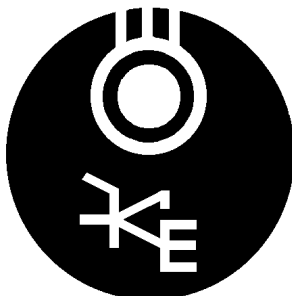


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет «ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Електротехнічний факультет
Кафедра електропривода



М.М.Казачковський

«Силові перетворювачі автоматизованих електроприводів».
Збірник методичних вказівок до лабораторних занять
та самостійної роботи
(Частина 2. Переривники та перетворювачі частоти))

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 2. Переривники та перетворювачі частоти) для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»/ М.М. Казачковський; НТУ «Дніпровська політехніка». – Д.: НТУ «ДП», 2018 – 61 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 перетворювачів енергії, що використовуються в автоматизованих електроприводах та суміжних сферах (переривники постійної напруги, автономні інвертори напруги та струму).

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

ЗМІСТ

Лабораторна робота СПАЕ-6 «Дослідження нереверсивних переривників постійної напруги»	4
Лабораторна робота СПАЕ-7 «Дослідження реверсивного переривника постійної напруги»	10
Лабораторна робота СПАЕ-8 «Дослідження однофазних автономних інверторів напруги»	18
Лабораторна робота СПАЕ-9 «Дослідження перетворювача частоти з трифазним автономним інвертором струму»	32
Лабораторна робота СПАЕ-10 «Дослідження трифазних автономних інверторів напруги»	42
Лабораторна робота СПАЕ-11 «Дослідження підвищувального переривника постійної напруги»	54

Лабораторна робота СПАЕ-6 “Дослідження нереверсивних переривників постійної напруги”

1. МЕТА РОБОТИ

Вивчити особливості електромагнітних процесів та статичних характеристик нереверсивних переривників постійної напруги.

2. ПРОГРАМА РОБОТИ

- 2.1. Дослідити електромагнітні процеси в послідовному нереверсивному переривнику постійної напруги при роботі на RL - та RLE -навантаження.
- 2.2. Вивчити регульовальну характеристику послідовного переривника в режимах безперервного та переривистого струмів.
- 2.3. Дослідити електромагнітні процеси в паралельному нереверсивному переривнику постійної напруги в режимі рекуперації.

3. ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Переривники постійної напруги (інша назва – широтно-імпульсні перетворювачі – ШІП) призначені для регулювання напруги споживачів постійного струму (найчастіше – електричних двигунів постійного струму). Використовуються в електроприводах верстатів із програмним керуванням, промислових роботів, в магістральному та міському електротранспорті. Живляться вони, на відміну від випрямлячів, від джерела нерегульованої постійної напруги (некерованих випрямлячів, мережі постійного струму або акумуляторних батарей). Схема найпростішого нереверсивного послідовного переривника зображена на рис. 1.

Оскільки живильна напруга незнакозмінна, природна комутація ключів неможлива. Тому в переривниках постійної напруги використовують цілком керовані ключі (транзистори, двоопераційні тиристори) або одноопераційні тиристори зі спеціальними схемами штучної комутації.

У схемі рис. 1 тиристор увімкнений послідовно з навантаженням (звідси і назва переривника). Регулювання вихідної напруги здійснюється завдяки періодичному відкриванню напівпровідникового ключа.

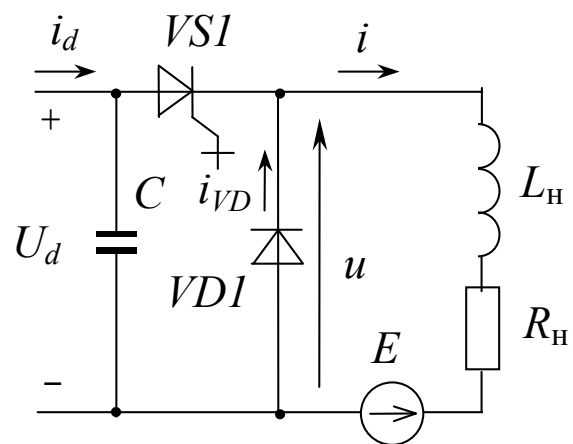


Рис. 1 Послідовний переривник

3.1. Робота послідовного переривника на RL -навантаження

Процеси в колі активно-індуктивного навантаження (проти-ЕРС на рис.1 відсутня) описуються диференціальним рівнянням

$$u = iR_H + L_H \frac{di}{dt}.$$

Коли ключ відкрито, до навантаження прикладена напруга U_d , і від джерела постійної напруги ним тече струм, який експоненціально зростає у часі (рис. 2). Після закриття ключа струм у навантаженні не може миттєво зникнути внаслідок виникнення ЕРС самоіндукції. Під впливом цієї ЕРС відкривається діод і струм навантаження i замикається через нього. Завдяки цьому забезпечується безперервність струму навантаження та запобігаються перенапруження у навантаженні та на закритому ключі. Після закриття ключа та відкриття діода напруга на навантаженні дорівнює нулю.

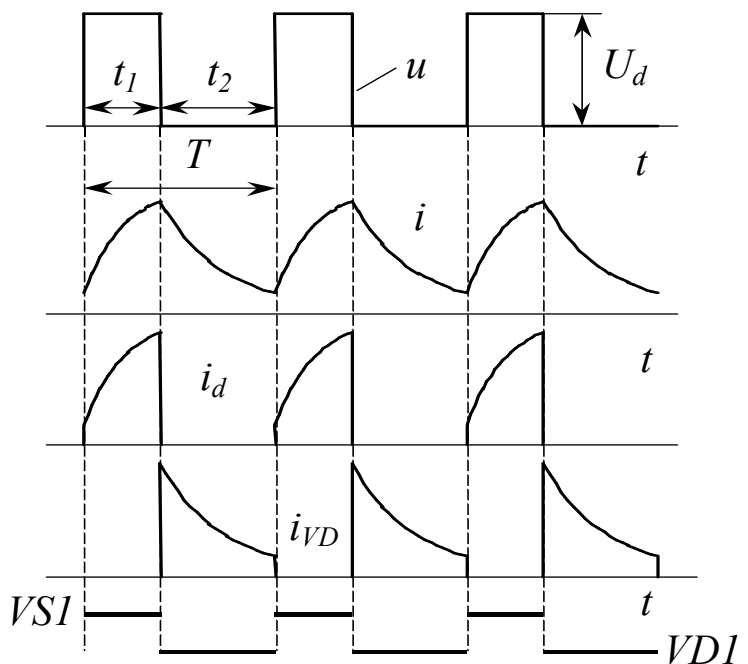


Рис. 2 Процеси у послідовному переривнику за RL -навантаження

На інтервалі часу t_1 (рис. 2) електрична енергія споживається переривником від джерела постійної напруги U_d і передається до навантаження. Вона витрачається на створення електромагнітного поля індуктивних елементів навантаження та перетворюється на теплову в активному опорі. Протягом інтервалу t_2 енергія електромагнітного поля, накопичена в індуктивних елементах, віддається до активного опору навантаження.

Миттєва напруга на виході переривника завдяки перемиканню ключа має ступінчастий характер, а її середнє значення

$$U = \gamma U_d, \quad (1)$$

де $\gamma = t_1/T$ – шпаруватість.

Змінюючи тривалість відкритого стану ключа t_1 , можна регулювати середній рівень вихідної напруги.

За активно-індуктивного навантаження режим переривистого струму неможливий, оскільки струм змінюється експоненціально, лише асимптотично наближаючись до нуля після зникнення напруги. Тому регульовальна характеристика переривника $U = f(\gamma)$ при такому навантаженні є прямою лінією, що виходить з початку координат і описується рівнянням (1).

3.2. Робота послідовного переривника на RLE -навантаження

Якщо у складі навантаження є проти-ЕРС, це призводить до зменшення середнього струму навантаження:

$$I = \frac{U - E}{R_H}$$

Крім того, похідна вихідного струму на інтервалі його зростання менша, ніж за RL -навантаження:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_d - E - iR_H}{L_H},$$

а на інтервалі зменшення – більша:

$$\frac{di}{dt} = \frac{-E - iR_H}{L_H}.$$

За великих шпаруватостей та малих проти-ЕРС це мало впливає на характер процесу, але збільшення проти-ЕРС або зменшення шпаруватості неминуче призводить до появи пауз у вихідному струмі. Це відбувається тому, що завдяки проти-ЕРС струм не встигає зрости до достатнього рівня, і електромагнітна енергія, накопичена в індуктивності на інтервалі зростання струму, невелика. Коли ключ закривається, цієї енергії недостатньо для підтримання струму до наступного відкриття ключа, бо певна кількість енергії, яка б могла піти на створення електромагнітного поля, споживається джерелом проти-ЕРС. Виникає безструмова пауза (рис. 3).

Протягом безструмової паузи навантаження відокремлене від джерела живлення, а напруга на навантаженні дорівнює проти-ЕРС. У режимі безперервного струму середня вихідна напруга пов'язана зі шпаруватістю рівнянням (1). Проте поява безструмових пауз порушує цю пропорційність.

На рис. 4 зображені регульовальні характеристики для різних проти-ЕРС. Кожна з них має ділянку, спільну з РХ для активно-індуктивного навантаження без проти-ЕРС. За незмінної проти-ЕРС і зі зменшенням шпаруватості від $\gamma = 1$ РХ спочатку лінійна. Однак згодом, коли тривалість інтервалу t_2 збільшується, виникає безструмова пауза ($\gamma < \gamma_{гр}$ на рис.4), протягом якої миттєва вихідна напруга дорівнює проти-ЕРС (тобто більша, ніж за відсутності проти-ЕРС). РХ проходить вище від лінії $U = \gamma U_d$, перетинаючи вісь ординат при $U = E$. Чим більша проти-ЕРС, тим за більшої шпаруватості настає режим перери-

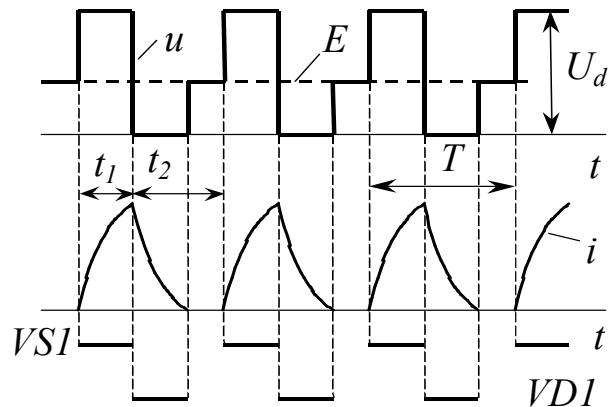


Рис. 3 Процеси у послідовному переривнику за ERL -навантаження

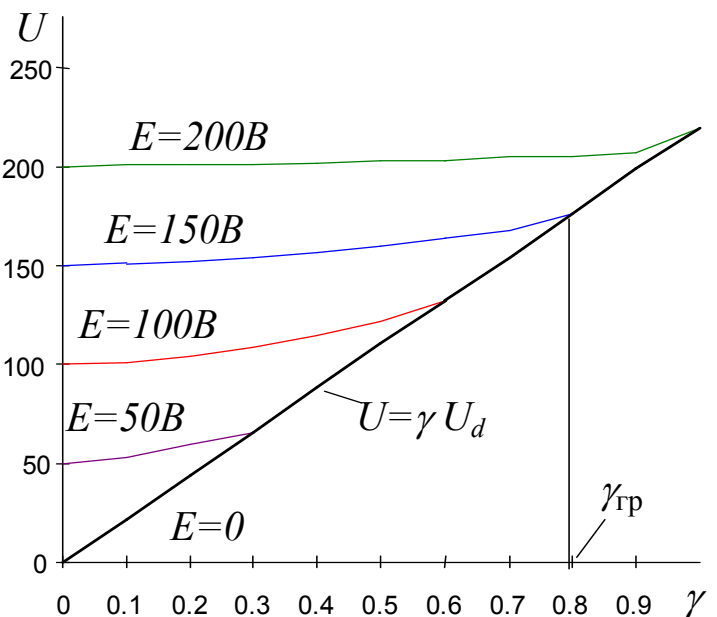


Рис. 4 Регульовальні характеристики

вистого струму і тим вище розташована регульовальна характеристика. Подібна нелінійність ускладнює керування перетворювачем та електроприводом у цілому, і тому режиму переривистого струму намагаються уникнути, підвищуючи частоту перемикання ключів, збільшуючи індуктивність та використовуючи схеми переривників та такі алгоритми керування ними, за яких переривистий струм неможливий.

Енергія в схемі рис. 1 може передаватися тільки від джерела напруги через переривник до навантаження.

3.3. Паралельний переривник

Якщо потрібно змінити напрям передачі енергії, використовують паралельний переривник (рис.5). Ця схема працює тільки за наявності у складі навантаження джерела ЕРС E .

Коли відкритий тиристор, виникає короткочасне коротке замикання навантаження, і в ньому під дією ЕРС виникає зростаючий у часі струм (рис.6), який замикається через тиристор. Похідна цього струму негативна

$$\frac{di}{dt} = \frac{-E - iR_H}{L_H}$$

і її напрям протилежний тому, який мав місце в схемі рис.1. Індуктивні елементи навантаження під час відкритого стану ключа накопичують електромагнітну енергію. Коли тиристор закривається, струм навантаження починає зменшуватись. Виникає ЕРС самоіндукції, що направлена згідно зі струмом. Під впливом цієї ЕРС і проти-ЕРС E (якщо їх сума більша від напруги U_d) відкривається діод і струм навантаження протікає колом «навантаження – VDI – конденсатор C – навантаження». Оскільки проти-ЕРС завжди менша від напруги джерела живлення, похідна струму позитивна

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_d - E - iR_H}{L_H} > 0$$

і струм зменшується. Енергія, накопичена на попередньому етапі в індуктивності, віддається конденсатору, підзаряджаючи його. Таким чином, у схемі рис. 5 рекуперація здійснюється навіть тоді, коли ЕРС двигуна менша від напруги живильної мережі. Зі збільшенням проти-ЕРС або зменшенням тривалості відкритого стану тиристор-

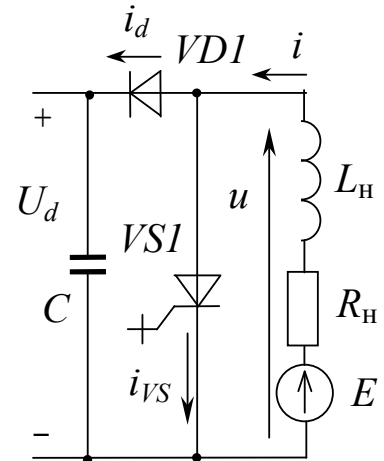


Рис. 5 Паралельний переривник

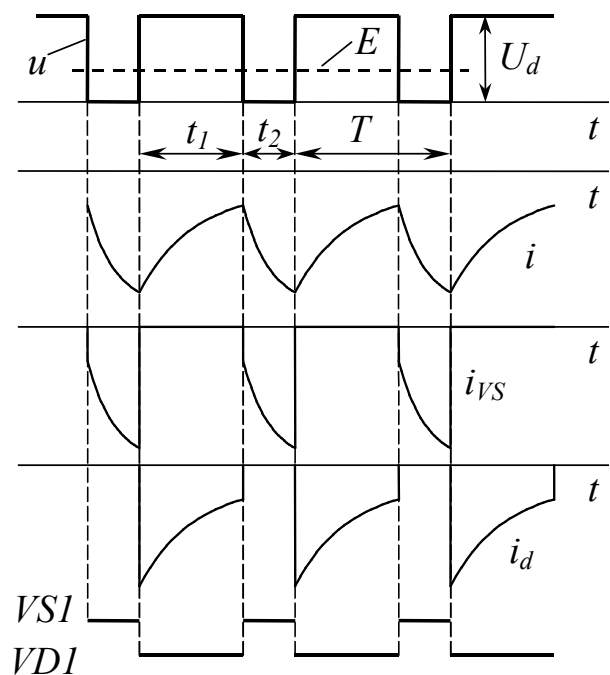


Рис. 6 Процеси у паралельному переривнику (безперервний струм)

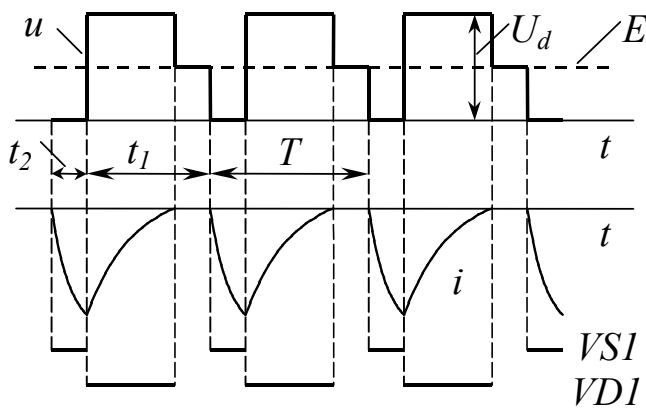


Рис. 7 Процеси у паралельному переривнику (переривистий струм)

ра настає, як і в попередній схемі, режим переривистого струму (рис. 7).

Регулювальні характеристики паралельного переривника в режимі безперервного струму описуються формулою (1), у якій під шпаруватістю $\gamma = t_1/T$ розуміють, як і раніше, відносну тривалість прикладання до навантаження напруги живильної мережі. У режимі переривистого струму протягом безструмової паузи напруга на навантаженні дорівнює проти-ЕРС,

внаслідок чого вона менша, ніж за відкритого діода. Тому й середня напруга в цьому режимі менша, ніж напруга, знайдена за формулою (1), причому тим менша, чим менша проти-ЕРС (див. рис. 8).

4. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

- 4.1. Робота виконується на математичних моделях переривників, реалізованих за допомогою електронних таблиць *Excel*.
- 4.2. Файл *Excel* складається з трьох листів (за кількістю вирішуваних задач).
- 4.3. Клітинки, в яких розташовані змінні вихідні дані, виділені сірим кольором. Змінювати вміст інших клітинок не рекомендується.
- 4.4. Змістом роботи є дослідження електромагнітних процесів на готових моделях шляхом зміни вихідних даних (шпаруватості, параметрів навантаження).
- 4.5. Побудова регулювальних характеристик здійснюється за допомогою двопараметричних таблиць підстановки для різних значень шпаруватості та проти-ЕРС.

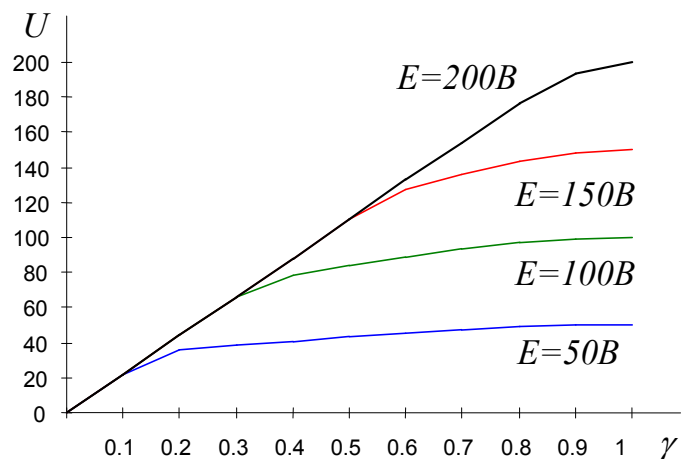


Рис. 8 Регулювальні характеристики

5. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Яке призначення конденсатора та діодів у схемах рис. 1 та 5?
2. Чому в схемі рис. 1 при *RL*-навантаженні переривистий струм неможливий?
3. Як середнє значення вихідної напруги переривника залежить від шпаруватості?
4. Яким шляхом протікає струм навантаження після закриття тиристора в схемах рис. 1 та 5?
5. Як збільшення індуктивності навантаження впливає на розмах коливань вихідного струму та його середнє значення?

6. Згідно з яким законом змінюється в часі струм навантаження?
7. Як похідна струму в схемах рис. 1 та 5 залежить від його середнього значення та проти-ЕРС?
8. Як величина проти-ЕРС, шпаруватості, індуктивності та активного опору навантаження впливає на тривалість безструмової паузи в схемах рис. 1 та 5?
9. Який напрям потоків енергії через переривник, джерело проти-ЕРС (електричну машину), індуктивність та активний опір навантаження в схемах рис. 1 та 5 при відкритих тиристорі або діоді?
10. За яких умов відкривається діод в схемах рис. 1 та 5?
11. Яке співвідношення між U_d , E та ЕРС самоіндукції в схемах рис. 1 та 5 при відкритих тиристорі або діоді?
12. Яке співвідношення між середньою вихідною напругою та проти-ЕРС E в схемах рис. 1 та 5?
13. Як поява пауз у вихідному струмі при RLE -навантаженні та незмінній шпаруватості впливає на середнє значення вихідної напруги в схемах рис. 1 та 5?
14. Як збільшення проти-ЕРС впливає на кількість енергії, накопичуваної в індуктивності в схемах рис. 1 та 5?
15. Поясніть форму регулювальних характеристик рис. 4 та 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. Сен П. Тиристорные электроприводы постоянного тока. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 232 с.
4. Глазенко Т.А. Полупроводниковые преобразователи в электроприводах постоянного тока. – Л.: Энергия, 1973. – 304 с.
5. Казачковський М. М. Автономні перетворювачі та перетворювачі частоти: навч. посіб. [Електронний ресурс] / М. М. Казачковський; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Електрон. текст. дані. – 2-ге вид., випр. та допов. – Дніпро.: НГУ, 2017. – 324 с. (режим доступу: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/150764?show=full>).
6. Силовые полупроводниковые устройства для управления двигателями переменного тока: Учебный модуль для студентов ВУЗов специальности 141 «Электроэнергетика, электротехника и электромеханика» (специализация «Электромеханические системы автоматизации и электропривод»). Теоретическая часть / [Електронний ресурс] Н.Н. Казачковський. Шнейдер Электрик, 2017. – 193 с. (Режим доступу: http://elprivod.nmu.org.ua/files/converters/%D0%9C%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BB%D1%8C%D0%A8%D0%AD_17.pdf)

Лабораторна робота СПАЕ-7
“Дослідження реверсивного переривника постійної напруги”

1. МЕТА РОБОТИ

Вивчити особливості електромагнітних процесів реверсивних переривників постійної напруги з двополярною ШІМ.

2. ПРОГРАМА РОБОТИ

- 2.1. Дослідити електромагнітні процеси в реверсивному переривнику постійної напруги при роботі на RL -навантаження з різними шпаруватостями та параметрами навантаження.
- 2.2. Дослідити електромагнітні процеси в реверсивному переривнику постійної напруги при роботі на RLE -навантаження в режимах споживання енергії навантаженням та рекуперації.

3. ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

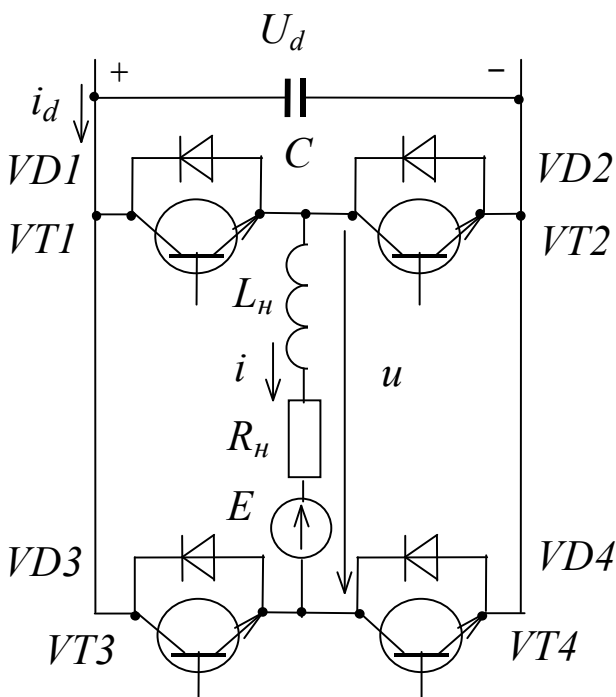


Рис.1 Мостовий переривник

Схема реверсивного переривника (або широтно-імпульсного перетворювача – ШІП) постійної напруги зображена на рис.1. У ній використані біполярні транзисторні ключі (звичайно, використовуються і інші різновиди силових ключів).

В схемі можлива зміна напрямку як вихідної напруги, так і струму. Для цього замість однієї діагоналі моста (наприклад, $VT1, VT4$) вмикається інша ($VT2, VT3$). Залежно від порядку перемикання ключів розрізняють багато законів комутації такого переривника, для яких характерна як однополярна, так і двополярна модуляція вихідної напруги. Надалі розглядатимемо лише симетричний закон комутації з двополярною ШІМ. Згідно з цим законом діагоналі моста протягом періоду модуляції одна за одною отримують керуючі імпульси.

Згідно з цим законом діагоналі моста протягом періоду модуляції одна за одною отримують керуючі імпульси.

