16

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 $L_н$=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.

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.