3.1. Робота переривника на RL -навантаження

На рис.2 наведені часові діаграми при роботі на RL -навантаження з симетричним законом комутації і шпаруватістю $\gamma = t_1/T$, близькою до 1 (проти-ЕРС у складі навантаження відсутня).

Процеси в колі навантаження описуються диференціальним рівнянням

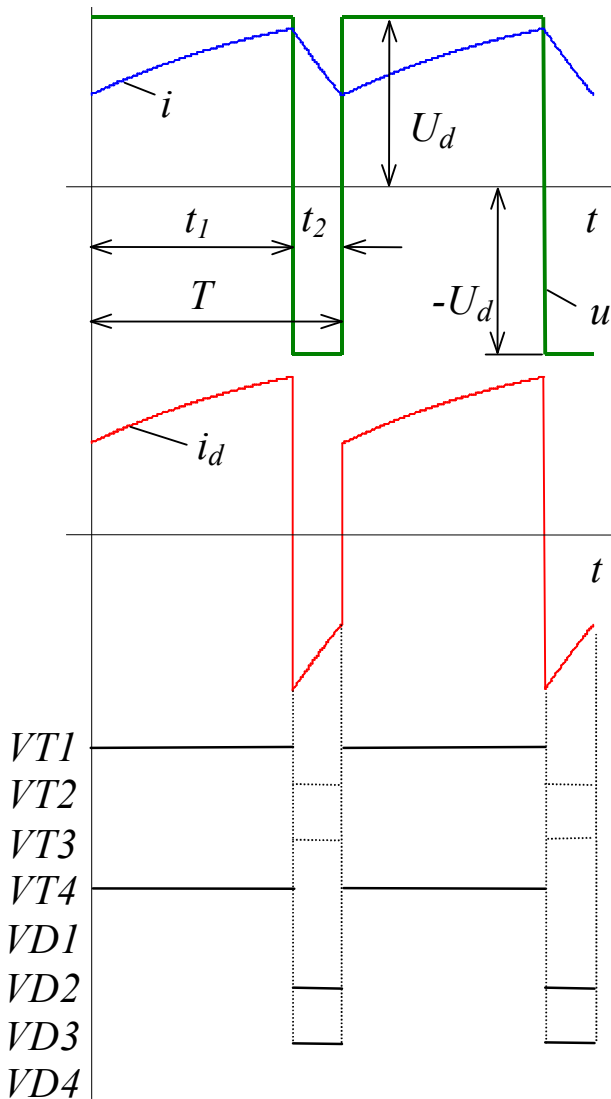


Рис.2 Часові діаграми при роботі на RL -навантаженні

аграми роботи позначені переривистими лініями, а діаграми діодів – суцільними).

Середня напруга на навантаженні

$$U = (2\gamma - 1)U_d \quad (1)$$

тим більша, чим довше відкриті ключі $VT1$, $VT4$. Оскільки до навантаження протягом періоду T прикладається напруга обох знаків, такий спосіб регулювання напруги зветь двополярною широтно-імпульсною модуляцією.

Абсолютне значення похідної струму на інтервалі t_1

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_d - iR_H}{L_H}$$

менше, ніж на інтервалі t_2

$$\frac{di}{dt} = \frac{-U_d - iR_H}{L_H}$$

На інтервалі t_1 енергія споживається навантаженням від джерела постійної напруги через переривник (вона накопичується в індуктивності у ви-

$$u = iR_H + L_H \frac{di}{dt}$$

Коли відкриті ключі $VT1$, $VT4$, до навантаження прикладена позитивна напруга $u = U_d$. Струм збільшується, протікаючи по колу “ $+U_d - VT1 -$ навантаження $- VT4 - -U_d$ ” і намагаючись зрости до рівня $I_{y1} = U_d / R_H$.

Коли замість $VT1$, $VT4$ керуючі імпульси отримують $VT2$, $VT3$, ключі $VT1$, $VT4$ закриваються, але струм навантаження внаслідок його індуктивного характеру не змінює напрямку. ЕРС самоіндукції відкриває діоди $VD2$, $VD3$, і струм навантаження тече колом “навантаження $- -VD3 -$ конденсатор $C - VD2 -$ навантаження”. До навантаження через відкриті діоди прикладена негативна напруга $u = -U_d$, внаслідок чого струму інтенсивно зменшується, намагаючись досягти усталеного значення $I_{y2} = -U_d / R_H$.

Транзистори $VT2$, $VT3$, що отримали позитивні потенціали на бази, не можуть відкритися, бо мають позитивні потенціали на емітерах (тому на рис.2 їхні ді-

гляді енергії електромагнітного поля та втрачається у вигляді тепла в активному опорі). На інтервалі t_2 енергія, накопичена в індуктивності, повертається назад до джерела напруги (не вся, бо частка її також розсіюється в активному опорі). Миттєвий струм i_d джерела постійного струму на інтервалі t_2 змінює знак, але середнє значення цього струму співпадає за знаком із напругою. Це означає, що протягом періоду енергія більше віддається джерелом напруги, ніж споживається.

Оскільки джерелом постійної напруги найчастіше є некерований випрямляч з одnobічною провідністю, паралельно йому вмикають конденсатор великої ємності. Він згладжує пульсації вихідної напруги випрямляча і запобігає перенапруженням на ключах з боку джерела живлення. Крім того, на інтервалі t_2 струм навантаження протікає саме через конденсатор, підзаряджаючи його, бо випрямляч не може змінити напрямок свого струму і спожити рекуперовану енергію.

Зменшення шпаруватості призводить до того, що струм протягом інтервалу t_2 встигає впасти до нуля (рис.3). Це відбувається тоді, коли ЕРС самоіндукції знижується до рівня $e_L = -L_{\text{н}} \frac{di}{dt} = U_d$. Струм, який раніш протікав через діоди $VD2, VD3$, змінює знак, переходячи на транзистори $VT2, VT3$, які ще від початку інтервалу t_2 мають на базах позитивні потенціали. Завдяки можливості двобічного протікання струму безструмові паузи відсутні. Навантаження споживає енергію від переривника тоді, коли відкриті транзистори (вихідні напруга та струм мають однакові знаки), і віддає її при відкритих діодах (знаки напруги та струму протилежні).

Якщо шпаруватість $\gamma = 0,5$ (рис.4), середні значення вихідних напруги та струму дорівнюють нулю. Однак середній струм на вході переривника дещо більший від нуля, оскільки він споживає енергію, потрібну для компенсації втрат в активному опорі навантаження. Чим менша стала часу наванта-

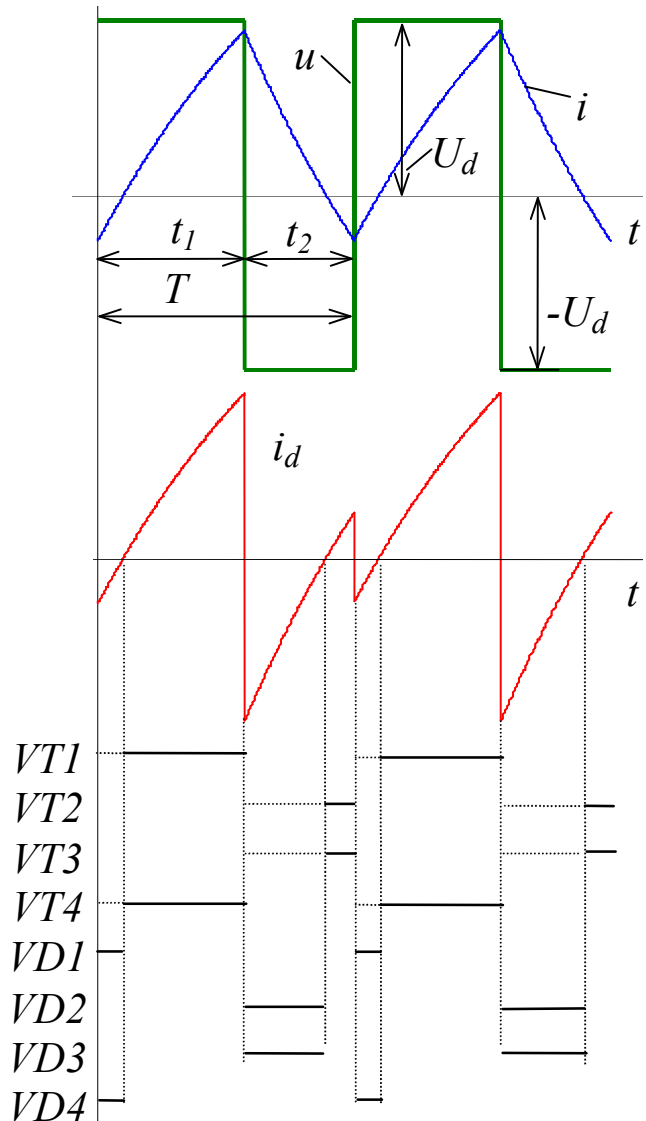


Рис.3 Вплив зменшення шпаруватості

ження $T_H = L_H/R_H$, тим більша кривина миттєвого струму, споживаного переривником при $\gamma = 0,5$, і тим більше його середнє значення.

Якщо шпаруватість близька до нуля (рис.5), процеси подібні до тих, що зображені на рис.2, але знаки вихідних напруги та струму протилежні. Слід зауважити, що знак середнього струму на вході переривника той самий, що й на рис.2, бо напрямок передачі енергії в обох випадках однаковий.

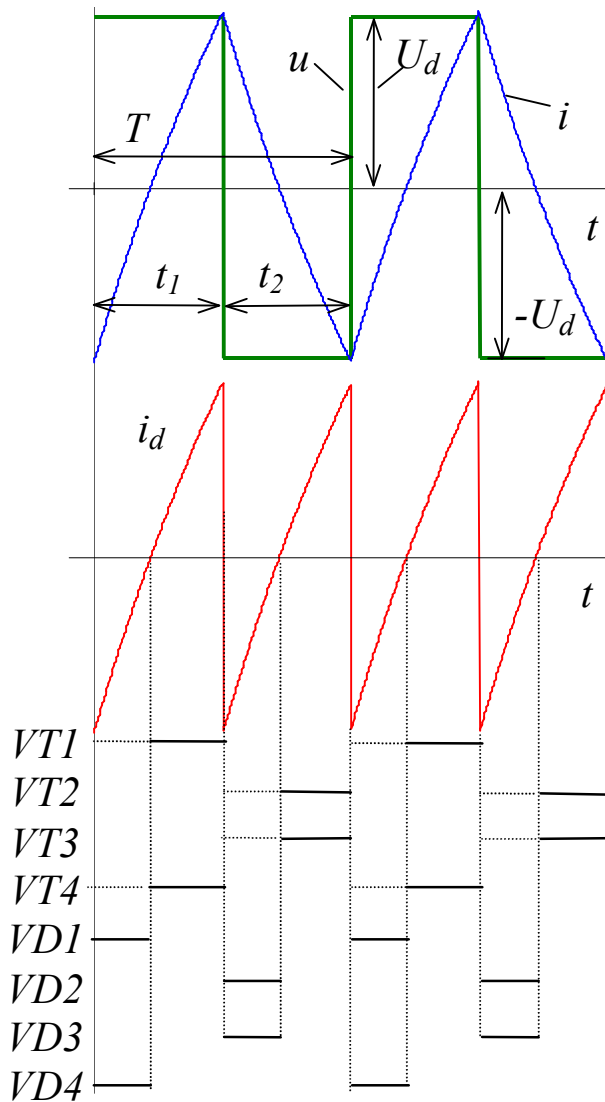


Рис.4 Часові діаграми при $\gamma=0,5$

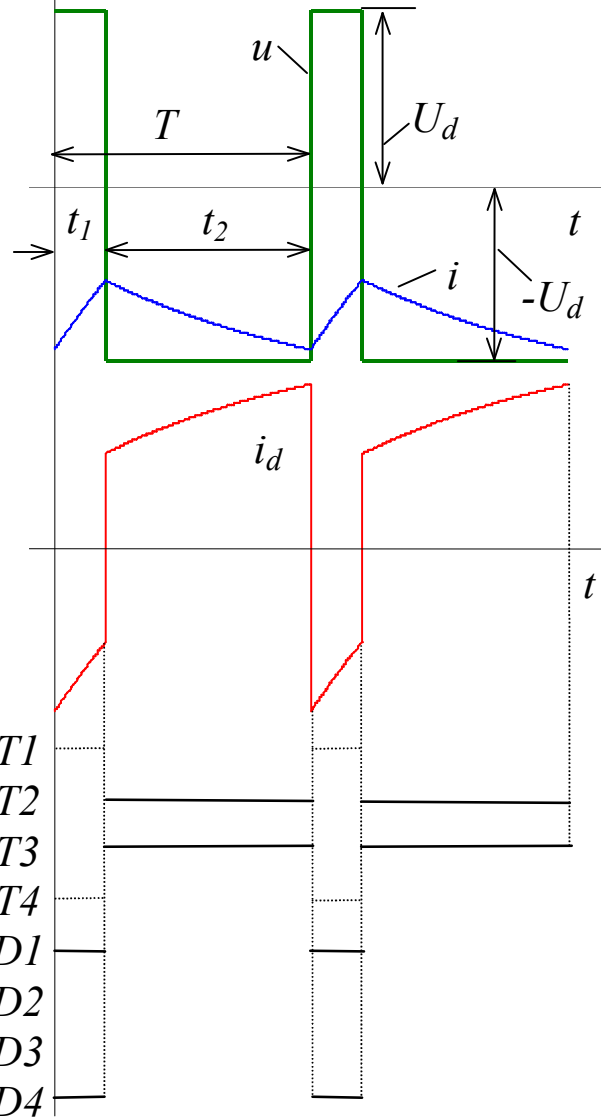


Рис.5 Часові діаграми при $\gamma < 0,5$

Оскільки вихідний струм при двополярній ШІМ завжди безперервний, регульовальна характеристика переривника завжди описується рівнянням (1).

3.2. Робота переривника на RLE-навантаженні

Коли у складі навантаження (див. рис.1) є проти-ЕРС E (наприклад, обмотка якоря машини постійного струму), процеси в навантаженні описуються диференціальним рівнянням

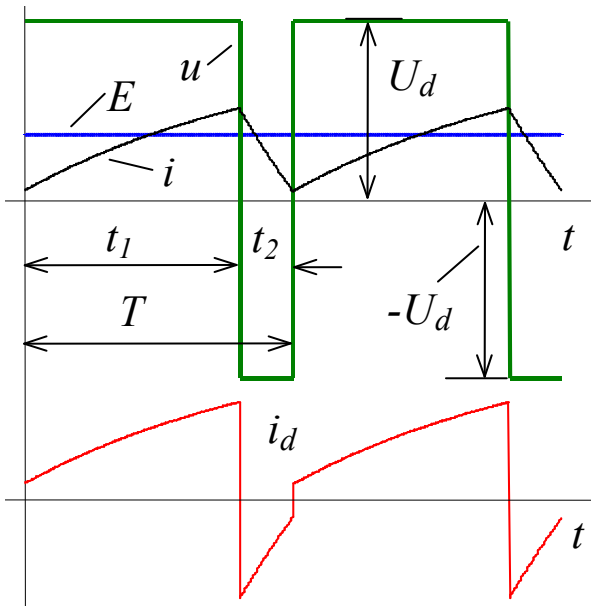


Рис.6 Процеси при ERL-навантаженні

$$u = iR_{\text{н}} + L_{\text{н}} \frac{di}{dt} + E.$$

Поява проти-ЕРС зменшує середнє значення вихідного струму $I = (U - E)/R_{\text{н}}$. Якщо $E < U$, знаки напруги та струму співпадають і енергія передається через переривник до навантаження (рис.6). Електрична машина працює в режимі двигуна. При достатньо великій проти-ЕРС середній струм зменшується настільки, що миттєвий струм починає короткочасно міняти знак. На інтервалах часу, коли знаки миттєвого струму та проти-ЕРС не співпадають, електрична машина віддає енергію через переривник до джерела живлення, переходячи до рекуперативного режиму.

Коли $E = U$, середній вихідний струм зменшується до нуля (рис.7), а електрична машина переходить до режиму ідеального холостого ходу. Якщо брати до уваги миттєвий струм, то електрична машина працює то в режимі двигуна, то в рекуперативному режимі, але середній струм та момент дорівнюють нулю, а проти-ЕРС – середній вихідній напрузі переривника. Це означає, що в середньому за період передача енергії у будь-якому напрямку через вал машини відсутня.

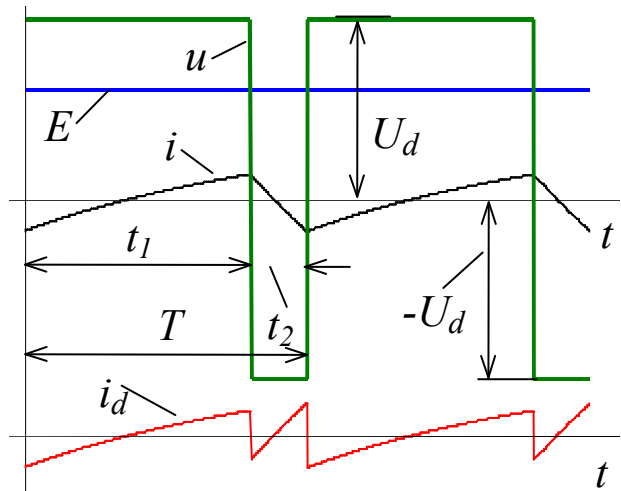


Рис.7 Процеси при ERL-навантаженні (холостий хід)

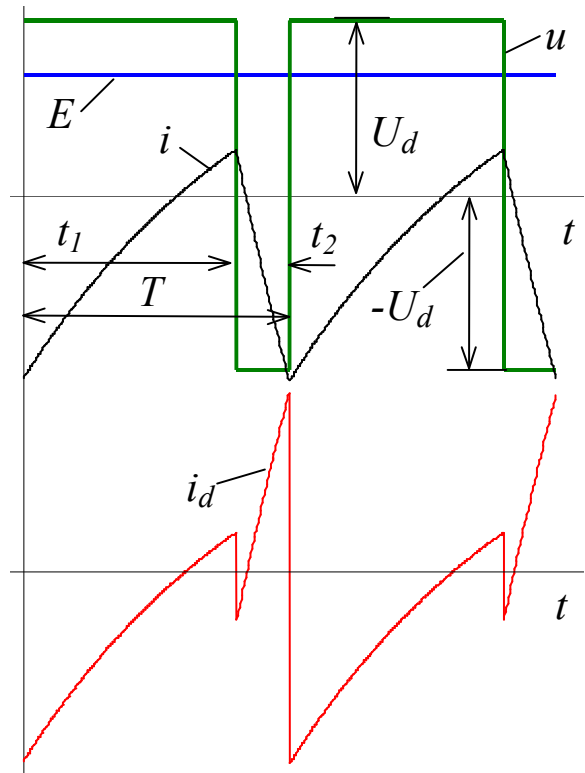


Рис.8 Процеси при ERL-навантаженні (рекуперация)

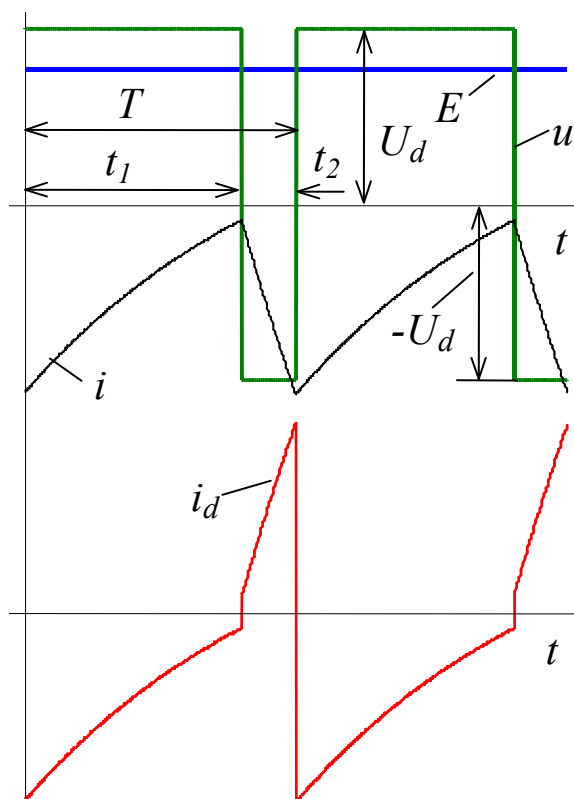


Рис.9 Вплив величини проти-ЕРС

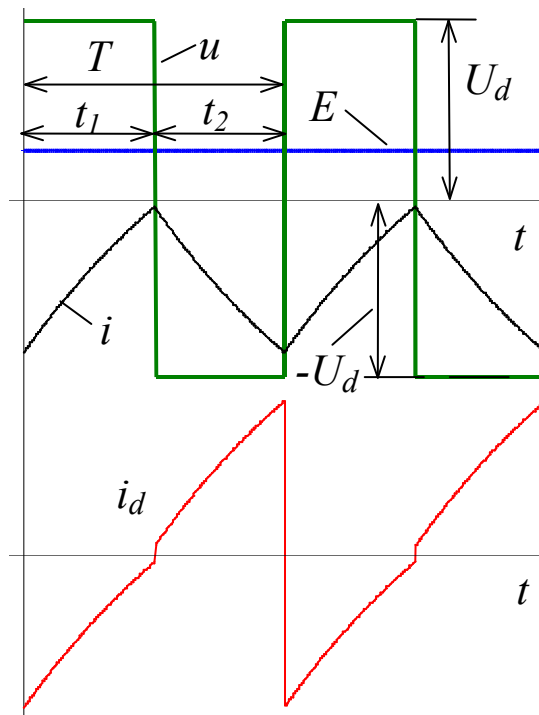


Рис.10 Рекуперація при $\gamma=0,5$

Коли $E > U$, змінюється знак середнього струму і напрямок передачі енергії (рис.8).

Електрична машина переходить до рекуперативного режиму, віддаючи енергію переривнику (короткочасно, однак можливе споживання енергії). Перехід до режиму рекуперації може здійснитися як завдяки зменшенню середньої напруги, так і шляхом збільшення проти-ЕРС.

Подальше збільшення різниці $E - U$ має наслідком однополярний характер вихідного струму переривника і зникнення короткочасних періодів споживання енергії електричною машиною (рис.9).

Якщо шпаруватість $\gamma = 0,5$, середнє значення вихідної напруги $U = 0$. Часові діаграми для цього випадку зображені на рис.10. Як і при шпаруватостях $\gamma > 0,5$ (див. рис.10), електрична машина протягом усього періоду модуляції віддає електричну енергію. Через переривник енергія передається в обох напрямках: на інтервалі t_1 – від навантаження до джерела постійної напруги, на інтервалі t_2 – навпаки. Активний опір навантаження отримує на першому етапі частку енергії електричної машини, на другому – енергії з обох джерел. Зміна знаку проти-ЕРС призводить лише до зміни знаку струму навантаження. Характер процесів не змінюється.

4. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

4.1. Робота виконується на математичних моделях переривників, реалізованих за допомогою електронних таблиць Excel.

- 4.2. Клітинки, в яких розташовані змінні вихідні дані, виділені рожевим кольором. Змінювати вміст інших клітинок не рекомендується.
- 4.3. Змістом роботи є дослідження електромагнітних процесів на готових моделях шляхом зміни вихідних даних (шпаруватості, параметрів навантаження).

5. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Чому при симетричному законі комутації мостового переривника неможливий режим переривистого струму?
2. Як протікає струм навантаження одразу після закриття транзисторів $VT1$, $VT4$ і куди передається енергія, накопичена в індуктивних елементах навантаження на попередньому етапі?
3. Чому дорівнює середній вхідний струм переривника при суто індуктивному навантаженні та $\gamma = 0,5$?
4. Який напрямок має середній вхідний струм переривника при $\gamma < 0,5$ та $\gamma > 0,5$?
5. Який напрямок мають при RL -навантаженні потоки енергії, що проходять через джерело живлення, індуктивність та активний опір навантаження, якщо відкриті $VT1$, $VT4$?
6. Який напрямок мають при RL -навантаженні потоки енергії, що проходять через джерело живлення, індуктивність та активний опір навантаження, якщо відкриті $VD2$, $VD3$?
7. Який напрямок мають при RLE -навантаженні потоки енергії, що проходять через джерело живлення, індуктивність, активний опір навантаження та джерело проти-ЕРС, якщо відкриті $VT2$, $VT3$, а $E > (2\gamma - 1)U_d$?
8. Який напрямок мають при RLE -навантаженні потоки енергії, що проходять через джерело живлення, індуктивність, активний опір навантаження та джерело проти-ЕРС, якщо відкриті $VD2$, $VD3$, а $E < (2\gamma - 1)U_d$?
9. Чому при симетричному законі комутації мостового переривника миттєвий вхідний струм переривника може бути знаковмінним?
10. За яких умов джерело проти-ЕРС споживає енергію і за яких віддає її переривнику?
11. Чому при $\gamma > 0,5$ темп зростання вихідного струму менший від темпу його зменшення (рис.2)?
12. Що потрібно зробити в схемі рис.1, щоб змінити знак середньої вихідної напруги?
13. Звідки споживає і куди витрачає енергію переривник при RL -навантаженні та $\gamma = 0,5$ (рис.4)?
14. Як співвідносяться вихідна напруга переривника, проти-ЕРС та похідна вихідного струму, коли сам струм дорівнює нулю?
15. Як середня вихідна напруга залежить від шпаруватості?

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. Сен П. Тиристорные электроприводы постоянного тока. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 232 с.
4. Глазенко Т.А. Полупроводниковые преобразователи в электроприводах постоянного тока. – Л.: Энергия, 1973. – 304 с.
5. Казачковський М. М. Автономні перетворювачі та перетворювачі частоти: навч. посіб. [Електронний ресурс] / М. М. Казачковський; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Електрон. текст. дані. – 2-ге вид., випр. та допов. – Дніпро.: НГУ, 2017. – 324 с. (режим доступу: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/150764?show=full>).
6. Силовые полупроводниковые устройства для управления двигателями переменного тока: Учебный модуль для студентов ВУЗов специальности 141 «Электроэнергетика, электротехника и электромеханика» (специализация «Электромеханические системы автоматизации и электропривод»). Теоретическая часть / [Електронний ресурс] Н.Н. Казачковський. Шнейдер Електрик, 2017. – 193 с. (Режим доступу: http://elprivod.nmu.org.ua/files/converters/%D0%9C%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BB%D1%8C%D0%A8%D0%AD_17.pdf)

Лабораторна робота СПАЕ-8 “Дослідження однофазних автономних інверторів напруги”

1. МЕТА РОБОТИ

Вивчити принцип дії та особливості електромагнітних перехідних процесів в однофазному мостовому автономному інверторі напруги (АІН) з амплітудною (АМ) та широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ).

2. ПРОГРАМА РОБОТИ

1. АІН з амплітудною модуляцією:

- 1.1. Вивчити принцип дії та шляхи протікання струмів в однофазному АІН з амплітудною модуляцією.
- 1.2. Дослідити вплив частоти перемикання ключів, індуктивності та активного опору навантаження на форму та середнє значення струмів на вході та на виході АІН з АМ, а також на тривалість відкритого стану тиристорів та діодів за активно-індуктивного навантаження.
- 1.3. Дослідити вплив амплітуди та фази проти-ЕРС на форму струмів на вході та на виході АІН, а також на тривалість відкритого стану тиристорів та діодів при RLE -навантаженні.
- 1.4. Вивчити характер обміну енергією поміж колом випрямленого струму та навантаженням через АІН у режимах інвертора та активного випрямляча.

2. АІН з широтно-імпульсною модуляцією:

- 2.1. Вивчити принцип широтно-імпульсної модуляції вихідної напруги однофазного АІН.
- 2.2. Дослідити вплив частоти модуляції на форму вихідних напруги та струму та порівняти їх із такими для амплітудної модуляції. Дослідити залежність коефіцієнту гармонік вихідного струму від частоти модуляції.
- 2.3. Дослідити характер процесів в АІН з ERL -навантаженням у режимах інвертора та активного випрямляча.

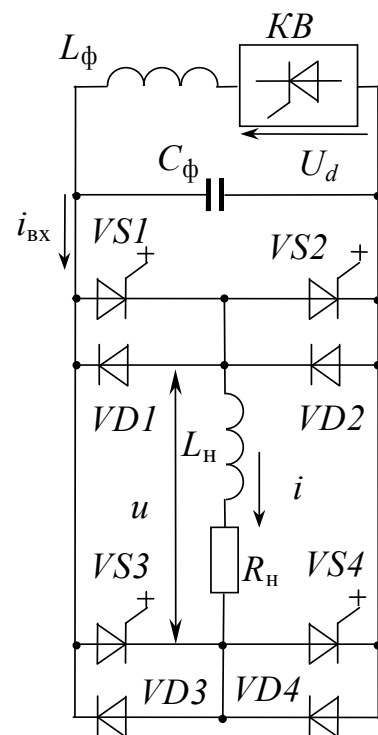


Рис. 1
Однофазний АІН

3. ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

3.1 Робота АІН з АМ на активне та активно-індуктивне навантаження

Схема однофазного інвертора напруги з амплітудною модуляцією наведена на рис. 1. Як видно, вона цілком подібна до схеми переривника постійної напруги (широтно-імпульсного перетворювача). Інвертор на рис. 1 реалізований на двоопераційних тиристорах, хоча замість них можуть бути одноопераційні тиристори (звичайно, зі схемою штучної комутації), силові польові, біполярні або *IGBT*-транзистори. При використанні одноопераційних тиристорів, як і в ШПП, потрібні спеціальні схеми штучної комутації для закриття тиристорів у будь-який потрібний момент. Живиться інвертор від джерела регульованої постійної напруги (найчастіше від керованого випрямляча). Керування інвертором подібне до керування переривником за симетричним законом комутації.

Проте на відміну від ШПП, шпаруватість вихідної напруги в такому інверторі завжди незмінна та дорівнює 0,5, завдяки чому середні значення вихідних струму та напруги завжди дорівнюють нулю.

Діаграми напруг та струмів за суто активного навантаження ($L_i = 0$) наведені на рис. 2. Завдяки перемиканню діагоналей інвертора до навантаження подається напруга від джерела постійної напруги з тим чи іншим знаком. Напруга та струм на виході інвертора знакозмінні та синфазні. Струм зворотними діодами не тече. Струм на вході інвертора незмінний у часі. Сигнали керування, що подаються до керуючих електродів тиристорів, зображені в нижній частині рис. 2 (криві $u_{к1} \dots u_{к4}$).

Щоб змінити частоту вихідної напруги, досить змінити частоту перемикання ключів, не змінюючи послідовності цього перемикання. Зміна рівня вихідної напруги здійснюється за допомогою керованого випрямляча КВ, тобто завдяки зміні напруги на вході АІН. Векторна діаграма для перших гармонік напруг та струмів зображена на рис. 3,б.

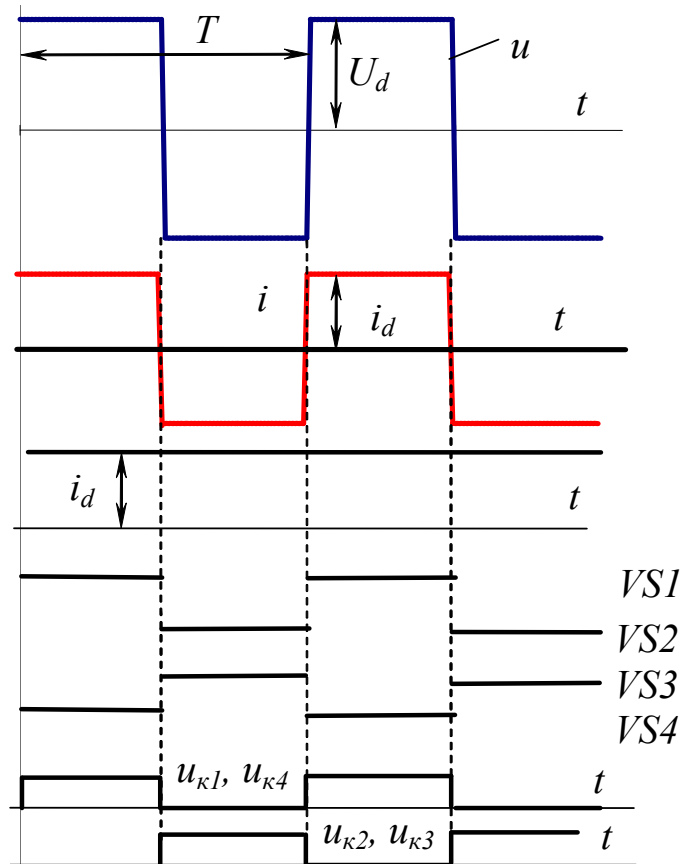


Рис. 2. Робота АІН з амплітудною модуляцією на суто активне навантаження

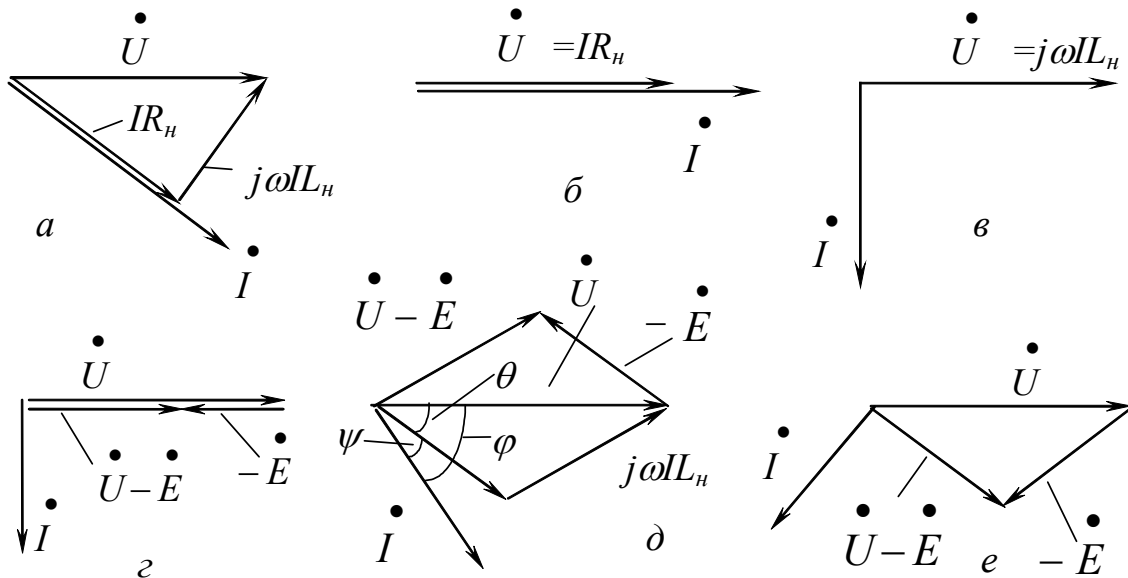


Рис. 3. Векторні діаграми АІН

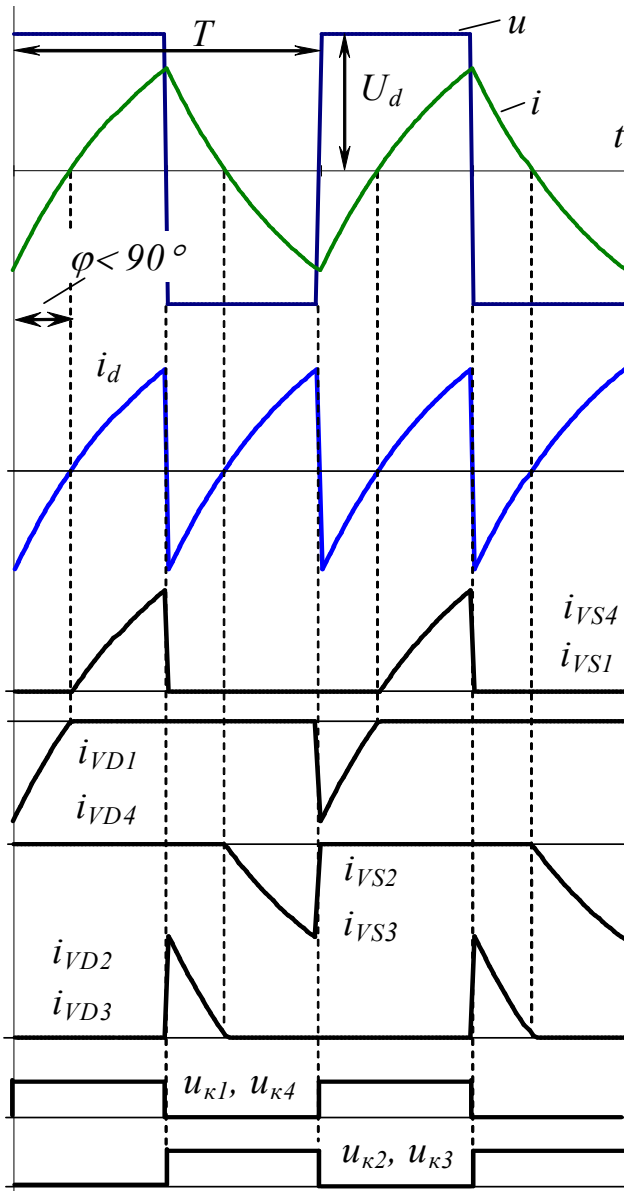


Рис.4. Робота АІН на активно-індуктивне навантаження

Якщо навантаження активно-індуктивне, процеси в інверторі описуються рівнянням

$$u = iR_n + L_n \frac{di}{dt},$$

вихідний струм має кусочно-експоненційний характер (рис. 4). Фазовий зсув струму відносно напруги $\phi < 90^\circ$. Одразу після закриття однієї пари тиристорів і відкриття іншої струм навантаження тече зворотними діодами. Керуючі імпульси (див. Нижню частину рис. 4) доводиться підтримувати протягом усього півперіоду вихідної напруги, оскільки дійсний момент відкриття відповідного ключа заздалегідь не відомий і залежить від характеру навантаження.

Вхідний струм i_d при цьому тимчасово змінює знак, але його середнє значення більше від нуля. Це означає, що хоча потік енергії і змінює періодично напрям, проте за період вихідної напруги інвертор споживає електричну енергію, яка витрачається у вигляді тепла в активному опорі навантаження.

Зміна напрямку вхідного струму можлива завдяки наявності конденсатора C . Окрім накопичення енергії, переданої від навантаження, конденсатор виконує також функцію згладжування коливань вихідної напруги випрямляча. Тому напруга на вході інвертора вважається ідеально гладкою.

Векторна діаграма для активно-індуктивного навантаження зображена на рис. 3,а.

Якщо навантаження суто індуктивне, вихідний та вхідний струми мають кусочно-лінійний характер (рис. 5), причому середнє значення вхідного струму дорівнює нулю (вся енергія, спожита інвертором при роботі тиристора, віддається назад до конденсатора, коли відкривається діод). Тривалість роботи тиристорів та діодів однакова. Векторна діаграма для суто індуктивного навантаження подана на рис. 3,в.

Як видно, вихідні напруга та струм, хоч і знаковмінні, але досить далекі від синусоїдних. Вищі гармоніки вихідного струму призводять до збільшення втрат активної енергії у контурі навантаження.

У всіх розглянутих режимах (окрім суто індуктивного навантаження) схема працює в режимі інвертора, оскільки передає активну енергію з ланки постійного струму до навантаження, перетворюючи її на енергію змінного струму.

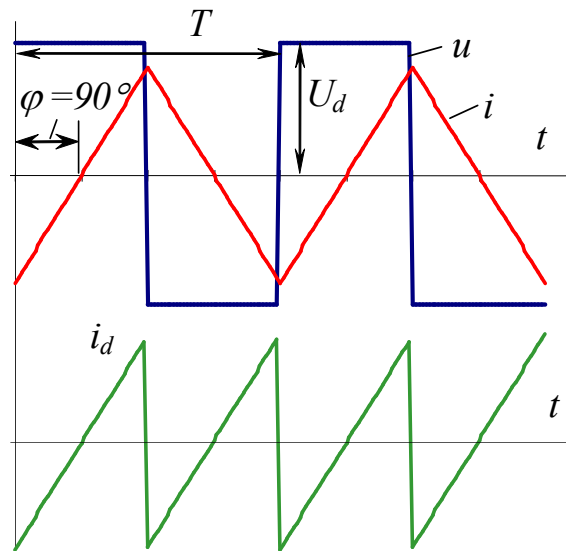


Рис.5. Робота АІН на суто індуктивне навантаження

3.2. Робота АІН з АМ на проти-ЕРС

Якщо у складі навантаження є синусоїдна проти-ЕРС (наприклад, коли від інвертора живиться фазна обмотка двигуна змінного струму), рівняння напруг для контуру навантаження має вигляд

$$u = e + iR_n + L_n \frac{di}{dt};$$

$$e = E_m \sin(\omega t - \Theta),$$

де Θ – фаза проти-ЕРС відносно вихідної напруги.

Режим роботи інвертора суттєво залежить від фази Θ . На рис. 6 наведені діаграми напруг та струмів для випадку, коли активний опір навантаження відсутній, а $\Theta = 0$ (проти-ЕРС завжди має напрямок, протилежний напрямку напруги).

Як видно, проти-ЕРС змінює тільки форму струму (порівняно з рис. 5), але не зменшує його фазовий зсув. Це означає, що джерело проти-ЕРС не споживає активну енергію (на першій половині кожного півперіоду віддається та сама кількість енергії, яка споживається на другому). Про це також свідчить те, що середнє значення споживаного інвертором струму дорівнює нулю.

Якщо від інвертора живиться двигун змінного струму, синфазність напруги та проти-ЕРС означає, що його кут навантаження дорівнює нулю, а двигун працює в режимі ідеального холостого ходу.

З векторної діаграми для цього випадку видно (рис. 3,г), що проти-ЕРС, синфазна з напругою, не змінює фази струму, яка, як і для суто індуктивного навантаження без проти-ЕРС, дорівнює 90° .

Якщо проти-ЕРС відстає від напруги, не тільки змінюється форма вихідного струму (рис. 7), але й зменшується його фаза, а середнє значення струму, споживаного інвертором, стає більшим від нуля. Зменшення фази струму видно і з векторної діаграми (рис. 3,д). Хоча фаза між струмом та ве-

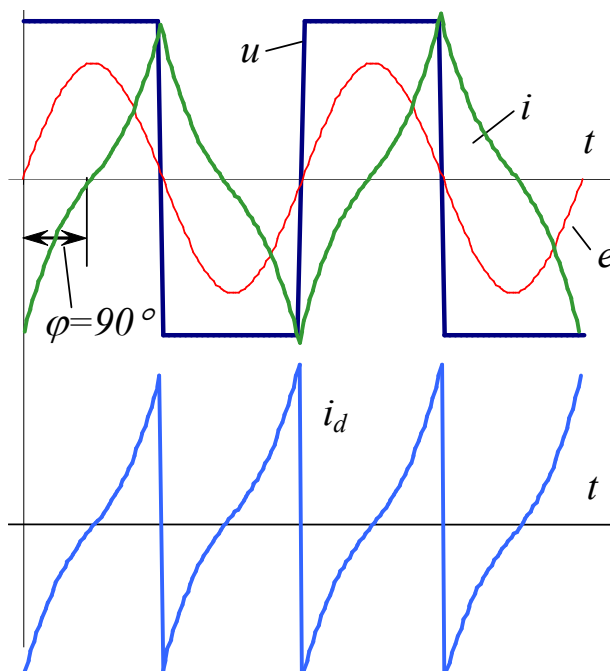


Рис. 6. Робота АІН на проти-ЕРС ($\Theta = 0$)

• •
 ктором $U - E$ залишилась тією ж самою, як і у попередньому випадку (рис. 3,г), проте кут між векторами струму та напруги зменшився.

Це означає, що почалось споживання активної енергії джерелом проти-ЕРС. Двигун, який живиться від інвертора, працює в режимі двигуна. Як і при активно-індуктивному навантаженні, тривалість роботи тиристорів більша, ніж діодів.

Якщо проти-ЕРС випереджає напругу (таке може бути при роботі двигуна змінного струму в режимі генератора), фаза вихідного струму $\varphi > 90^\circ$ (рис. 8), середній споживаний інвертором струм менший від нуля, а енергія віддається від навантаження до джерела постійної напруги. Про це свідчить і те, що діоди відкриті протягом більшого часу, ніж тиристори. Автономний інвертор працює в режимі випрямляча. Збільшення фази струму відносно напруги видно також і з векторної діаграми (рис. 3,е). Якби керувані ключі в схемі рис. 1 були відсутні, характер електромагнітних процесів у

режимі випрямляча був би зовсім іншим. Тому подібний режим автономних інверторів іноді називають режимом активного випрямляча. Необхідною умовою існування подібного режиму є наявність у ланці змінного струму джерела проти-ЕРС, яка за фазою випереджує вихідну напругу інвертора.

Щоб мати можливість передачі отриманої з контуру навантаження активної енергії до живильної мережі, паралельно керованому випрямлячу КВ (рис. 1) треба ввімкнути ведений мережею інвертор. В малопотужних електроприводах, коли застосування веденого інвертора економічно недоцільне,

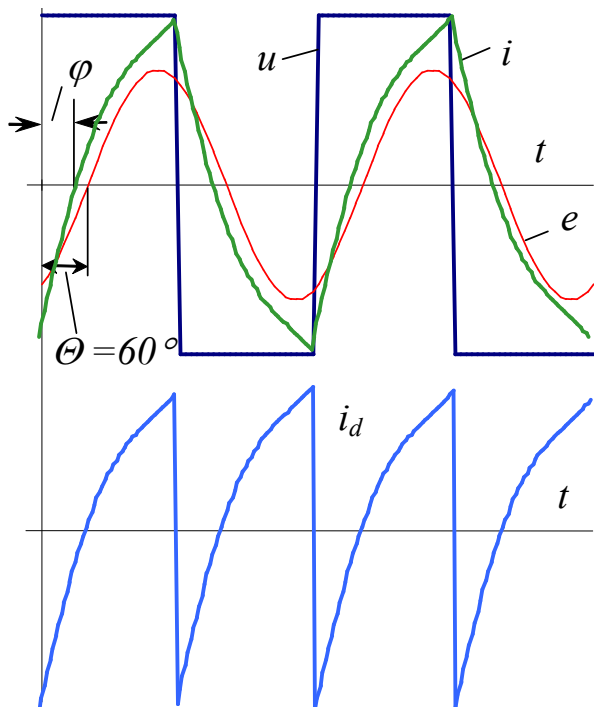


Рис. 7. Робота АІН на проти-ЕРС ($\Theta > 0$)

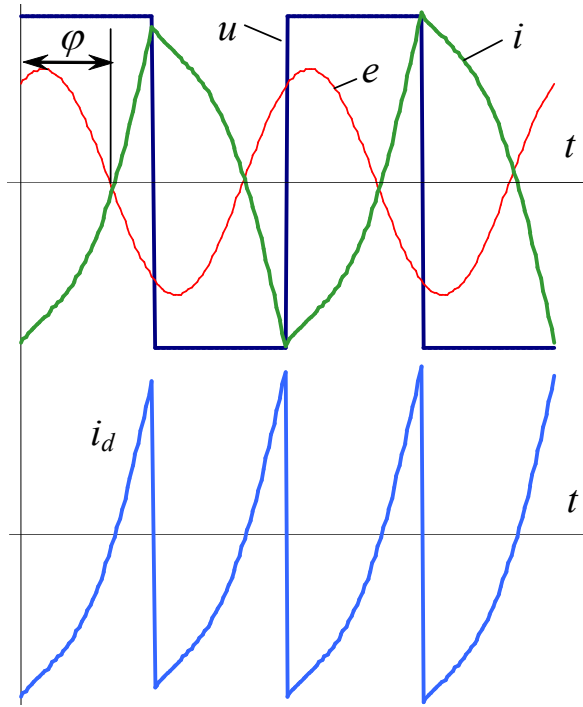


Рис. 8. Робота АІН на проти-ЕРС ($\Theta < 0$)

надлишок енергії, отриманої конденсатором від двигуна, скидають до розрядного резистора за допомогою спеціального ключа.

3.3. Принцип широтно-імпульсної модуляції

В АІН із ШІМ частота перемикання ключів набагато більша за частоту вихідної напруги. Завдяки цьому виникає можливість шляхом плавної зміни шпаруватості протягом періоду вихідної напруги не тільки регулювати рівень цієї напруги, а й забезпечити практично синусоїдальну форму вихідного струму. Унаслідок того, що інвертор із ШІМ здатний змінювати не тільки частоту, а й рівень вихідної напруги, потреба в регулюванні його вхідної напруги відсутня, і вхідний випрямляч є звичайно некерованим. Схема ж інвертора при цьому також відповідає рис. 1.

Найбільш простим способом керування зазначеними інверторами є вертикальний, подібний до того, що використовують при керуванні випрямлячами та переривниками. Спрощена схема системи симетричного керування однофазним АІН із двополярною ШІМ зображена на рис. 9,а (ГОН – генератор опорної напруги, НО – нуль-орган, Д – драйвери). Вона ідентична системі керування мостовим переривником і відрізняється лише формою напруги

керування. Принцип її дії базується на порівнянні трикутної опорної напруги $u_{оп}$ з синусоїдальною напругою керування $u_{к}$. Кожного разу після перетину напругою керування низхідної ділянки опорної напруги вихідна напруга інвертора збільшується, висхідної – зменшується (рис. 9,б).

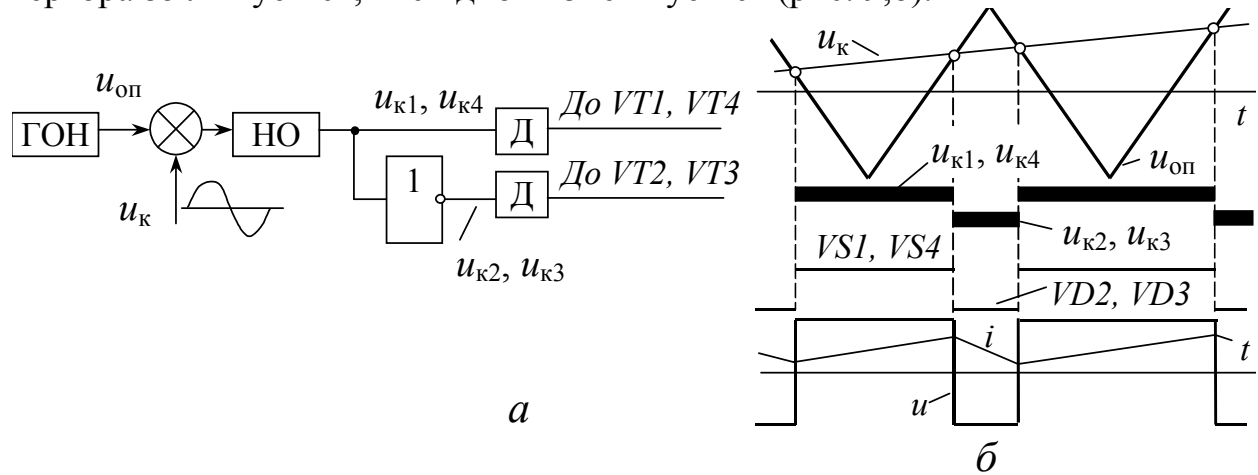


Рис. 9. Система керування однофазним АІН із двополярною ШІМ

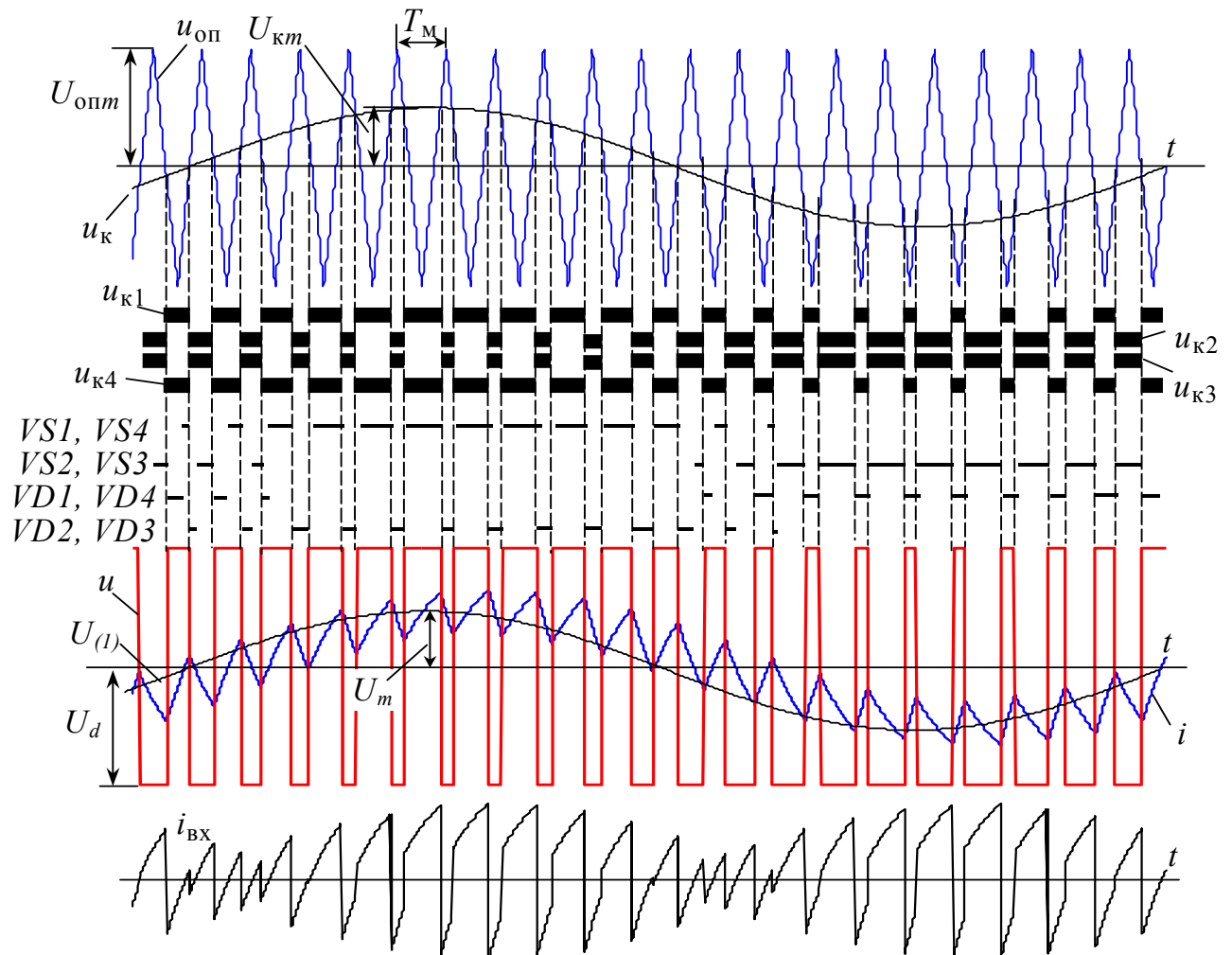


Рис. 10. Часові діаграми однофазного АІН із двополярною ШІМ

На рис. 10 наведені діаграми напруг і струмів у інверторі з ШІМ у режимі передачі енергії з ланки постійного струму до навантаження. Як видно,

миттєва вихідна напруга змінюється з частотою модуляції, набагато більшою за частоту вихідного струму. Середня за період модуляції T_m вихідна напруга $U_{(1)}$ (тобто перша гармоніка вихідної напруги) завдяки синусоїдальній зміні шпаруватості змінюється також синусоїдально. Середній за період модуляції вхідний струм позитивний, що означає споживання інвертором енергії з ланки постійного струму.

Для зміни амплітуди та частоти вихідної напруги змінюють амплітуду та частоту напруги керування u_k . Оскільки ключі інвертора виконують обидві функції: регулювання і рівня напруги, і її частоти, випрямляч може бути некерованим.

Оскільки шпаруватість змінюється за синусоїдальним законом, а частота перемикачів не залежить від частоти струму і визначається лише системою керування, такий спосіб керування називають синусоїдальною ШІМ на несучій частоті.

Зі збільшенням частоти модуляції форма вихідного струму також наближається до синусоїди. У сучасних АІН на *IGBT*-транзисторах ця частота лежить у межах від 2 до 20...30 кГц, що забезпечує практично ідеальну форму струму. Його фазовий зсув відносно напруги визначається співвідношенням активного та індуктивного опорів навантаження, а також величиною і фазою проти-ЕРС (якщо вона є). Миттєвий струм $i_{вх}$ на вході інвертора з двополярною модуляцією внаслідок почергового перемикачів діагоналей моста завжди має знакозмінний характер. На кожному з міжкомутаційних інтервалів цей струм дорівнює миттєвому вихідному струмові, однак із різним знаком залежно від того, яка з діагоналей моста працює. Знак вхідного струму (як миттєвого, так і середнього) несе інформацію про напрям передачі енергії між джерелом U_d та навантаженням АІН.

Особливості роботи АІН із ШІМ на проти-ЕРС багато в чому подібні до таких в АІН з амплітудною модуляцією. Звичайно, форма напруг та струмів буде визначатися способом модуляції.

Напрямок передачі енергії так само визначається фазою проти-ЕРС навантаження. Якщо проти-ЕРС за фазою випереджує середню вихідну напругу U , вихідний струм зсунутий відносно напруги на кут $\varphi_n > 90^\circ$, знаки миттєвих вихідних напруги та струму АІН переважно протилежні, інвертор рекупрує енергію до ланки постійного струму, причому знак середнього вхідного струму змінюється (рис. 11).

Співвідношення амплітуд керуючої та опорної напруги називають коефіцієнтом (індексом або глибиною) модуляції

$$\mu = \frac{U_{км}}{U_{опт}}$$

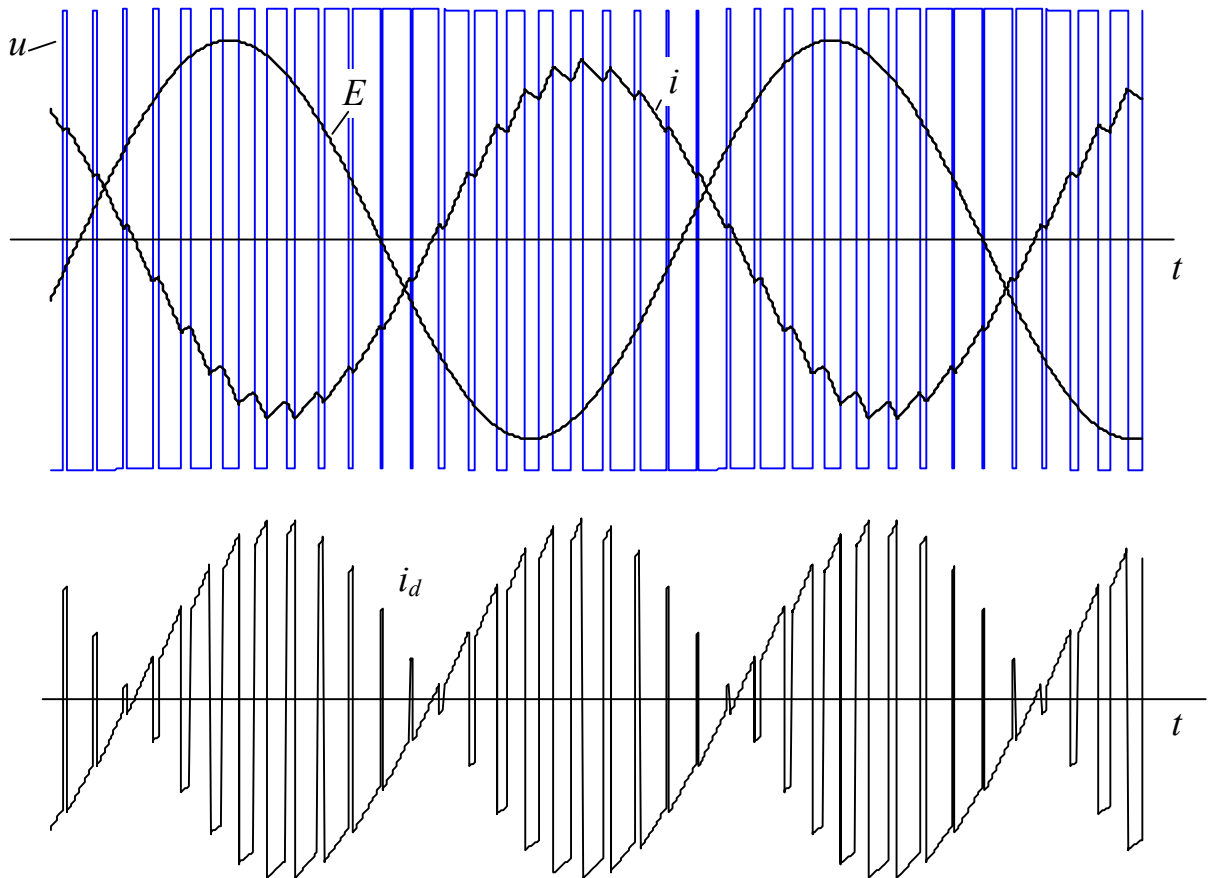


Рис. 11. Робота АІН із ШІМ у режимі рекуперації

Одночасно цей коефіцієнт відображає відношення амплітуди середньої за період модуляції напруги U_m до її максимально можливого значення

$$\mu = \frac{U_{m(1)}}{U_{mm}}$$

(для однофазного мостового АІН $U_{mm} = U_d$). Чим ближчий μ до одиниці, тим більшої вихідної напруги можна досягнути і тим повнішим буде використання інвертора за напругою.

4. МОДЕЛІ ІНВЕРТОРІВ

Робота виконується на математичних моделях інверторів. Моделі створено в середовищі *MATLAB/Simulink* із використанням моделей елементів силової електроніки тулбоксу *SimPowerSystem*. На відміну від традиційних моделей *Simulink*, які відносяться до класу структурних (інформаційних) моделей, моделі силових елементів є схемотехнічними. Зовнішній вигляд моделей *SimPowerSystem* схожий на графічне зображення електричних схем. У бібліотеці цього тулбоксу є моделі джерел живлення, резисторів, індуктивних елементів, конденсаторів, вимикачів, напівпровідникових ключів і навіть реалізованих на їх основі мостових схем, електричних машин, вимірювальних пристроїв та інших елементів. За допомогою ліній, шин та інших

з'єднувальних пристроїв із цих елементів складається модель електричної схеми.

Більшість силових елементів може з'єднуватися лише з елементами *SimPowerSystem*. Проте вимірювальні пристрої мають інформаційні виходи, а керувані силові елементи (деякі джерела, ключі, мостові перетворювачі) – керуючі входи, до яких можна приєднувати елементи *Simulink*. Завдяки цьому моделі силової схеми та системи керування об'єднуються у спільній моделі в середовищі *Simulink*.

На рис. 12 зображено модель інвертора з АМ із системою керування.

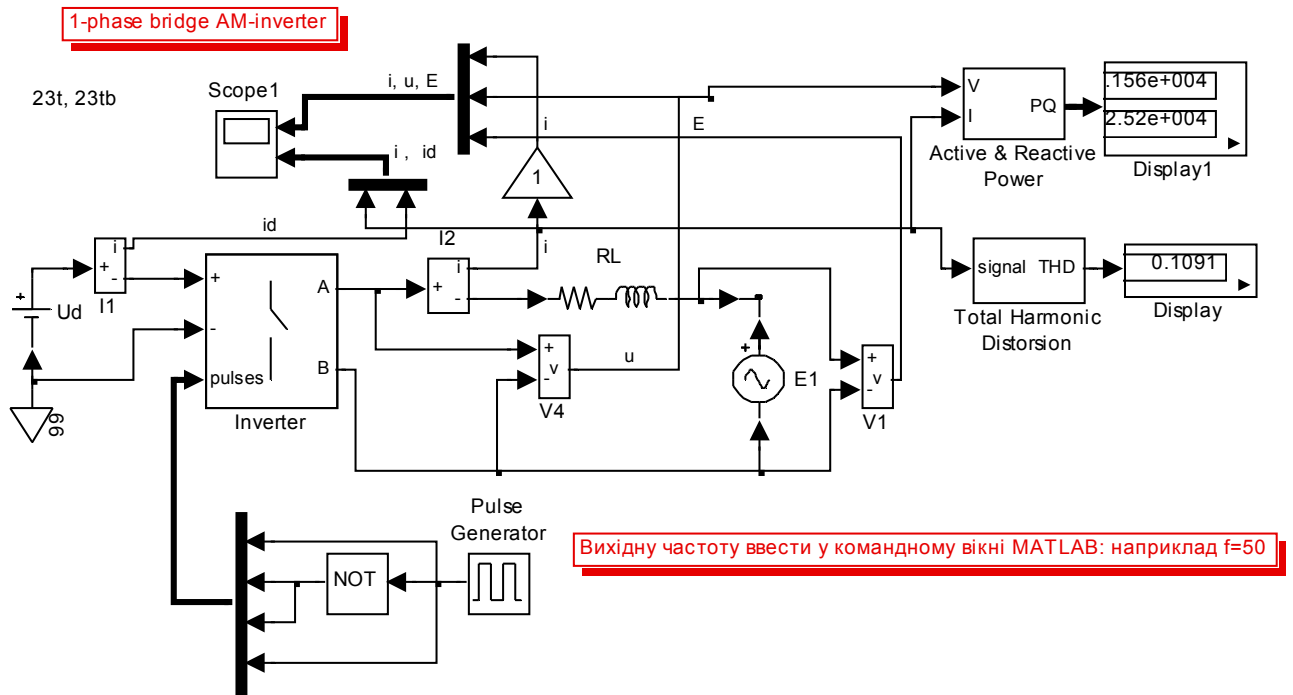


Рис. 12. Модель однофазного АІН з амплітудною модуляцією

Силова частина складається з джерела живлення (U_d), однофазного моста на ідеальних ключах (блок *Inverter*), RLE-навантаження (блоки *RL*, *E1*).

Вимірювачі струмів i_1 , i_2 вимірюють відповідно вхідний та вихідний струми інвертора, вимірювачі напруг u_4 та u_1 – вихідну напругу АІН та проти-ЕРС навантаження. До керуючого входу (*pulses*) інвертора подано сигнали від системи керування, яка реалізує симетричний закон керування з незмінною шпаруватістю 0,5. Блок *Total Harmonic Distorsion* визначає коефіцієнт гармонік

$$K_r = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_{(k)}^2}}{I_{(1)}},$$

де $I_{(k)}$ – діюче значення k -ої гармоніки вихідного струму; $I_{(1)}$ – діюче значення його першої гармоніки; k – номер гармоніки.

За допомогою блоку *Active & Reactive Power* розраховуються активна та реактивна потужності на виході інвертора. У моделі можна змінювати па-

параметри навантаження: *Inductance L* (індуктивність в Гн), *Resistance R* (активний опір в Ом), *Peak Amplitude* (амплітуда ЕРС в В), *Phase* (фаза ЕРС відносно напруги АІН в град.). Частоту вихідного струму АІН необхідно перед запуском моделі задавати з командного рядка головного вікна *MATLAB* шляхом надання змінній *f* потрібного значення (наприклад $f=50$). Ця змінна фігурує як параметр деяких блоків моделі (*E1*, *Pulse Generator*, *Total Harmonic Distorsion*, *Active & Reactive Power*).

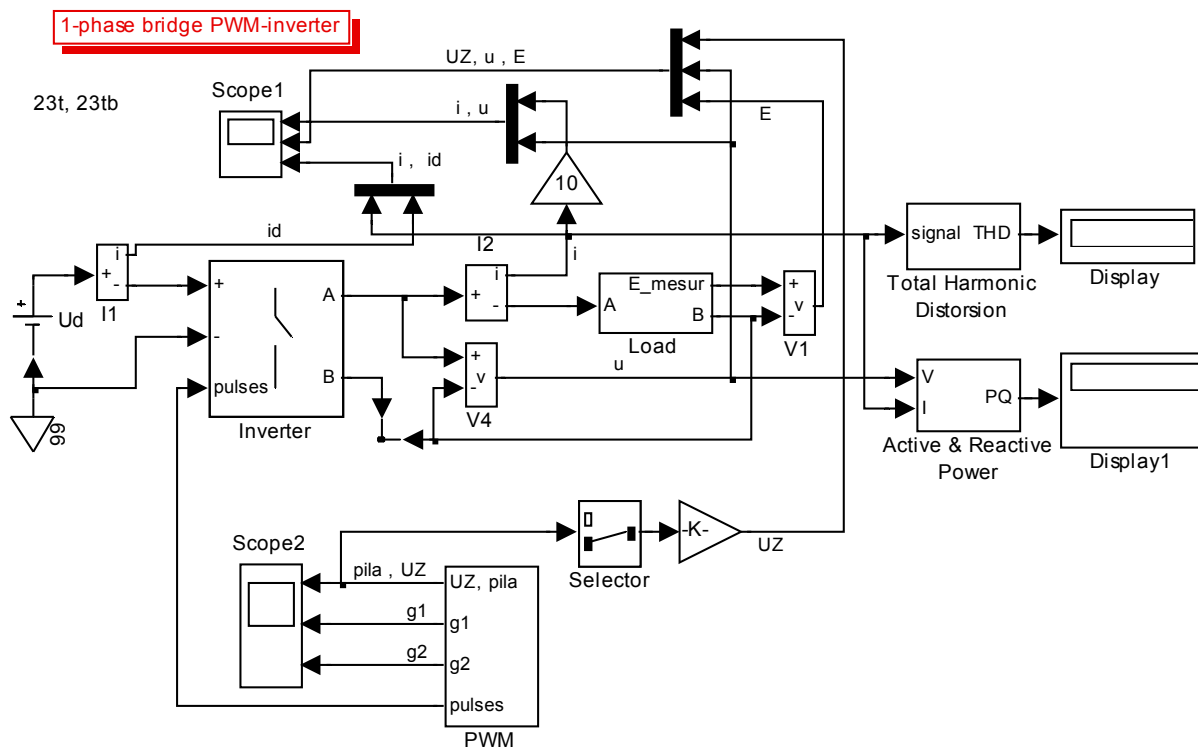


Рис. 13. Модель однофазного АІН з широтно-імпульсною модуляцією

Модель АІН із ШІМ (рис. 13) відрізняється наявністю блока *PWM*, який реалізує двополярну синусоїдальну ШІМ, та блоку *Load* (навантаження). На індикацію до осцилографа *Scope2* виведені сигнали *g1*, *g2* керування ключами *VS1* та *VS3* (рис. 1), трикутна опорна напруга (*pila*) та задавальна напруга *UZ*. Параметри навантаження шляхом зміни параметрів блоку *Load*. Частота першої гармоніки вихідного струму в даній моделі дорівнює 50 Гц, а її зміна не передбачена. Частоту модуляції (f_m , Hz) та амплітуду задавальної напруги (U_{km} , V) можна задати як параметри блоку *PWM* (слід мати на увазі, що амплітуда опорної напруги становить 10 В).

5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Дослідження АІН з амплітудною модуляцією (файл *srae8_at.mdl*)

1. Змінюючи частоту перемикання ключів (з командного рядка *MATLAB* у межах 10...50 Гц), а також активний опір та індуктивність навантаження (у межах 0,1...0,5 Ом та 1...5 мГн) за умови, що амплітуда проти-ЕРС навантаження дорівнює нулю, спостерігати їх вплив на форму та середнє значення вхідного та вихідного струмів інвертора, а також на тривалість

- провідного стану тиристорів та діодів. Записати значення коефіцієнту гармонік K_T вихідного струму для одного з режимів.
2. Змінюючи амплітуду проти-ЕРС від 0 до 100 В, а також її фази в межах $\pm 80^\circ$, спостерігати зміну форми струмів на вході та виході АІН, а також зміну напрямку передачі енергії за допомогою блоку *Active & Reactive Power*. Для отримання більш виразних результатів активний опір навантаження повинен дорівнювати 0,1 Ом, а його індуктивність 5 мГн.

Дослідження АІН з широтно-імпульсною модуляцією (файл *spae8_pwm.mdl*)

1. Змінюючи частоту модуляції та амплітуду задавальної напруги, дослідити їх вплив на форму вихідних напруги та струму. Зняти залежність коефіцієнту модуляції вихідного струму від частоти модуляції для одного з режимів та порівняти значення цього коефіцієнту зі значенням, отриманим для АІН з амплітудною модуляцією.
2. Увести до складу навантаження проти-ЕРС та дослідити вплив його амплітуди та фази на характер процесів в інверторі.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Чим мостовий інвертор відрізняється від мостового ж переривника постійної напруги?
2. Скільки разів за період вихідного струму відкривається кожен із тиристорів АІН з амплітудною модуляцією?
3. Хто довше відкритий за *RL*-навантаження: тиристори або діоди?
4. Що повинне змінитися в навантаженні АІН, щоб діоди були відкриті довше за тиристори?
5. Якому з законів керування АІН притаманний кращий гармонічний склад вихідного струму?
6. Чому дорівнює середній вхідний струм АІН із суто активним навантаженням?
7. Що й коли відбудеться в АІН, якщо один із ключів (наприклад, *VSI*) пробитий (тобто його опір дорівнює нулю)?
8. Як змінюють амплітуду вихідної напруги в АІН з амплітудною та широтно-імпульсною модуляцією?
9. Як визначити напрямок передачі енергії між джерелом живлення та інвертором на будь-якому міжкомутаційному інтервалі?
10. Як виходячи зі знаків поточних миттєвих вихідних струму та напруги визначити, хто відкритий: тиристори або діоди?
11. Як збільшення індуктивності навантаження впливає на амплітуду та фазу вихідного струму?
12. Як збільшення частоти перемикавання ключів впливає на амплітуду вихідного струму?
13. До яких наслідків призводить несинусоїдальність вихідного струму АІН?
14. В якому напрямку передається через інвертор енергія, якщо середній вхідний струм негативний?

15. В якому режимі працює електричний двигун, підключений до виходу АІН, якщо ЕРС двигуна відстає від напруги інвертора?
16. Який знак має середній вхідний струм АІН у цьому режимі?
17. В якому випадку тривалість роботи тиристорів найменша: якщо електрична машина працює в рушійному, рекуперативному режимі або в режимі ідеального холостого ходу?
18. Які з перелічених нижче параметрів не впливають на похідну вихідного струму одразу після закривання наступної пари тиристорів:
 - напруга ланки постійного струму;
 - частота перемикачів;
 - індуктивність навантаження;
 - вихідний струм на момент закривання тиристорів;
 - активний опір навантаження?
19. Які з цих параметрів впливають на похідну струм найбільш сильно?
20. Яка з вищих гармонік вихідного струму АІН з АМ має найбільшу амплітуду?
21. Якого значення зрештою сягнув би вихідний струм АІН, якби чергова пара тиристорів не закрилася?
22. З якою метою використовують ШІМ замість АМ?
23. Як змінюється шпаруватість вихідної напруги за широтно-імпульсною модуляцією?
24. Чи може бути частота модуляції меншою за частоту першої гармоніки вихідного струму?
25. Як змінюється коефіцієнт гармонік вихідного струму АІН із ШІМ зі зменшенням коефіцієнту модуляції?
26. Як змінюється коефіцієнт гармонік вихідного струму АІН із ШІМ зі збільшенням частоти модуляції?
27. Як змінюється коефіцієнт гармонік вихідного струму АІН із ШІМ зі зменшенням основної частоти?
28. В АІН були відкриті ключі $VS1$, $VS4$. Потім обидва закрилися. Як одразу після цього:
 - а) протікатиме вихідний струм;
 - б) зміниться вихідна напруга;
 - в) у який бік передаватиметься енергія між АІН, навантаженням та джерелом постійного струму?
29. Теж саме – після закриття лише $VS4$.
30. Як змінюється амплітуда вищих гармонік вихідного струму АІН:
 - а) зі збільшенням частоти модуляції;
 - б) зі збільшенням індуктивності навантаження?
31. Як змінюється шпаруватість роботи ключів $VS1$, $VS4$ однофазного інвертора з ШІМ, коли амплітуда задавальної напруги наближається до свого максимально можливого позитивного значення?
32. Чому дорівнює максимально можлива амплітуда першої гармоніки вихідної напруги в однофазному інверторі з ШІМ?

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. Тиристорные преобразователи частоты в электроприводе / А.Я.Бернштейн, Ю.М.Гусяцкий, А.В.Кудрявцев, Р.С. Сарбатов; Под ред. Р.С. Сарбатова. – М.: Энергия, 1980. – 328 с.
4. Казачковський М. М. Автономні перетворювачі та перетворювачі частоти: навч. посіб. [Електронний ресурс] / М. М. Казачковський; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Електрон. текст. дані. – 2-ге вид., випр. та допов. – Дніпро.: НГУ, 2017. – 324 с. (режим доступу: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/150764?show=full>).
5. Силовые полупроводниковые устройства для управления двигателями переменного тока: Учебный модуль для студентов ВУЗов специальности 141 «Электроэнергетика, электротехника и электромеханика» (специализация «Электромеханические системы автоматизации и электропривод»). Теоретическая часть / [Електронний ресурс] Н.Н. Казачковський. Шнейдер Электрик, 2017. – 193 с. (Режим доступу: http://elprivod.nmu.org.ua/files/converters/%D0%9C%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BB%D1%8C%D0%A8%D0%AD_17.pdf)

Лабораторна робота СПАЕ-9
**"Дослідження перетворювача частоти
з трифазним автономним інвертором струму"**

1. МЕТА РОБОТИ

Вивчити принцип дії, особливості електромагнітних процесів та статичних характеристик перетворювача частоти з трифазним автономним інвертором струму комплектного електропривода ЭУАТ.

2. ПРОГРАМА РОБОТИ

- 2.1. Вивчити принцип дії джерела струму на основі індуктивно-ємнісного перетворювача.
- 2.2. Вивчити принцип перетворення автономним інвертором струму (АІС) однополярного вхідного струму на трифазну систему знакозмінних струмів.
- 2.3. Вивчити принцип міжфазної штучної комутації тиристорів АІС.
- 2.4. Дослідити зовнішні та регульовальні характеристики ІЄП та АІС.
- 2.5. Дослідити форму миттєвих струмів та напруг на вході та виході АІС.

3. ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Перетворювач частоти комплектного електропривода ЭУАТ складається (рис. 1) із параметричного джерела струму на базі індуктивно-ємнісного перетворювача (ІЄП), некерованого випрямляча на діодах $VD7...VD12$, дроселя L та автономного інвертора струму (АІС). Перетворювач частоти перетворює електричну енергію живильної мережі з незмінним рівнем частоти та напруги на електричну енергію з регульованими напругою та частотою з метою регулювання швидкості асинхронного двигуна.

3.1. Індуктивно-ємнісний перетворювач

ІЄП є параметричним джерелом струму і складається з конденсаторів $C7...C9$ та дроселів $L7...L9$. Принцип дії ІЄП базується на явищі резонансу напруг. Розглянемо роботу ІЄП на прикладі однієї фази (рис.2).

Комплекс вхідного струму ІЄП

$$\dot{I}_{\text{вх}} = \frac{\dot{U}_{\text{вх}}}{Z_{\text{вх}} + \frac{Z_{\text{вих}} Z_0}{Z_{\text{вих}} + Z_0}},$$

де $Z_{\text{вих}}$ – опір навантаження ІЄП; $Z_0 = j\omega L_0$; $Z_{\text{вх}} = 1/j\omega C_{\text{вх}}$ (активним опором дроселя нехтуємо).

Комплекс вихідного струму ІЄП

$$\dot{I}_{\text{вих}} = \frac{\dot{U}_{\text{вих}}}{Z_{\text{вих}}} = \frac{\dot{U}_{\text{вх}} - \dot{I}_{\text{вх}} Z_{\text{вх}}}{Z_{\text{вих}}} = \frac{\dot{U}_{\text{вх}}}{Z_{\text{вих}}} \cdot \frac{1}{\frac{Z_{\text{вих}}}{Z_0} \left(\frac{Z_0}{Z_{\text{вих}}} + 1 \right) + 1}. \quad (1)$$

Якщо реактивні опори дроселя та конденсатора дорівнюють один одному

$$\omega L_0 = 1/\omega C_{\text{BX}}, \quad (2)$$

виникає резонанс напруг, а співвідношення цих опорів $\frac{Z_0}{Z_{\text{BX}}} = \frac{j\omega L_0}{1/j\omega C_{\text{BX}}} = -1$.

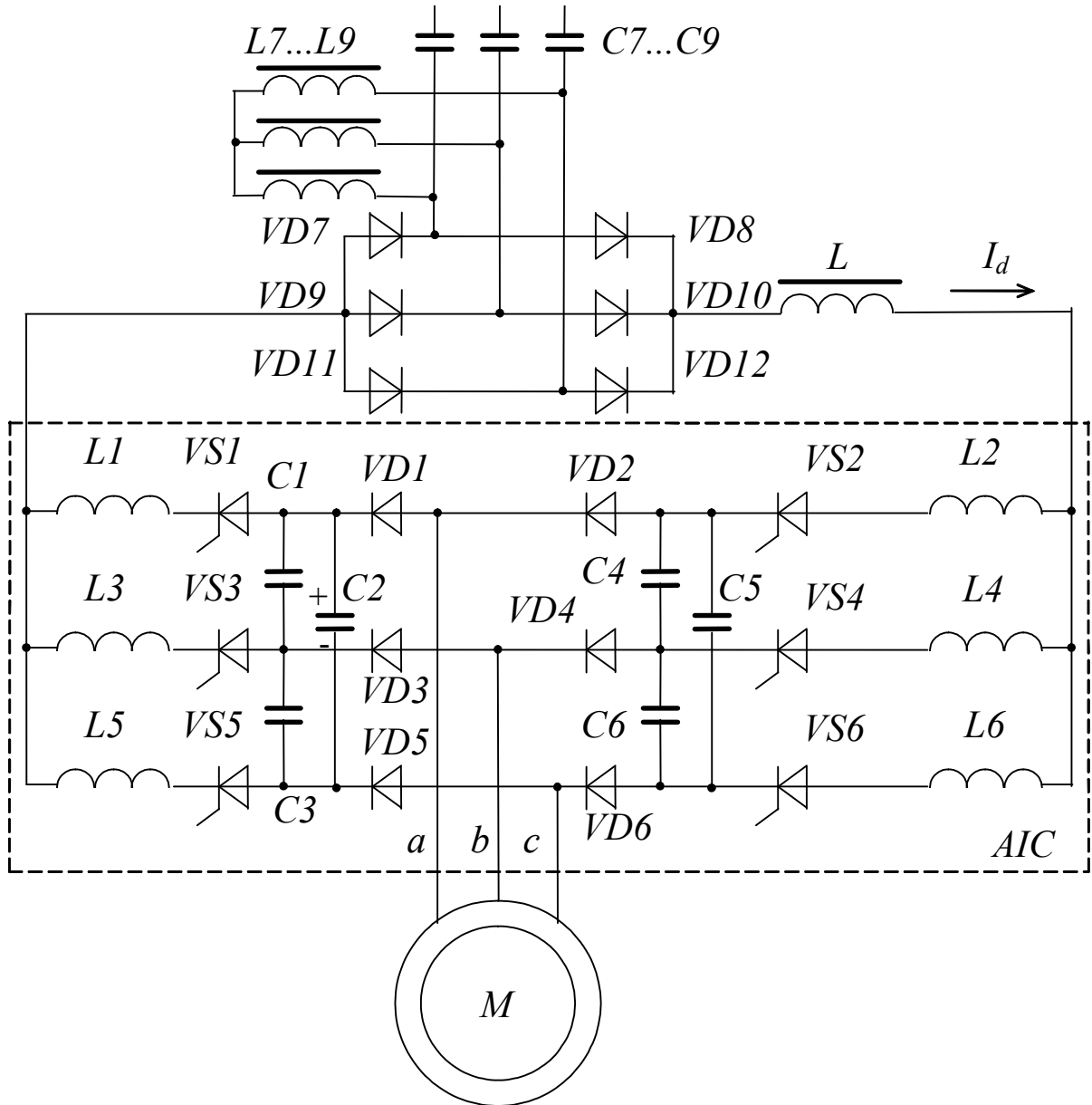


Рис.1 Схема силових кіл перетворювача частоти з автономним інвертором струму

З урахуванням цього вираз (1) отримує вигляд

$$\dot{I}_{\text{вих}} = \frac{\dot{U}_{\text{BX}}}{Z_{\text{BX}}} = \frac{\dot{U}_{\text{BX}}}{1/j\omega C_{\text{BX}}}. \quad (3)$$

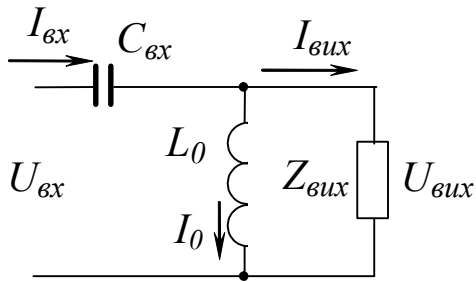


Рис.2 Схема однофазного ІЄП

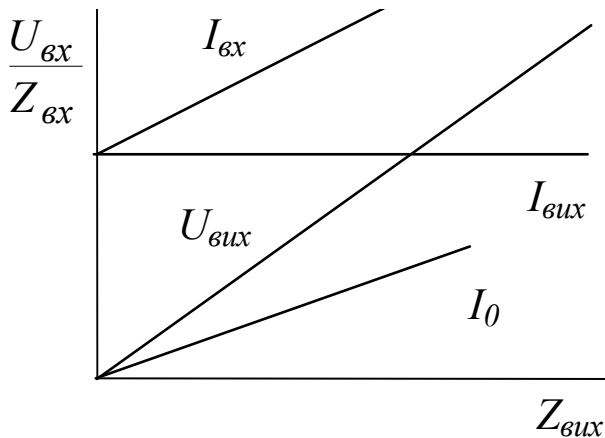


Рис.3 Струми та напруга ІЄП як функції опору навантаження

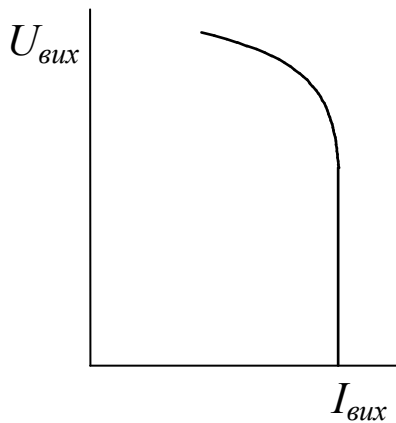


Рис.4 Зовнішня характеристика ІЄП

Таким чином, вихідний струм ІЄП визначається лише його вхідною напругою та ємністю конденсаторів і не залежить від параметрів тих споживачів, які живляться від ІЄП. Для споживачів ІЄП є джерелом незмінного за амплітудою синусоїдного струму. Стабілізація вихідного струму можлива завдяки зростанню вихідної напруги зі збільшенням опору навантаження:

$$\dot{U}_{\text{вих}} = \dot{I}_{\text{вих}} Z_{\text{вих}}.$$

Залежність модулів струмів та напруг ІЄП від опору навантаження зображена на рис.3.

Завдяки незалежності вихідного струму від опору навантаження ІЄП його зовнішня характеристика (рис.4) за досить малих опорів навантаження вертикальна і наближена до характеристики ідеального джерела струму. Але зі збільшенням опору навантаження струм I_0 через дросель зростає настільки (див. рис.3), що останній насичується, зменшується його індуктивність, умова (2) порушується, і ІЄП втрачає властивості джерела струму. Його зовнішня характеристика викривлюється, наближаючись до характеристики джерела напруги (верхня частина рис.4).

Це явище використовується в електроприводі ЭУАТ для того, щоб у режимах пуску та перевантаження (коли ковзання асинхронного двигуна велике, а його зведений до обмотки статора опір малий) здійснювалася стабілізація струму статора з метою його обмеження, а в нормальних режимах (коли ІЄП є джерелом напруги), стабілізувалася напруга, підведена до обмотки статора.

Випрямляч на діодах $VD7...VD12$ перетворює трифазний синусоїдний струм ІЄП на однополярний струм, який живить АІС. Дросель L згладжує коливання випрямленого струму, ще більше наближаючи властивості ІЄП до властивостей ідеального джерела струму.

3.2. Автономний інвертор струму

АІС призначений для перетворення однополярного струму випрямляча на трифазний знакозмінний струм живлення обмотки статора асинхронного двигуна M . Він складається з шести тиристорів $VS1...VS6$, шести відсікальних діодів $VD1...VD6$, комутуючих дроселів $L1...L6$ та конденсаторів $C1...C6$.

На рис.5 зображені діаграма роботи тиристорів та фазні струми на виході інвертора.

У будь-який момент часу відкрито два тиристиори: один – із катодної групи ($VS1, VS3, VS5$), інший – із анодної ($VS2, VS4, VS6$). Завдяки цьому до джерела струму завжди підключені дві фазні обмотки статора асинхронного двигуна. Діаграми роботи тиристорів періодично повторюються з періодом T . Тривалість відкритого стану кожного тиристора дорівнює $T/3$. Шість разів за період відбувається чергова комутація тиристорів.

На рис.6 наведені схеми, які утворюються за різних сполучень відкритих тиристорів. Римськими цифрами на рис.5 та 6 позначені відповідні між комутаційні інтервали. Завдяки зсуву діаграм перемикання тиристорів різних фаз (наприклад, $VS1$ та $VS3$) на одну третину періоду фазні струми інвертора також зсунуті один відносно одного на третину періоду. Частота зміни фазного струму $\omega = \frac{2\pi}{T}$. Утворена трифазна система струмів забезпечує обертання поля статора двигуна з тією ж частотою. Для зміни вихідної частоти

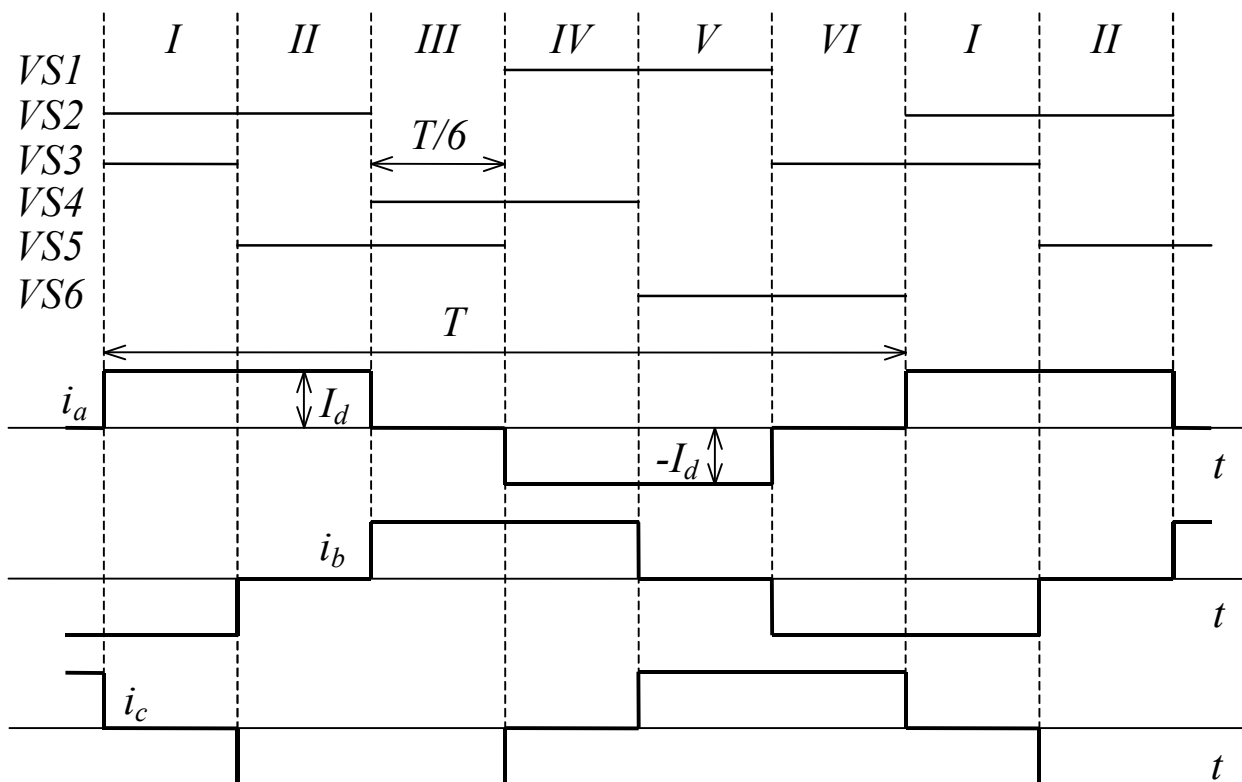


Рис.5 Діаграми роботи тиристорів та вихідні струми інвертора

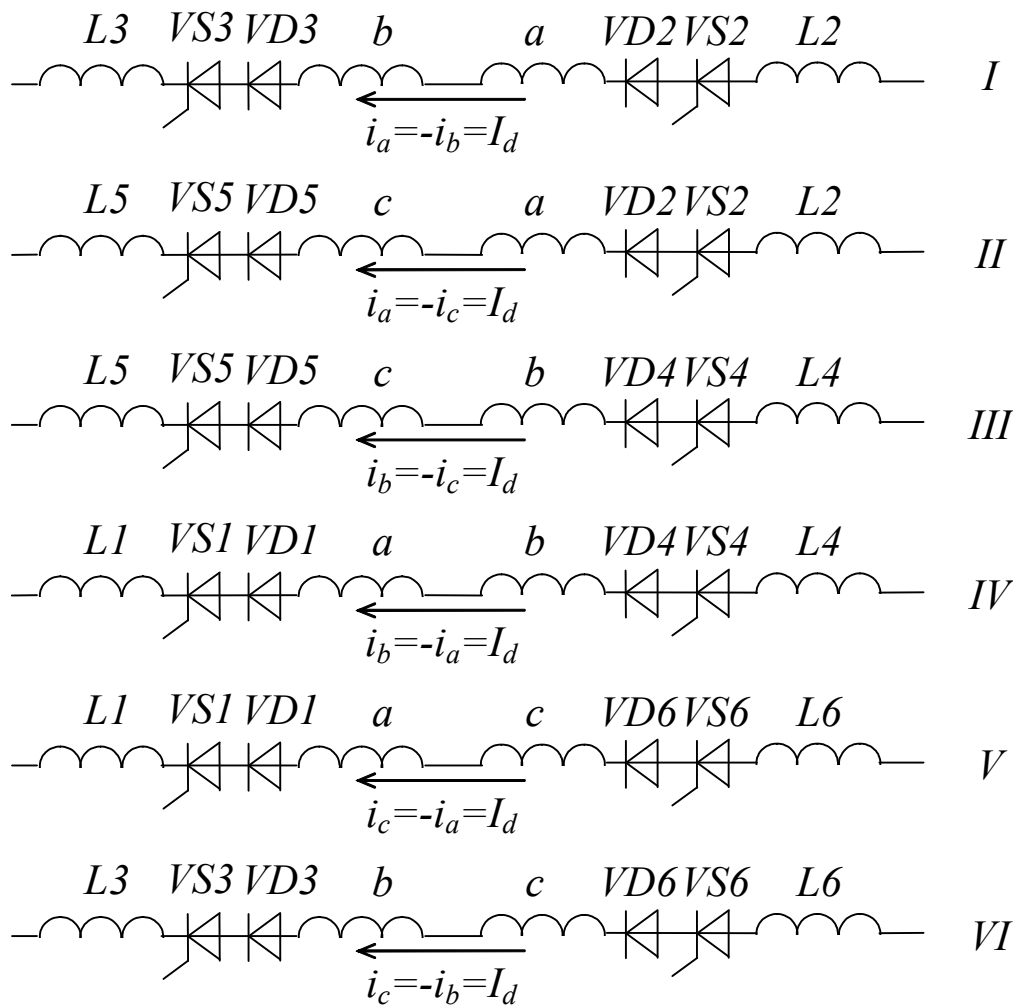


Рис.6 Схеми з'єднання навантаження для різних станів інвертора

АІС треба змінити частоту перемикання тиристорів, не змінюючи послідовності їх перемикання. Зміна порядку чергування фаз та реверс двигуна забезпечується шляхом зміни діаграми перемикання будь-яких двох фаз (наприклад, тиристири фази A перемикаються за алгоритмом фази B і навпаки).

Для закривання тиристорів у схемі рис.1 використовується міжфазна штучна комутація. Розглянемо для прикладу процес закриття тиристора $VS5$.

Він починається тоді, коли наступний тиристор ($VS1$) отримує керуючий імпульс (початок інтервалу часу IV на рис.5). На одному з попередніх інтервалів (див. інтервал II на рис.5) конденсатор $C2$ був заряджений із полярністю, вказаною на рис.1 (коло заряду: «+» випрямляча – $L2$ – $VS2$ – $VD2$ – $VD1$ – $C2$ – $VS5$ – $L5$ – «-» випрямляча). Струм навантаження на момент початку комутації тече через $L4$, $VS4$, $VD4$, фази b та c статора, $VD5$, $VS5$, $L5$. Діод $VD1$ закритий позитивним потенціалом на катоді з конденсатора $C2$.

Як тільки тиристор $VS1$ отримує керуючий імпульс, він відкривається, а конденсатор розряджається колом « $C2$ – $VS1$ – $L1$ – $L5$ – $VS5$ – $C2$ ». Струм через тиристор $VS5$ знижується, а через $VS1$ – зростає. Дроселі $L1$ та $L5$ обмежують темп зміни струму, захищаючи тиристири від надмірних перенапружень. Як тільки струм розряду конденсатора досягає струму навантаження, сумарний струм через тиристор $VS5$ знижується до нуля і він закривається

(момент часу t_1 на рис.7). Струм навантаження цілком переходить на тиристор $VS1$. Конденсатор $C2$ перезаряджається колом «джерело струму – $L4$ – $VS4$ – $VD4$ – фази b та c статора – $VD5$ – $C2$ – $VS1$ – $L1$ – джерело струму». Напруга на конденсаторі змінюється лінійно, оскільки струм перезаряду незмінний. Коли напруга на конденсаторі змінює знак і досягає лінійної проти-ЕРС статора $e_{ac} = e_a - e_c$ (момент t_2 на рис.7), закінчується перший етап комутації і розпочинається другий.

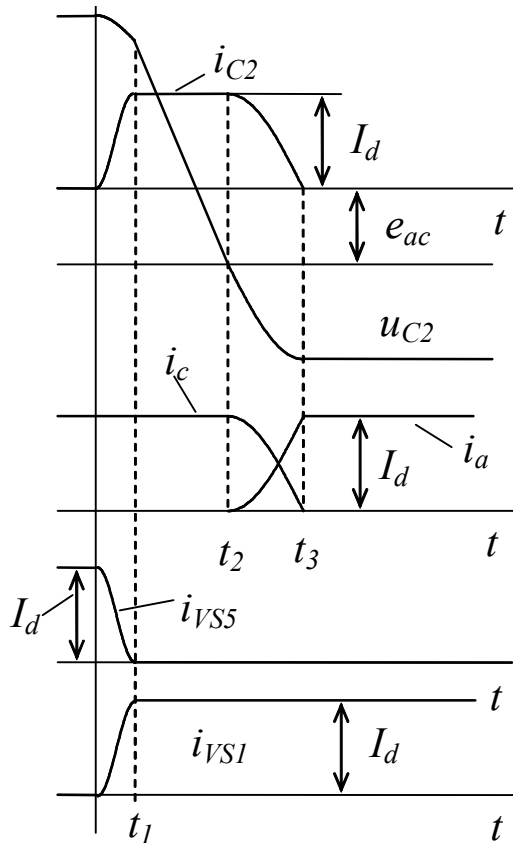


Рис.7 Процес штучної комутації

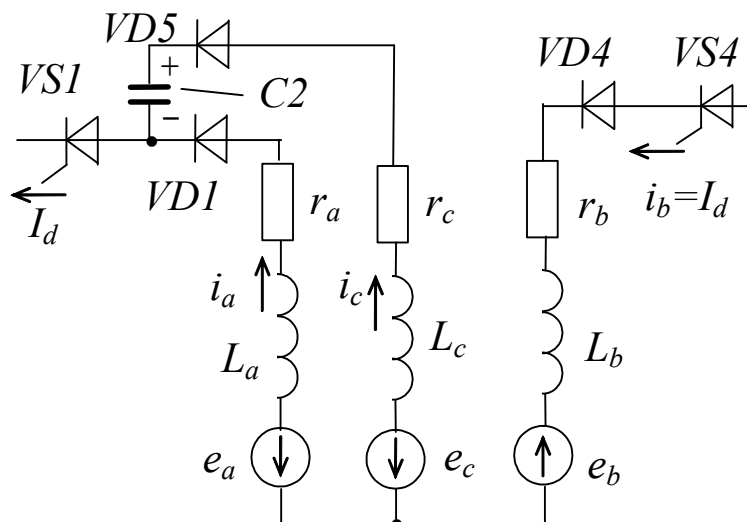


Рис.8 Схема дозаряду конденсатора

Відкривається діод $VD1$ і утворюється контур дозаряду конденсатора електромагнітною енергією, накопиченою в індуктивності фази C . До цього контуру входять, окрім конденсатора і діодів $VD1$ та $VD5$, фази C та A статора двигуна (див. рис.8). Процес дозаряду – коливний, оскільки в контурі є і індуктивні, і ємнісні елементи.

Струм фази C у процесі дозаряду зменшується, оскільки проти-ЕРС фази та напруга конденсатора ввімкнені назустріч йому. Струм фази A , навпаки, збільшується таким чином, щоб їх сума дорівнювала струму фази B та вхідному струму АІС ($i_a + i_c = i_b = I_d$). Коли вся електромагнітна енергія фази C переходить до конденсатора (момент t_3 на рис.7), дозаряд закінчується, струм у фазі C зникає, діод $VD5$ закривається, а вхідний струм АІС весь переходить з фази C у фазу A . На міжкомутаційному інтервалі відсікальні діоди

запобігають розряду комутуючих конденсаторів через навантаження.

У схемі рис.1 природнім шляхом здійснюється стабілізація співвідношення вихідних напруги та частоти U/f , необхідна для покращення регульовальних властивостей асинхронного двигуна. Зі збільшенням частоти збільшується індуктивний опір двигуна, що призводить до зростання вихід-

ної напруги ІЄП (див. рис.3) і АІС.

4. ОПИС ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ

Схема лабораторної установки зображена на рис.9.

Окрім елементів, які входять до складу комплектного електропривода ЭУАТ, на ній наведені навантажувальна машина постійного струму $M2$, вимірювальні прилади та комутаційна апаратура. Шунти Ш1...Ш4 та гнізда Гн1, Гн2, Гн9...Гн12, Гн16, Гн17 призначені для осцилографування струмів, інші гнізда – для осцилографування напруг на різних елементах схеми. За допомогою потенціометра $R3$ задається вихідна частота АІС. Потенціометр $R2$ призначений для регулювання моменту навантажувальної машини (більшому струму збудження відповідає більший момент).

5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

- 5.1. Вмикання лабораторної установки:
 - 5.1.1. Підготувати електропривод до вмикання, перевівши задавач частоти (резистор $R3$) до крайнього лівого положення.
 - 5.1.2. Подати живлення до силової частини електропривода, ввімкнувши автоматичний вимикач АВ1 та натиснувши кнопку «Пуск».
- 5.2. Зняття регулювальних характеристик:
 - 5.2.1. Збільшуючи задавальну напругу АІС за допомогою резистора $R3$, зняти залежність вихідних напруг ІЄП та АІС від задавальної напруги керування за максимального моменту навантажувальної машини.
Результати занести до табл.1.
 - 5.2.2. Зменшивши струм збудження навантажувальної машини до мінімуму, повторити вимірювання п.5.2.1.
- 5.3. Зняття зовнішніх характеристик:
 - 5.3.1. Встановивши за допомогою резистора $R3$ потрібну задавальну напругу, зняти залежності вихідної напруги ІЄП від його вихідного струму та вихідної напруги АІС від його вихідного струму, змінюючи струм збудження навантажувальної машини. Результати вимірювань занести до табл.2.
 - 5.3.2. Встановивши нову задавальну напругу, повторити вимірювання п.5.3.1.
- 5.4. Осцилографування напруг та струмів:

Змінюючи задавальну напругу та момент навантажувальної машини, зняти зразки осцилограм вхідного струму АІС (Гн1...Гн2), вхідної напруги (Гн3...Гн4), вихідного струму (Гн16...Гн17) та вихідних напруг (Гн5...Гн7). Звернути увагу на зміну частоти, рівня та форми вимірюваних величин.

 - 5.4.1. Вимкнути вимикач АВ1.

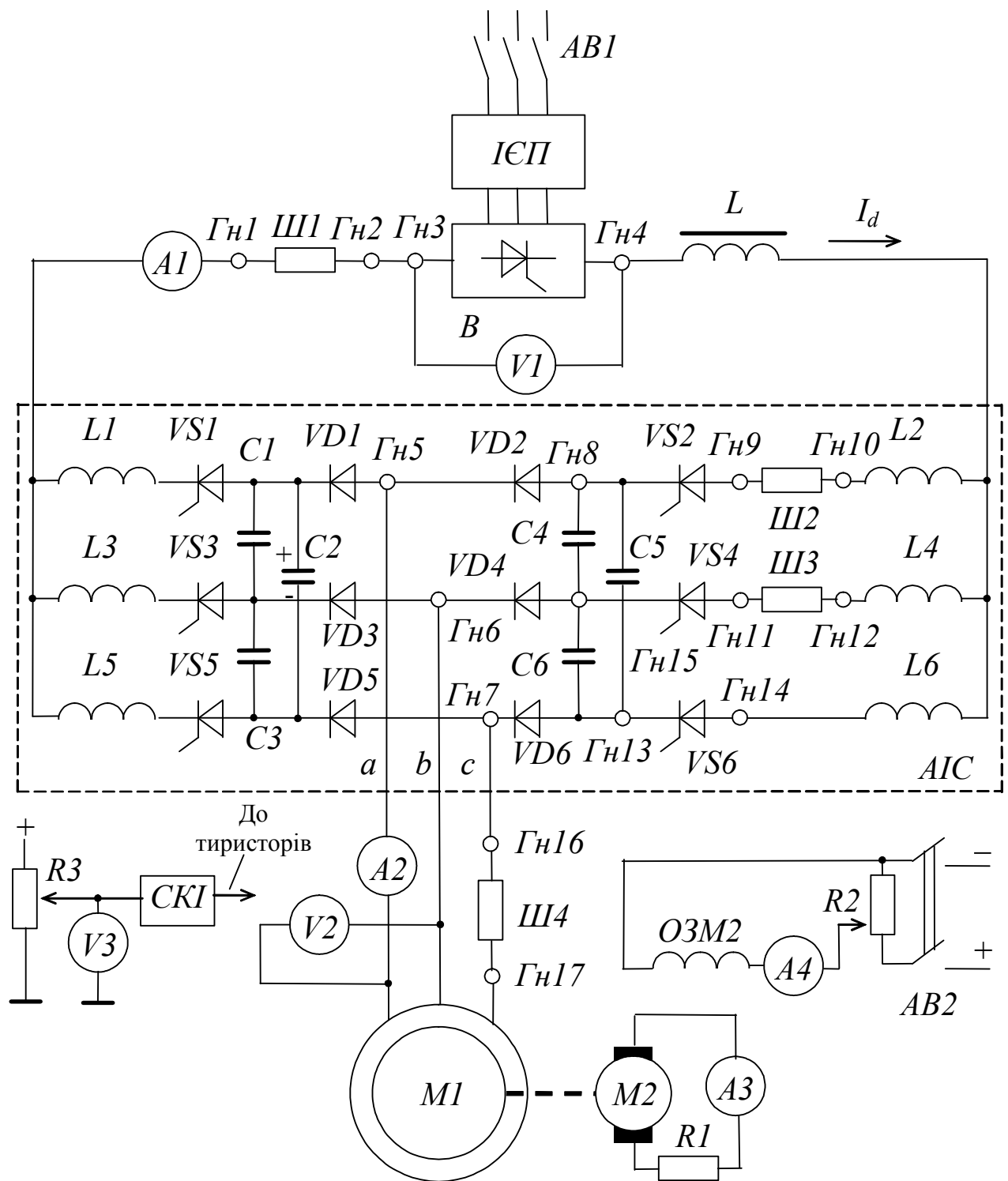


Рис.9 Схема лабораторної установки

Таблиця 1

$I_{зб} =$...мА	U_k							
	U_d							
	U_{AIC}							
$I_{зб} =$...мА	U_k							
	U_d							
	U_{AIC}							

$U_k =$ B	U_d							
	I_d							
	U_{AIC}							
	I_{AIC}							
$U_k =$ B	U_d							
	I_d							
	U_{AIC}							
	I_{AIC}							

6. ЗМІСТ ЗВІТУ

- Номер, назва та програма роботи.
- Схема лабораторної установки.
- Таблиці 1 та 2 з результатами експериментів.
- Зовнішні характеристики ІЄП $U_d = f(I_d)$ та АІС $U_{\text{вих}} = f(I_{\text{вих}})$.
- Регульовальні характеристики АІС $U_{\text{вих}} = f(U_k)$ та $U_d = f(U_k)$.
- Зразки осцилограм вхідного та вихідного струмів АІС, а також напруг на його вході та виході.

7. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Намалюйте схему однофазного ІЄП.
2. Як виглядає зовнішня характеристика ІЄП?
3. Яка умова незалежності вихідного струму ІЄП від опору навантаження?
4. Призначення конденсаторів, діодів, дроселів, які входять до складу АІС.
5. Накресліть ідеалізовану часову діаграму вихідних струмів АІС.
6. З яким запізненням відкривається тиристор $VS3$ відносно тиристора $VS1$?
7. Яку частину періоду вихідного струму АІС відкритий кожний тиристор?
8. Скільки тиристорів одночасно відкрито на міжкомутаційному інтервалі?
9. Як змінити вихідну частоту АІС?
10. Як змінити порядок чергування фаз АІС?
11. Скільки разів за період вихідного струму відбувається комутація тиристорів АІС?
12. Скільки фаз навантаження одночасно підключено до джерела струму на міжкомутаційному інтервалі?
13. Покажіть шлях протікання струму через АІС та навантаження на одному з міжкомутаційних інтервалів.
14. Чому зі зростанням вихідної частоти збільшується і вихідна напруга АІС?
15. Яка умова відкриття відсікального діода під час штучної комутації тиристора?
16. Покажіть контури розряду, перезаряду та дозаряду комутуючого конденсатора $C1$ у процесі штучної комутації.

17. Чому напруга на конденсаторі під час його перезаряду змінюється лінійно в функції часу?
18. З якою полярністю заряджений конденсатор $C1$ перед закриттям тиристора $VS1$?
19. З якою полярністю заряджений конденсатор $C1$ перед закриттям тиристора $VS3$?
20. Що потрібно зробити в лабораторній установці для збільшення моменту навантажувальної машини?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Казачковський М. М. Автономні перетворювачі та перетворювачі частоти: навч. посіб. [Електронний ресурс] / М. М. Казачковський; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Електрон. текст. дані. – 2-ге вид., випр. та допов. – Дніпро.: НГУ, 2017. – 324 с. (режим доступу: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/150764?show=full>).
2. Силовые полупроводниковые устройства для управления двигателями переменного тока: Учебный модуль для студентов ВУЗов специальности 141 «Электроэнергетика, электротехника и электромеханика» (специализация «Электромеханические системы автоматизации и электропривод»). Теоретическая часть / [Електронний ресурс] Н.Н. Казачковский. Шнейдер Электрик, 2017. – 193 с. (Режим доступу: http://elprivod.nmu.org.ua/files/converters/%D0%9C%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BB%D1%8C%D0%A8%D0%AD_17.pdf)
3. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Преобразовательная техника. – К.: Вища школа, 1983. – 431 с.
4. Толстов Ю.Г. Автономные инверторы тока. – М.: Энергия, 1978. – 208 с.
5. Тиристорные преобразователи частоты в электроприводе/ А.Я.Бернштейн, Ю.М.Гусяцкий, А.В.Кудрявцев, Р.С.Сарбатов; Под ред. Р.С.Сарбатова. – М.: Энергия, 1980. – 328 с.

Лабораторна робота СПАЕ-10
“Дослідження трифазних автономних інверторів напруги”

1. МЕТА РОБОТИ

Вивчити принцип дії та особливості електромагнітних перехідних процесів у трифазному мостовому автономному інверторі напруги (АІН) з амплітудною (АМ) та широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ).

2. ПРОГРАМА РОБОТИ

3. АІН з амплітудною модуляцією:
 - 3.1. Вивчити принцип дії та шляхи протікання струмів у трифазному АІН з амплітудною модуляцією.
 - 3.2. Дослідити вплив частоти перемикавання ключів, індуктивності та активного опору навантаження на форму та середнє значення струмів на вході та на виході АІН з АМ за активно-індуктивного навантаження.
 - 3.3. Дослідити вплив амплітуди та фази проти-ЕРС на форму струмів на вході та на виході АІН, а також на тривалість відкритого стану тиристорів та діодів за *RLE*-навантаження.
 - 3.4. Вивчити характер обміну енергією поміж колом випрямленого струму та навантаженням через АІН у режимах інвертора та активного випрямляча.
4. АІН з широтно-імпульсною модуляцією:
 - 4.1. Дослідити вплив частоти модуляції на форму вихідних напруги та струму та порівняти їх із такими для амплітудної модуляції. Дослідити залежність коефіцієнту гармонік вихідного струму від частоти модуляції.
 - 4.2. Дослідити характер процесів в АІН з *RLE*-навантаженням у режимах інвертора та активного випрямляча (рекуперації).

3. ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

3.1. Інвертор з амплітудною модуляцією

Схема трифазного АІН наведена на рис. 1, процеси в ньому – на рис. 2, можливі схеми з'єднання фаз навантаження – на рис. 3.

Оскільки кожний з ключів має два можливих стани (закрито та відкрито), кожна з миттєвих фазних напруг АІН може мати 5 рівнів (рис. 2):

- 0 – усі три фази з'єднані з одним полюсом джерела живлення (відкриті три ключі з парними або три з непарними номерами);

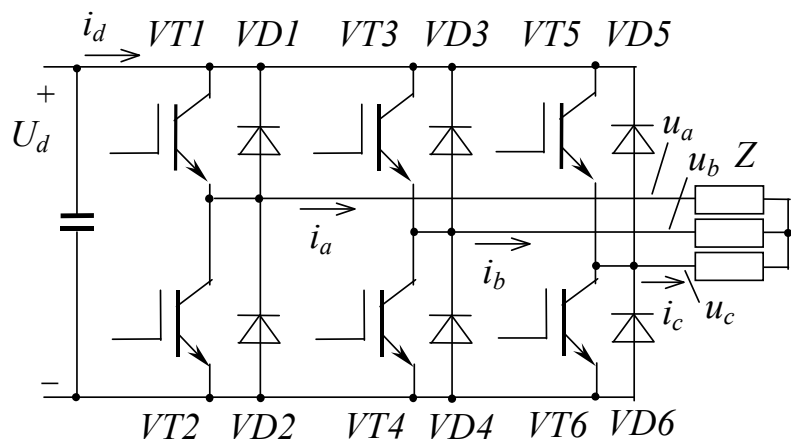


Рис. 1. Схема трифазного АІН

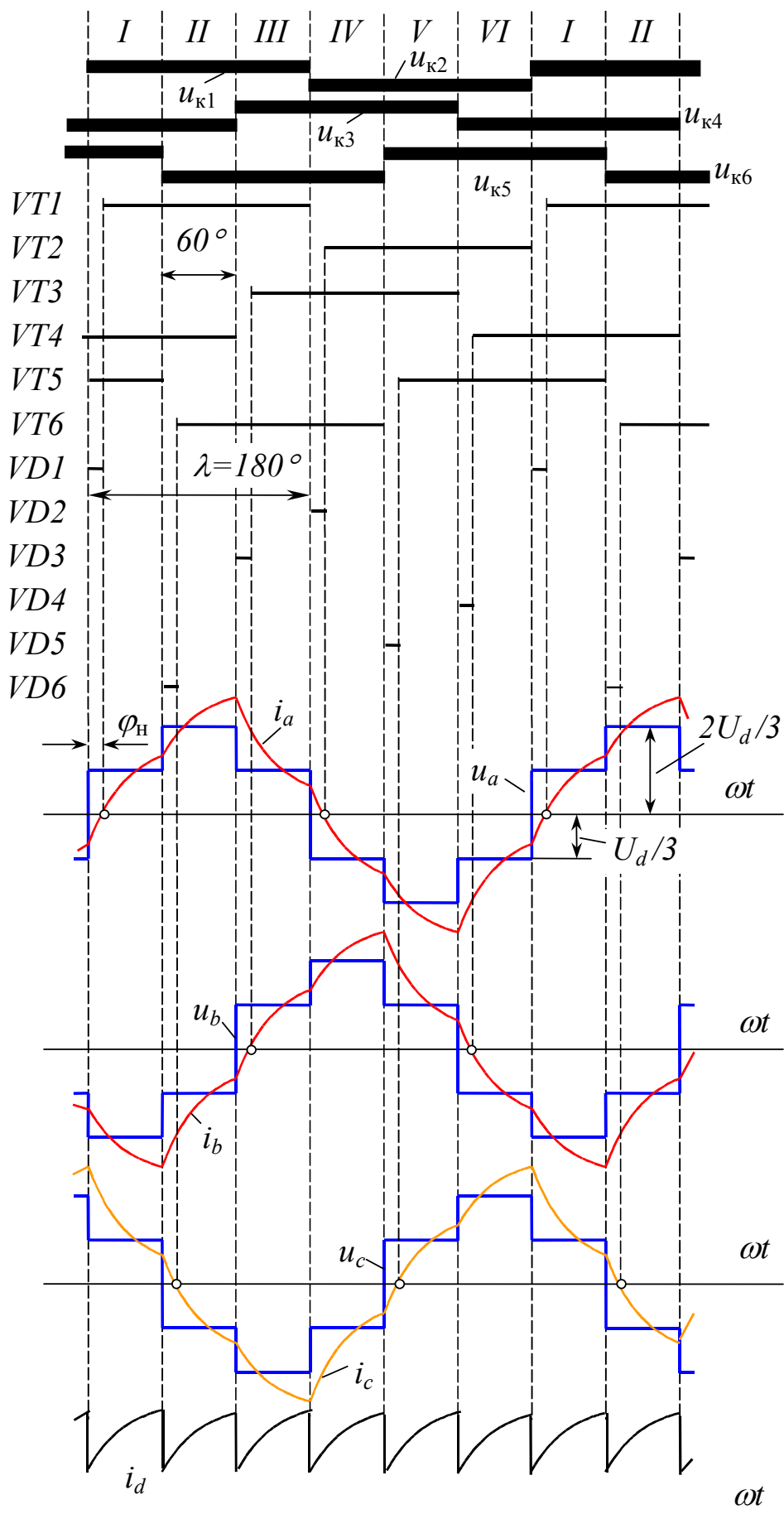


Рис. 2. Процеси в АІН з АМ (переважно активне навантаження)

- $\pm U_d/3$ – дана фаза паралельно з однією з інших підключена до одного з полюсів джерела (наприклад, фаза A з фазою B після відкриття ключів $VT1, VT3, VT6$);
- $\pm(2/3)U_d$ – поточна фаза приєднана до одного полюса джерела U_d , а дві інші – до другого (наприклад, фаза A після відкриття ключів $VT1, VT4, VT6$).

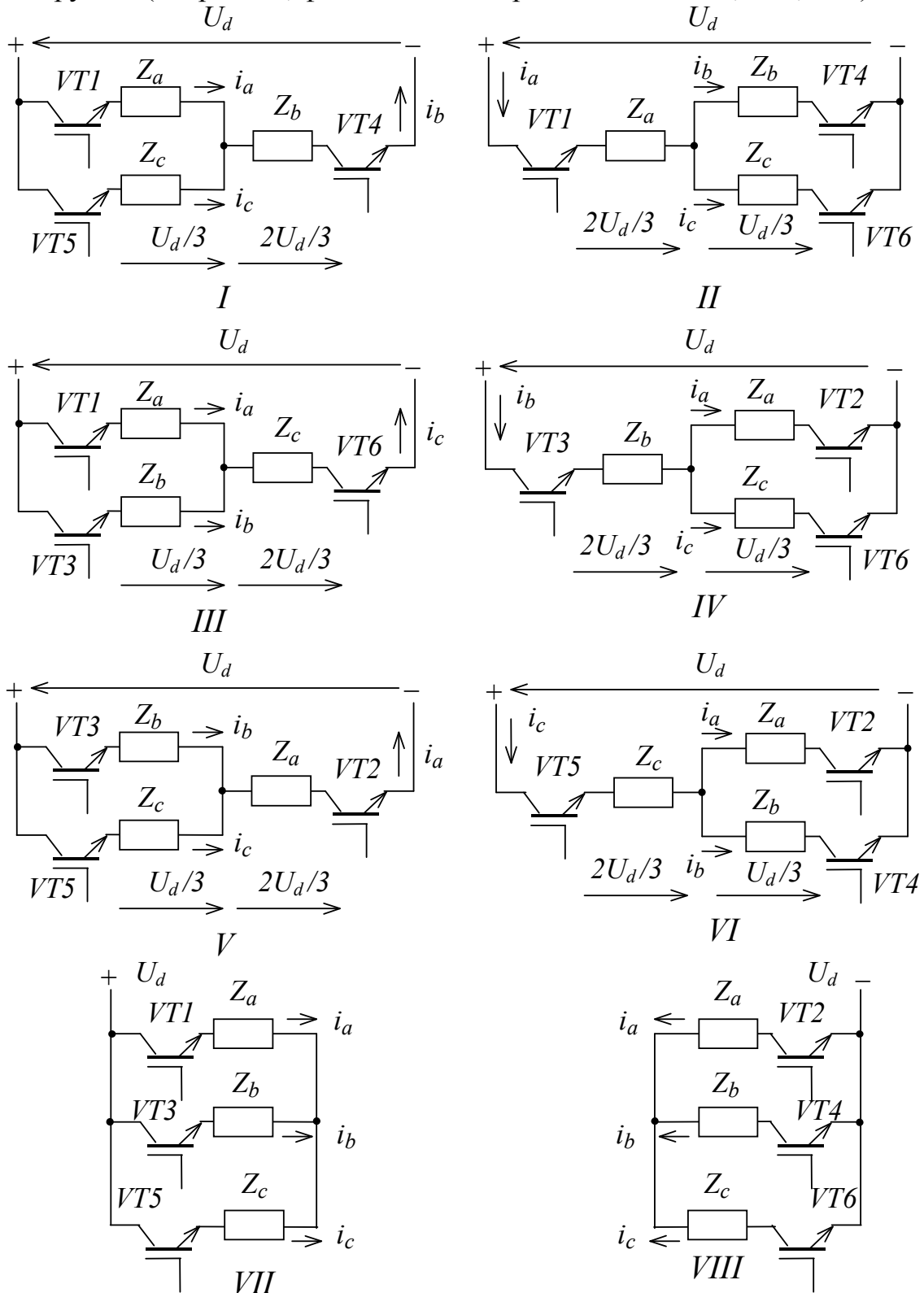


Рис. 3. Схеми з'єднання фаз навантаження

Ключі кожної з фаз (наприклад, $VT1$ та $VT2$) працюють по черзі та отримують протифазні сигнали керування тривалістю $\lambda=180^\circ$. Внаслідок взаємного зсуву діаграм перемикання ключів різних фаз на 120° вихідні фазні напруги інвертора також мають відповідний фазовий зсув.

Миттєві лінійні напруги мають три рівні: 0 (коли три фази навантаження одночасно підключені до одного затискача джерела) та $\pm U_d$ (у всіх інших випадках).

Миттєвий вхідний струм інвертора на кожному з міжкомутаційних інтервалів дорівнює струму тієї фази навантаження, котра не має паралельно ввімкнених фаз, а її миттєва напруга дорівнює $\pm(2/3)U_d$ (див. рис. 2).

Якщо RL -навантаження переважно активне і вихідний струм АІН запізнюється відносно середньої вихідної напруги на кут $\varphi = \varphi_n = \arctg(\omega L/R) < 30^\circ$, миттєвий вхідний струм має незмінний знак, як на рис. 2. Збільшення індуктивності навантаження або зменшення його активного опору збільшує фазовий зсув вихідного струму, і при $\varphi > 30^\circ$ миттєвий вхідний струм стає знакозмінним (рис. 4), хоча його середнє значення знаку не змінює.

Вплив характеру навантаження на фазу та амплітуду вихідного струму можна пояснити за допомогою векторної діаграми рис. 5,а. З неї видно, що зменшення індуктивності або збільшення активного опору призводить до зменшення зсуву φ фазного струму відносно напруги і, як наслідок – зростання споживаної інвертором активної потужності, пропорційної середньому значенню I_d вхідного струму.

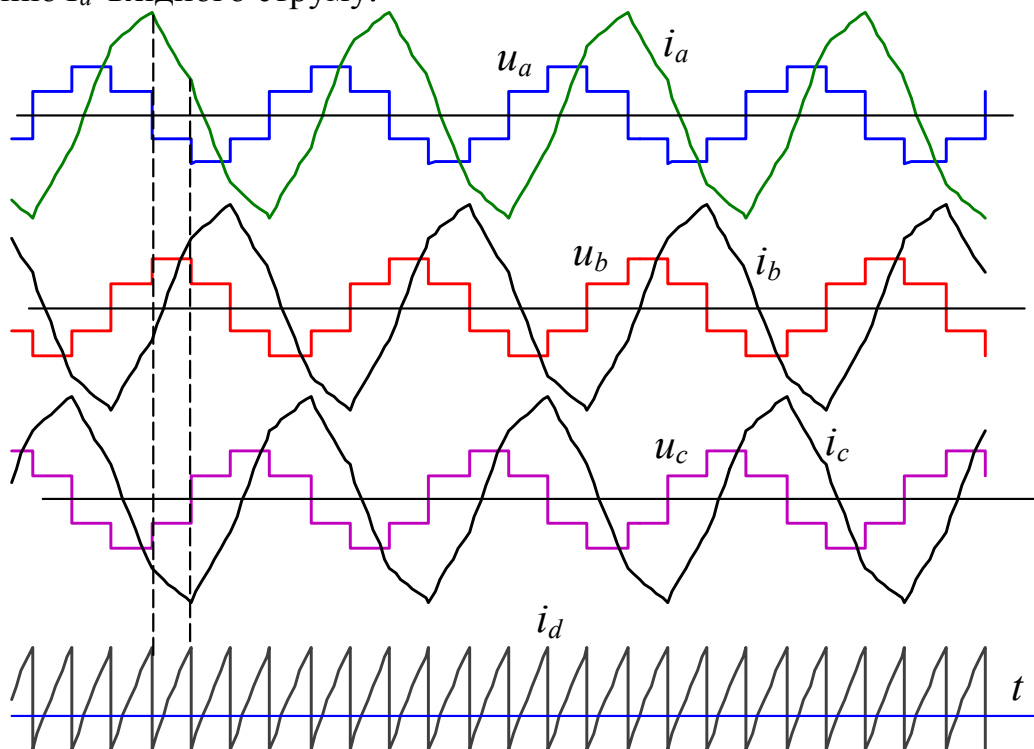


Рис. 4. Процеси в АІН з АМ (переважно індуктивне навантаження)

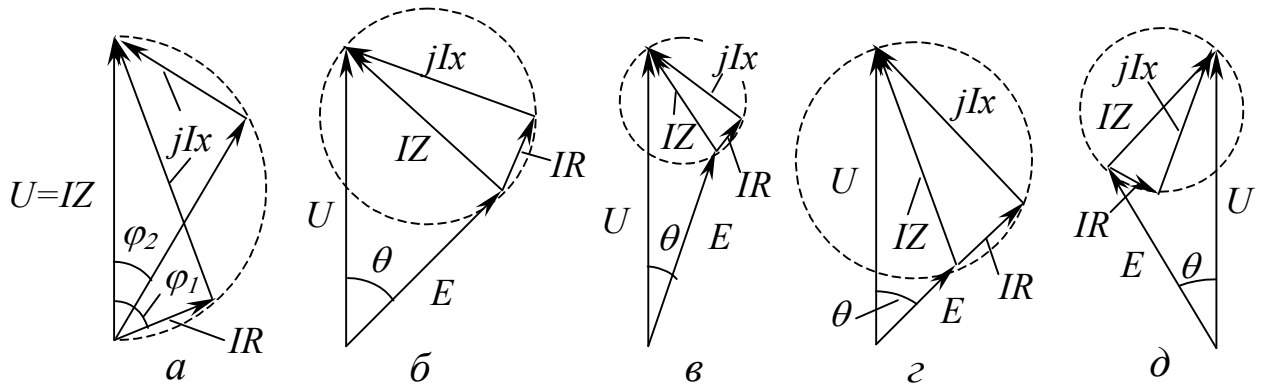


Рис. 5. Характер навантаження та фаза вихідного струму (а – RL -навантаження з різним співвідношенням $\omega L/R$; б...г – ERL -навантаження з різними амплітудою та фазою ЕРС; д – ERL -навантаження в режимі рекуперації)

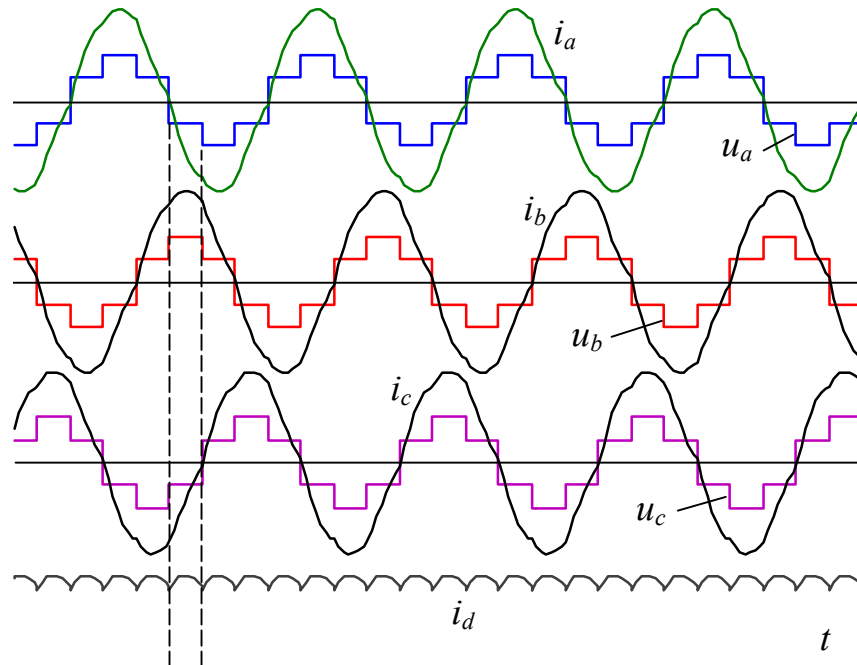


Рис. 6. Процеси в АІН з АМ (проти-ЕРС у складі навантаження)

Вплив проти-ЕРС навантаження на характер процесів у схемі залежить від фазового зсуву проти-ЕРС θ відносно напруги АІН. Як видно з діаграми рис. 5,б (порівняно з рис. 5,а), поява проти-ЕРС, яка запізнюється відносно фазної напруги, призводить до зменшення амплітуди струму та зменшення його фазового зсуву відносно напруги. Часові діаграми для цього випадку наведені на рис. 6.

Зміна знаку кута θ (рис. 5, д) має наслідком запізнення струму на кут $\varphi > 90^\circ$, зміну знаку середнього значення струму I_d та перехід інвертора до режиму рекуперації або активного випрямляча, в якому енергія від джерела проти-ЕРС передається через інвертор до ланки постійного струму. Якщо джерелом напруги U_d є випрямляч, паралельно йому підключають конденсаторний фільтр для забезпечення реверса струму i_d . З подальшим заглиблен-

ням до рекуперативного режиму, коли $\varphi < -30^\circ$, спостерігається знакопостійний характер миттєвого вхідного струму (рис. 7).

3.2. Інвертор з широтно-імпульсною модуляцією

Якщо використовується синусоїдальна ШІМ, система керування такого інвертора складається з трьох однакових каналів (подібних до системи керування однофазним АІН із ШІМ), кожний з яких керує своєю фазою АІН. Єдиною відмінністю є те, що напруги керування окремих каналів зсунуті в часі на 120° одна від одної. Внаслідок взаємного зсуву задавальних напруг вихідні напруги інвертора також мають відповідний фазовий зсув. Оскільки шпаруватість роботи ключів змінюється за синусоїдальним законом, а частота їх перемикання набагато більша частоти задавальної напруги, форма фазних струмів близька до синусоїдальної. Якщо зсув між вихідним струмом та напругою більший за 30° , миттєвий вхідний струм знакозмінний (рис. 8), якщо менший – вхідний струм має незмінний знак (рис. 9).

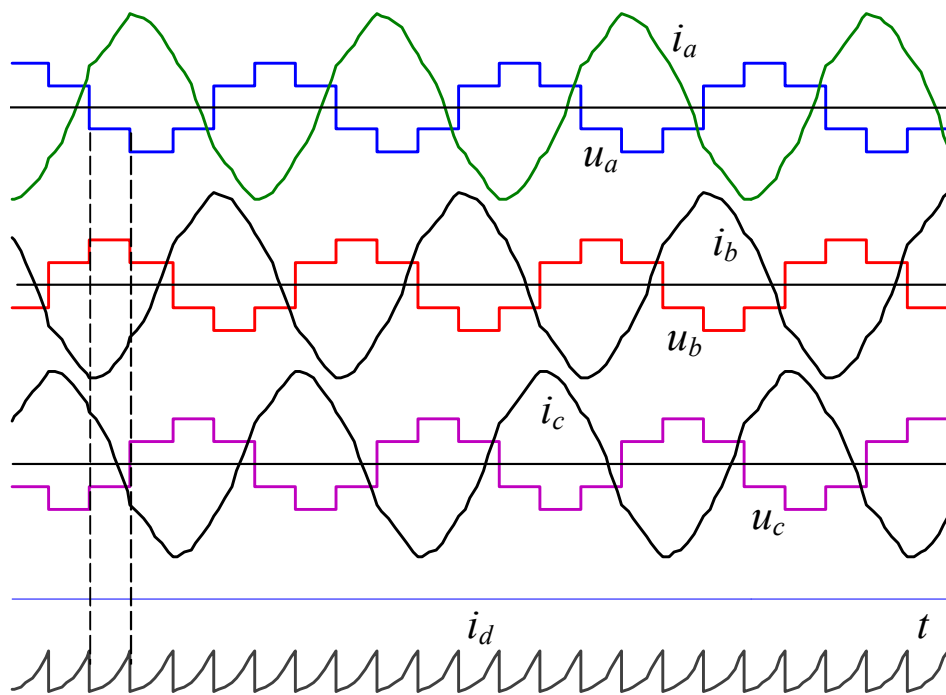


Рис. 7. Процеси в АІН з АМ
(проти-ЕРС у складі навантаження, режим рекуперації)

Миттєвий вхідний струм інвертора на кожному з міжкомутаційних інтервалів дорівнює струму тієї фази навантаження, котра не має паралельно ввімкнених фаз, а її миттєва напруга дорівнює $\pm(2/3)U_d$. Тому обвідними вхідного струму завжди є криві струмів відповідних фаз навантаження. Паузи у струмі i_d спостерігаються, коли три фази навантаження одночасно підключені до одного полюса джерела. Наявність у складі навантаження джерела проти-ЕРС, яка випереджує фазну напругу, може призвести до збільшення кута вихідного струму понад 90° , зміни знаку середнього вхідного струму та переходу АІН до режиму випрямляча (рис. 10).

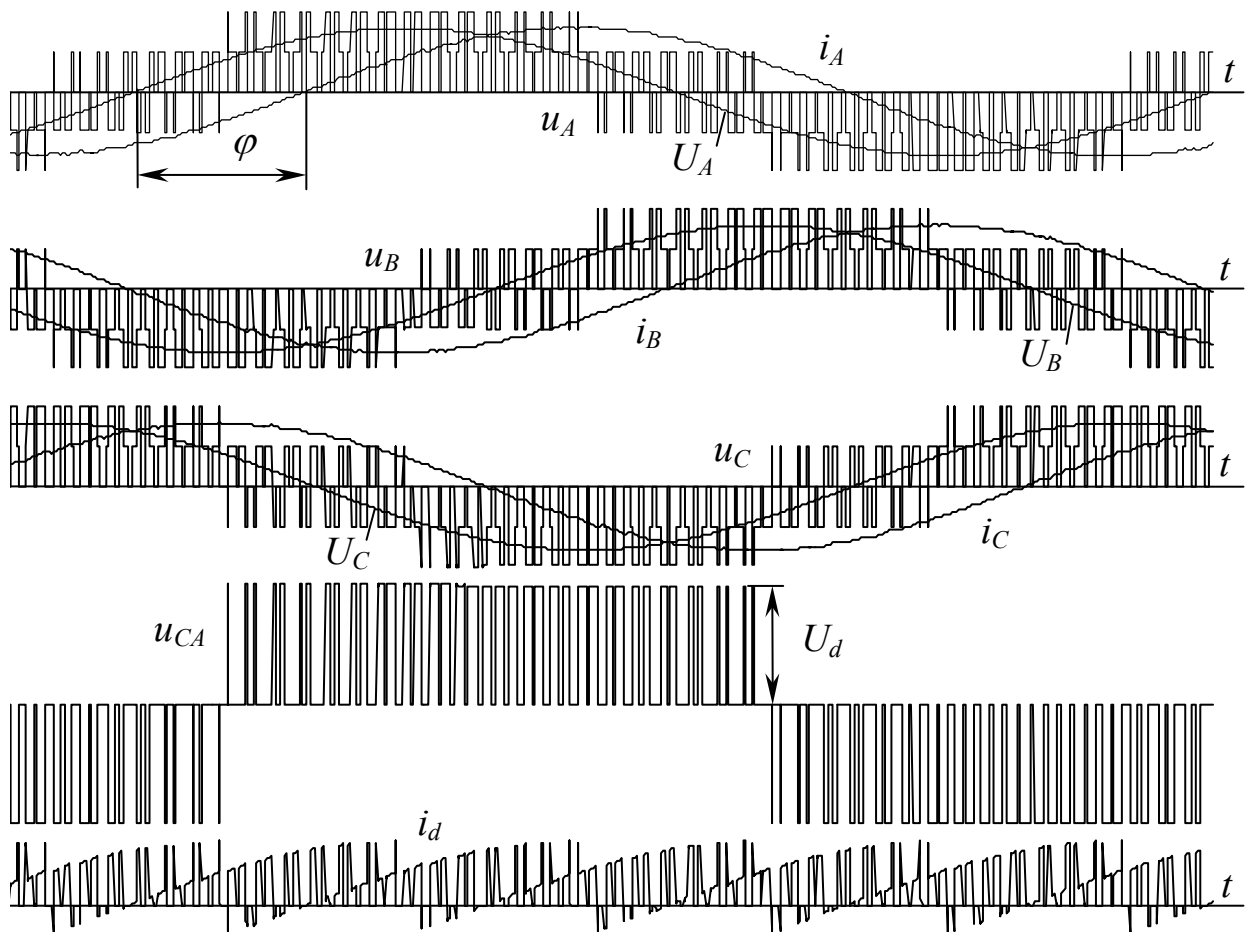


Рис. 8. Часові діаграми АІН з ШІМ та RL -навантаженням ($\varphi > 30^\circ$)

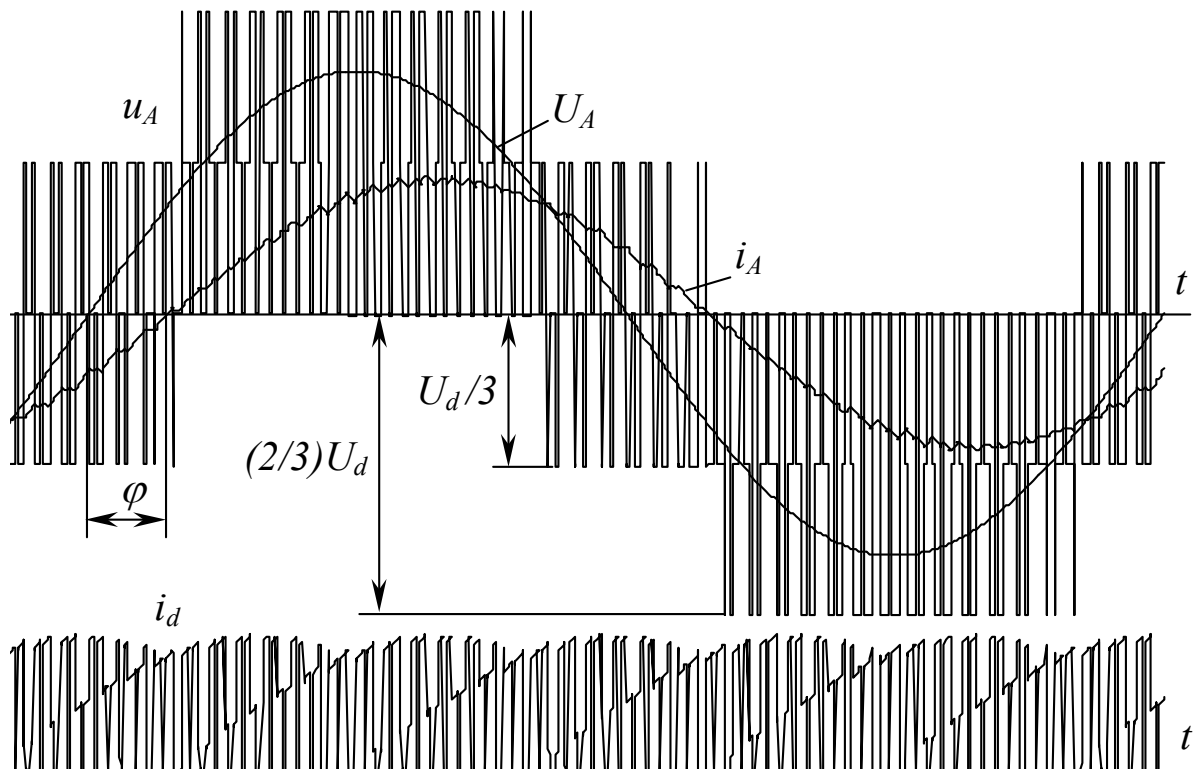


Рис. 9. Часові діаграми АІН з ШІМ та RL -навантаженням ($\varphi < 30^\circ$)

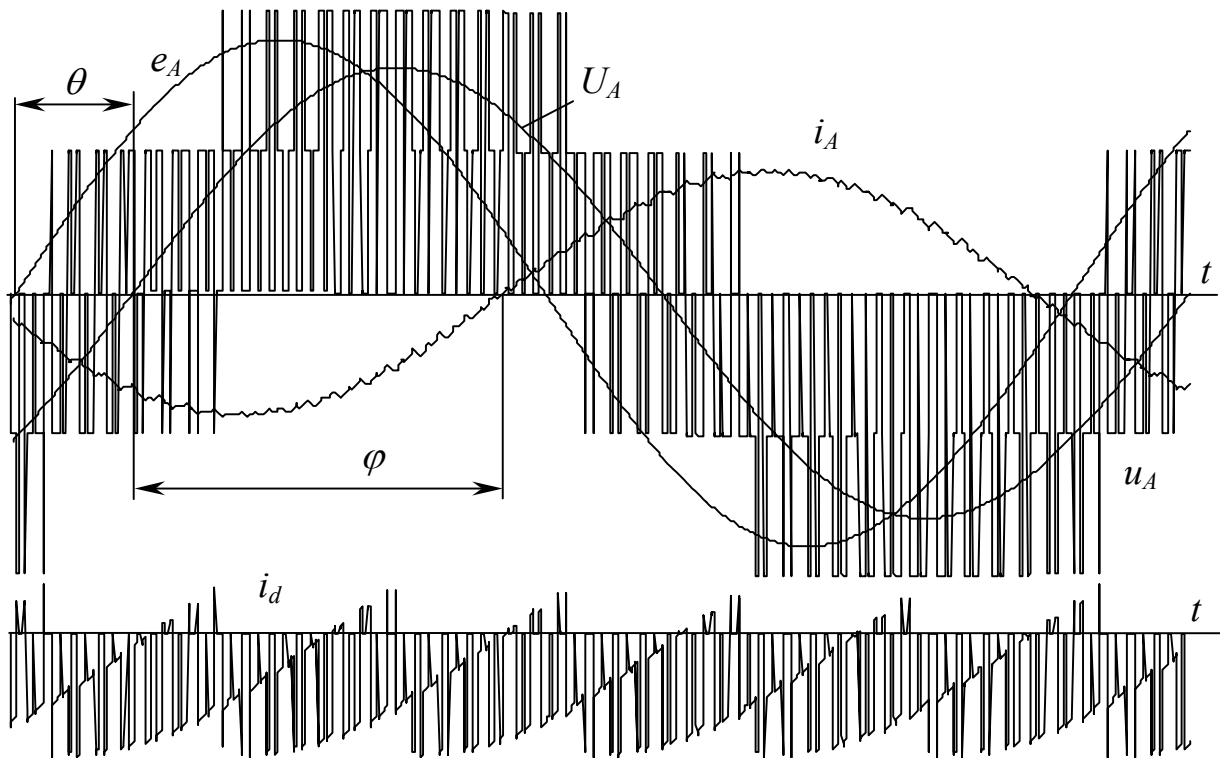


Рис. 10. Часові діаграми АІН ШІМ та *ERL*-навантаженням (режим рекуперації)

4. МОДЕЛІ ІНВЕРТОРІВ

Робота виконується на математичних моделях інверторів. Моделі створено в середовищі *MATLAB/Simulink* із використанням моделей елементів силової електроніки тулбоксу *SimPowerSystem*. На відміну від традиційних моделей *Simulink*, які відносяться до класу структурних (інформаційних) моделей, моделі силових елементів є схемотехнічними. Зовнішній вигляд моделей *SimPowerSystem* схожий на графічне зображення електричних схем. У бібліотеці цього тулбоксу є моделі джерел живлення, резисторів, індуктивних елементів, конденсаторів, вимикачів, напівпровідникових ключів і навіть реалізованих на їх основі мостових схем, електричних машин, вимірювальних пристроїв та інших елементів. За допомогою ліній, шин та інших з'єднувальних пристроїв із цих елементів складається модель електричної схеми.

Більшість силових елементів може з'єднуватися лише з елементами *SimPowerSystem*. Проте вимірювальні пристрої мають інформаційні виходи, а керувані силові елементи (деякі джерела, ключі, мостові перетворювачі) – керуючі входи, до яких можна приєднувати елементи *Simulink*. Завдяки цьому моделі силової схеми та системи керування здатні об'єднуватися у спільній моделі в середовищі *Simulink*.

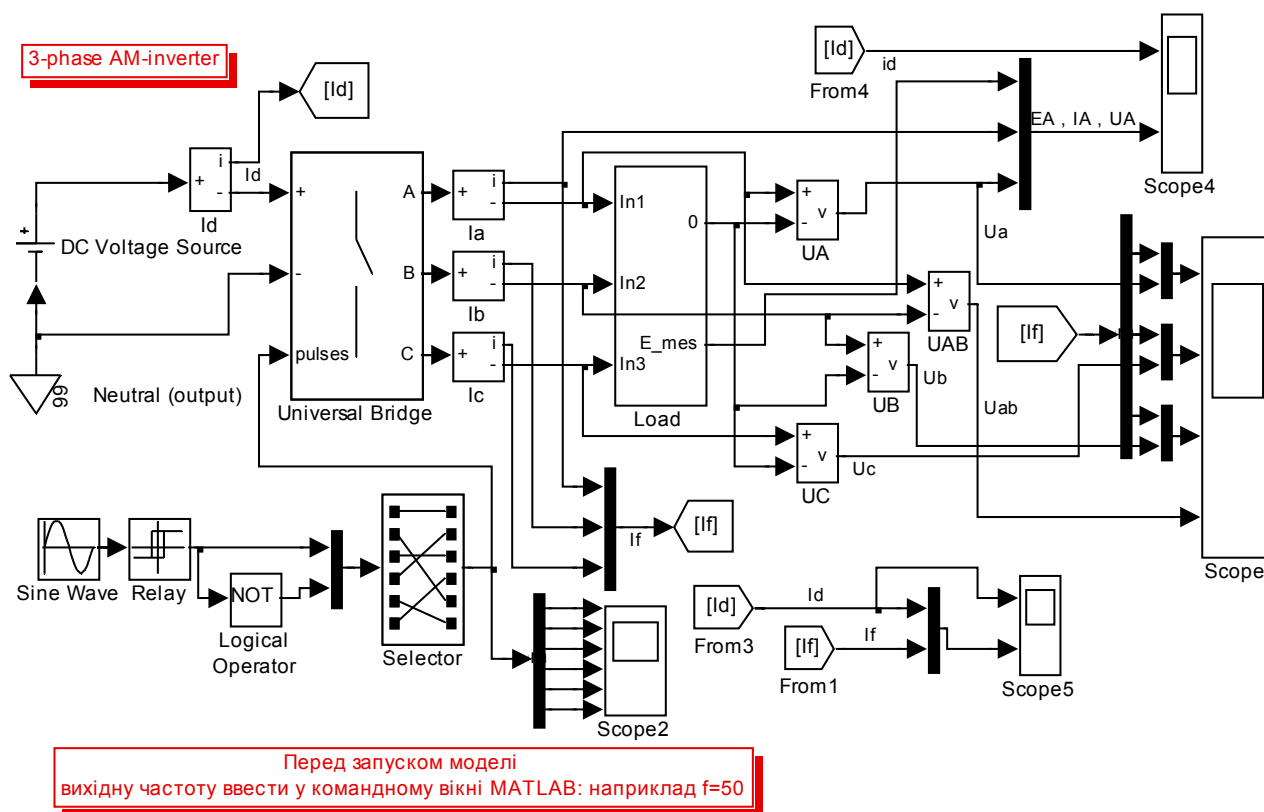


Рис. 11. Модель АІН з АМ

Схема моделі інвертора з АМ зображена на рис. 11. Інвертор (*Universal Bridge*) живиться від джерела постійної напруги *DC Voltage Source*, а до його виходу підключене трифазне навантаження *Load*. До керуючого входу АІН (*pulses*) подаються сигнали керування від системи керування, реалізованої за допомогою блоків *Sine Wave*, *Relay*, *Logical operator NOT*, *Selector*.

У моделі передбачено зміну таких параметрів:

- опір, індуктивність, амплітуда та фаза проти-ЕРС навантаження (блок *Load*);
- частота вихідного струму (шляхом надання змінній f потрібного значення в командному рядку головного вікна *MATLAB*).

Схема моделі інвертора з ШІМ зображена на рис. 12. До виходу АІН підключене трифазне *ERL*-навантаження *Load*, з'єднане у зірку. Сигнали керування інвертором генеруються блоком *PWM*. Його структура подібна до структури широтно-імпульсного модулятора *PWM* в роботі СПАЕ-8. Блок *Gate Circuit* виконує допоміжні функції вибору сигналів для індикації. У моделі вимірюються наступні змінні:

- струми на вході та виході інвертора (блоки *Id*, *IA*, *IB*, *IC*);
- три фазні та одна з лінійних вихідних напруг (блоки *UA*, *UB*, *UC*, *UAB*);
- проти-ЕРС фази *A* (блок *From4*);
- три напруги завдання *UZA*, *UZB*, *UZC* (блоки *PWM* та *Gate Circuit*);
- три опорні напруги (*pila*) та імпульси керування ключами *impA*, *impB*, *impC* (блок *Gate Circuit*).

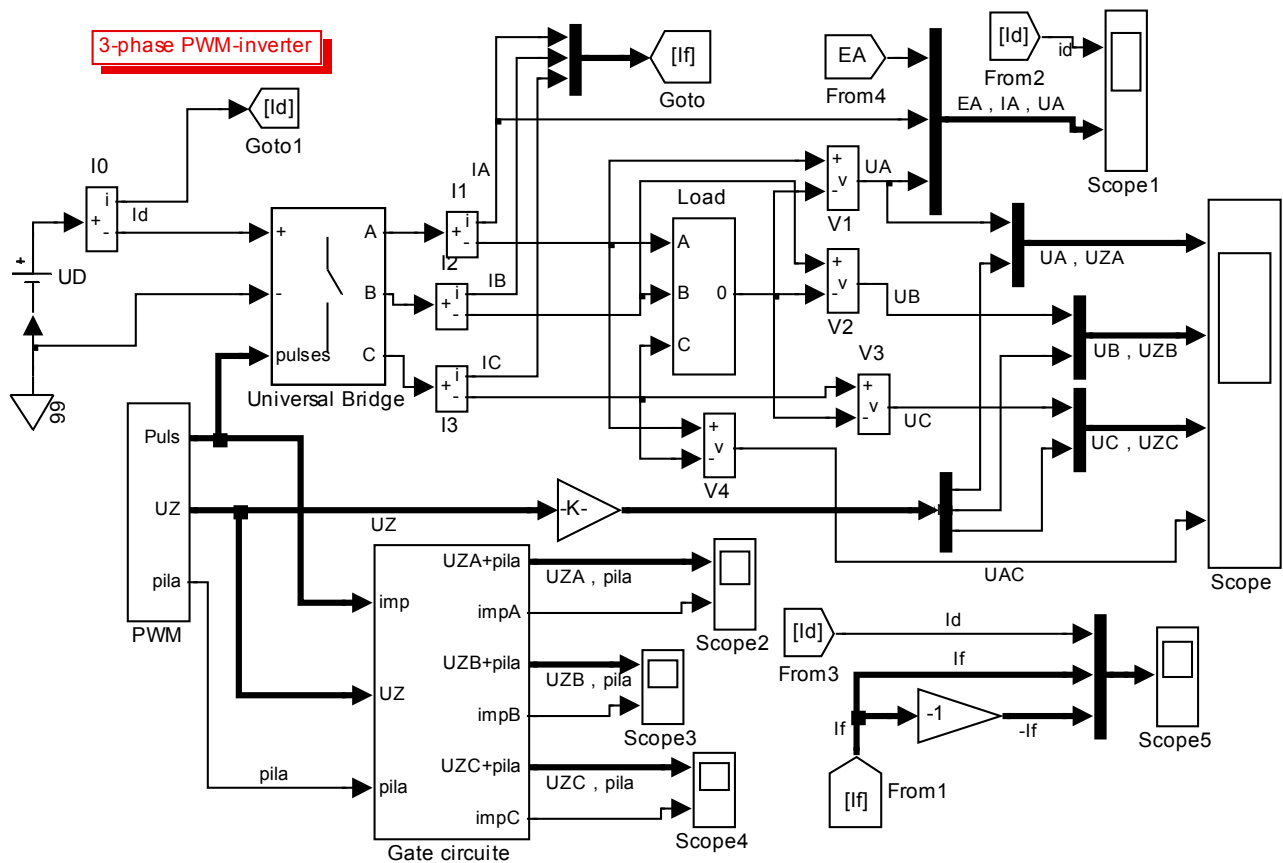


Рис. 12. Модель АІН із ШІМ

Осцилографи призначені для індикації:

- *Scope* – миттєвих і середніх фазних та однієї з лінійних напруг;
- *Scope1* – струму, напруги та проти-ЕРС фази *A*, а також вхідного струму АІН;
- *Scope2*, *Scope3*, *Scope4* – опорних, задавальних напруг та імпульсів керування ключами фаз *A*, *B*, *C*;
- *Scope5* – вхідного та вихідних струмів.

У моделі передбачено зміну таких параметрів:

- опір, індуктивність навантаження (блок *Load*);
- амплітуда (*Amplitude Em*) та фаза (*Phase of E*) проти-ЕРС навантаження (блок *Load*);
- частота модуляції (*fm*) та амплітуда (*Ukm*) задавальної напруги (блок *PWM*). Задавальна напруга не повинна перевищувати амплітуди опорної напруги (10 В).

5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Дослідження АІН з амплітудною модуляцією (файл *srae10_at.mdl*)

1. Змінюючи частоту перемикання ключів (з командного рядка *MATLAB* у межах 10...50 Гц), а також активний опір та індуктивність навантаження (у межах 0,1...0,5 Ом та 1...5 мГн) за умови, що амплітуда проти-ЕРС навантаження дорівнює нулю, спостерігати їх вплив на форму та середнє значення вхідного та вихідного струмів інвертора, а також на тривалість

провідного стану тиристорів та діодів. Записати значення коефіцієнту гармонік K_r вихідного струму для одного з режимів.

2. Змінюючи амплітуду проти-ЕРС від 0 до 250 В, а також її фази в межах $\pm 80^\circ$, спостерігати зміну форми струмів на вході та виході АІН. Для отримання більш виразних результатів активний опір навантаження повинен дорівнювати 0,1 Ом, а його індуктивність 5 мГн.

Дослідження АІН з широтно-імпульсною модуляцією (файл *rae10_pwm.mdl*)

1. Змінюючи частоту модуляції та амплітуду задавальної напруги, дослідити їх вплив на форму вихідних напруги та струму.
2. Увести до складу навантаження проти-ЕРС та дослідити вплив його амплітуди та фази на характер процесів в інверторі.

6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Як визначити напрямок передачі енергії між джерелом живлення та інвертором на будь-якому міжкомутаційному інтервалі?
2. Чому дорівнює середній вхідний струм АІН із суто індуктивним навантаженням?
3. Як частота коливань вхідного струму трифазного мостового АІН з АМ пов'язана з частотою вихідної напруги?
4. Скільки разів за період вихідної напруги відбувається чергова комутація ключів у трифазному АІН з амплітудною модуляцією?
5. Яким чином змінюють амплітуду вихідної напруги АІН з АМ та ШІМ?
6. Як у часі змінюється шпаруватість роботи ключів АІН із ШІМ?
7. В однофазному АІН були відкриті ключі $VT1$, $VT3$, $VT6$. Потім замість $VT3$ керуючий сигнал отримав $VT4$. Як одразу після цього:
 - а) протікатиме вихідний струм фази B ;
 - б) зміниться вихідна напруга цієї ж фази.
8. Як змінюється амплітуда вищих гармонік вихідного струму АІН:
 - а) зі збільшенням частоти модуляції;
 - б) зі збільшенням індуктивності навантаження?
9. Як змінюється амплітуда та фаза вихідного струму АІН зі збільшенням активного опору навантаження?
10. Скільки транзисторів одночасно відкрито у трифазному інверторі?
11. Чому дорівнює максимально можлива амплітуда першої гармоніки вихідної напруги в однофазному та трифазному інверторах?
12. Які ключі повинні бути відкриті в трифазному інверторі, щоб його вхідний струм дорівнював нулю?
13. Які ключі трифазного інвертора можуть бути відкриті, якщо його вхідний струм за рівнем дорівнює струмові фази B та має протилежний знак?
14. Який напівпровідниковий прилад буде відкритий у трифазному АІН одразу після зняття позитивного потенціалу з бази $VT3$ та подачі його до бази $VT4$?

15. У трифазному АІН були відкриті ключі $VT1$, $VT3$, $VT6$. Закрилися $VT1$, $VT3$. Як одразу після цього:
 - а) протікатимуть фазні струми;
 - б) зміняться напруги всіх фаз.
16. Теж саме – після закриття $VT1$, $VT3$, $VT6$.
17. Теж саме – після закриття $VT6$.
18. Яким повинен бути фазовий зсув між вихідним струмом та напругою, щоб миттєвий вхідний струм АІН не змінював знаку?
19. Чому дорівнює максимально можлива амплітуда першої гармоніки вихідної напруги у трифазному інверторі з синусоїдальною ШІМ?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Казачковський М. М. Автономні перетворювачі та перетворювачі частоти: навч. посіб. [Електронний ресурс] / М. М. Казачковський; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Електрон. текст. дані. – 2-ге вид., випр. та допов. – Дніпро.: НГУ, 2017. – 324 с. (режим доступу: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/150764?show=full>).
2. Силовые полупроводниковые устройства для управления двигателями переменного тока: Учебный модуль для студентов ВУЗов специальности 141 «Электроэнергетика, электротехника и электромеханика» (специализация «Электромеханические системы автоматизации и электропривод»). Теоретическая часть / [Електронний ресурс] Н.Н. Казачковський. Шнейдер Електрик, 2017. – 193 с. (Режим доступу: http://elprivod.nmu.org.ua/files/converters/%D0%9C%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BB%D1%8C%D0%A8%D0%AD_17.pdf)
3. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Преобразовательная техника. – К.: Вища школа, 1983. – 431 с.

Лабораторна робота СПАЕ-11
“Дослідження підвищувального переривника
постійної напруги”

1. МЕТА РОБОТИ

Вивчити особливості електромагнітних процесів та статичних характеристик підвищувальних переривників постійної напруги.

2. ПРОГРАМА РОБОТИ

2.4. Дослідити електромагнітні процеси в підвищувальному переривнику постійної напруги при роботі на RC -навантаження.

2.5. Вивчити регульовальну характеристику переривника в режимах безперервного та переривистого струмів.

3. ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Підвищувальні переривники є фактично паралельними переривниками, які використовуються в ситуаціях, коли вихідна напруга первинного джерела ЕРС недостатньо висока для того, щоб споживачі живилися безпосередньо від цього джерела. Подібні ситуації виникають, наприклад, коли первинними джерелами є низьковольтні акумуляторні та сонячні батареї. Окрім підвищення вихідної напруги порівняно зі входною, такі перетворювачі мають можливість регулювання напруги на виході. Тому їх нерідко використовують також для стабілізації вихідної напруги у вторинних джерелах живлення, призначених для мереж з нестабільною напругою або для широкого діапазону входних напруг (наприклад, зарядні пристрої).

Схема найпростішого підвищувального переривника зображена на рис. 1. На виході переривника паралельно навантаженню R_H завжди включено конденсатор C достатньо великої ємності, а на вході послідовно з джерелом входної напруги U увімкнений дросель L_0 . У переривниках такого роду використовують цілком керовані ключі (транзистори або двоопераційні тиристри).

У схемі рис. 1 тиристор VS увімкнений паралельно джерелу та навантаженню. Діод VD запобігає розряду конденсатора на джерело живлення, коли напруга на виході схеми більша за напругу на вході. Дросель призначений для накопичення енергії на етапі відкритого стану тиристора, конденсатор сприяє згладжуванню миттєвої напруги на навантаженні. Особливістю схеми є те, що вихідна напруга завжди більша за входну.

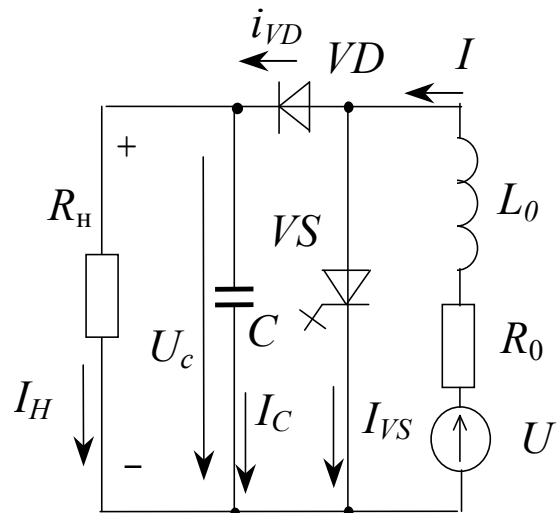


Рис. 1 Схема переривника

На рис. 2 зображені процеси в схемі переривника. Тиристор VS періодично змінює свій стан. На інтервалі часу t_1 він відкритий, на інтервалі t_2 – закритий. Відносну тривалість відкритого стану тиристора звичайно визначають за допомогою параметру $\lambda = t_1/T = 1 - \gamma$. Стан тиристора зображено на рис. 2 ступінчастою лінією VS . Напряга на вході становить 300 В.

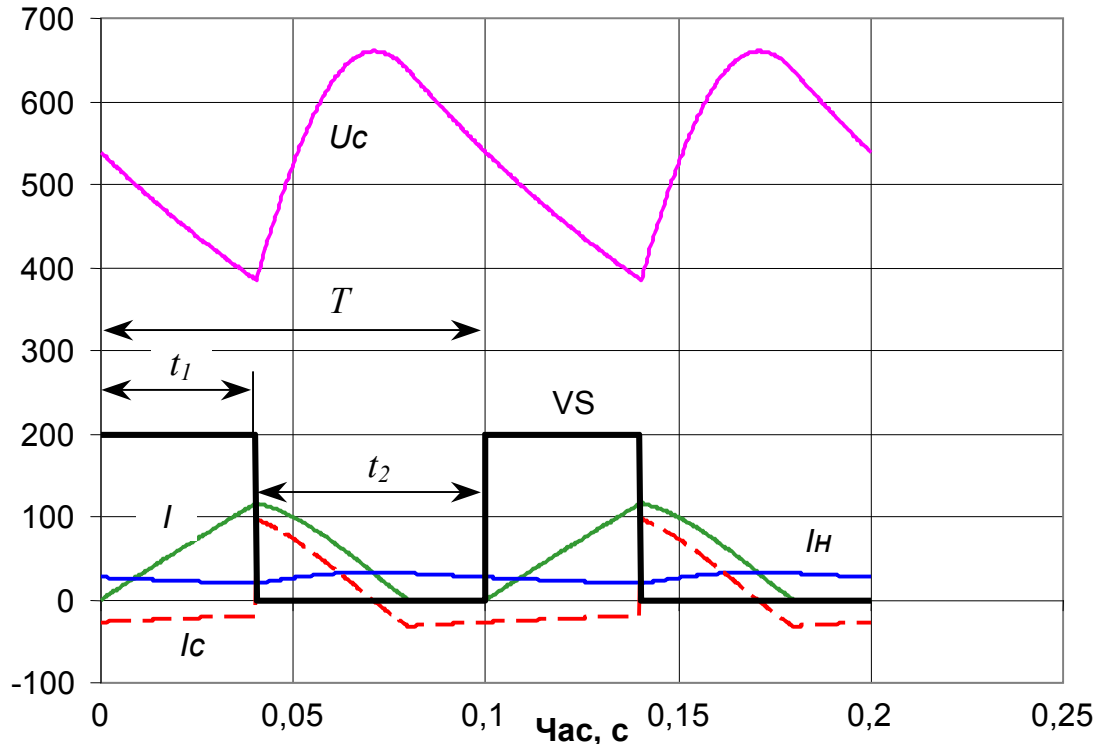


Рис. 2 Процеси в переривнику

Залежно від стану тиристора та параметрів схеми можливі три етапи її роботи:

- етап відкритого стану тиристора (етап накачки дроселя);
- етап закритого стану тиристора та відкритого стану діода;
- етап закритого стану тиристора та діода (безструмова пауза на вході схеми).

На етапі відкритого стану тиристора джерело живлення закорочене ним на дросель, завдяки чому вхід та вихід схеми відокремлені одне від одного. Струм I на вході збільшується, зростає електромагнітна енергія, накопичена у дроселі. Темп зростання струму визначається співвідношенням вхідної напруги та індуктивності дроселя

$$\frac{dI}{dt} = \frac{U - IR_n}{L_0} \approx \frac{U_0}{L_0}.$$

Одночасно триває розряд конденсатора на опір навантаження (U_c зменшується).

Закривання тиристора призводить до того, що його опір зростає, струм зменшується, і у дроселі виникає ЕРС самоіндукції $e_L = -L_0 \frac{dI}{dt}$, направлена згідно зі струмом та ЕРС джерела. Оскільки темп закривання тиристо-

ра та збільшення його опору достатньо великий, струм зменшується швидко, а ЕРС самоіндукції сягає великих значень. Тому сума ЕРС джерела та ЕРС самоіндукції більша від напруги на конденсаторі

$$U + e_L > U_C$$

і діод відкривається. Після цього струм від джерела протікає діодом та конденсатором, підзаряджаючи останній. Струм конденсатора змінює знак. Миттєва напруга U_C на виході зростає.

Процеси в колі протікання струму описуються диференціальним рівнянням напруг

$$U_0 - L_0 \frac{dI}{dt} + IR_0 = U_C.$$

Оскільки вхідна напруга менша за вихідну, похідна струму за нехтування падінням в активному опорі IR_0 буде негативною

$$\frac{dI}{dt} \approx \frac{U_0 - U_C}{L_0} < 0,$$

а струм спадатиме.

Якщо тривалість інтервалу часу t_2 достатньо велика або вхідний струм наприкінці попереднього етапу був малий, може статися (як на рис. 2), що струм на етапі дозаряду конденсатора встигне впасти до нуля. Тоді й починається третій етап: безструмова пауза на вході. Діод та тиристор внаслідок зникнення струму закриваються. Конденсатор починає розряджатися на навантаження, а напруга на ньому зменшується. Слід зауважити, що, оскільки навантаження суто активне, миттєвий струм навантаження I_n за формою повторює напругу на конденсаторі.

Після наступного відкриття тиристора струм на вході знову зростає, і процеси повторюються.

Якщо збільшити індуктивність дроселя, темп зміни струму стане меншим. Завдяки цьому на етапі закритого стану тиристора струм може не встигнути впасти до нуля (рис. 3), а після відкриття ключа знову зростатиме. Безструмова пауза зникне. Оскільки на етапі накачки дроселя він накопичить меншу енергію, конденсатор не зможе дозарядитися до тієї ж напруги, що на рис. 2, і середнє значення вихідної напруги дещо зменшиться.

Зникнення безструмової паузи можна досягти також шляхом збільшення тривалості відкритого стану тиристора (рис. 4). На момент закривання тиристора вхідний струм встигне зрости до більшого рівня, внаслідок чого на наступному етапі не встигне впасти до нуля на момент наступного відкриття VS . Зросте енергія, накопичена в дроселі, зросте струм заряду конденсатора, а середня напруга на виході стане більшою. Подібний зв'язок між λ та середньою вихідною напругою використовуються для керування рівнем вихідної напруги з метою забезпечення її стабілізації навіть за умов зміни вхідної напруги (внаслідок часткового розряду акумуляторної батареї або зменшення освітленості сонячного елемента). Регульовальні характеристики переривника

$U_c = f(\lambda)$ з різними вхідними опорами зображені на рис. 5. Зі зростанням λ від нуля вихідна напруга зростає (теоретично необмежено, проте наявність вхідного опору R_0 обмежує максимальний рівень напругу на виході).

Збільшення вхідного опору призводить до подовження безструмової паузи (рис. 6), зменшення вхідного струму та енергії, накопиченої в дроселі, збільшення коливань вихідної напруги та зменшення її середнього рівня. При цьому зростають втрати енергії та погіршується ККД переривника.

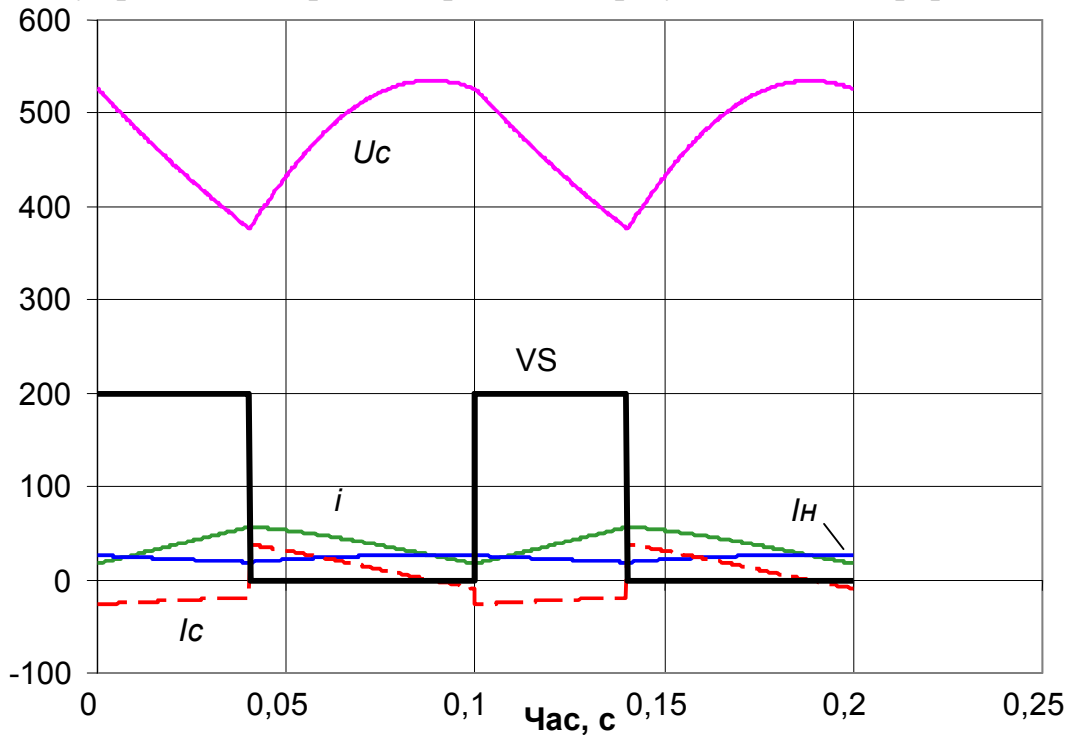


Рис. 3 Вплив збільшення індуктивності дроселя

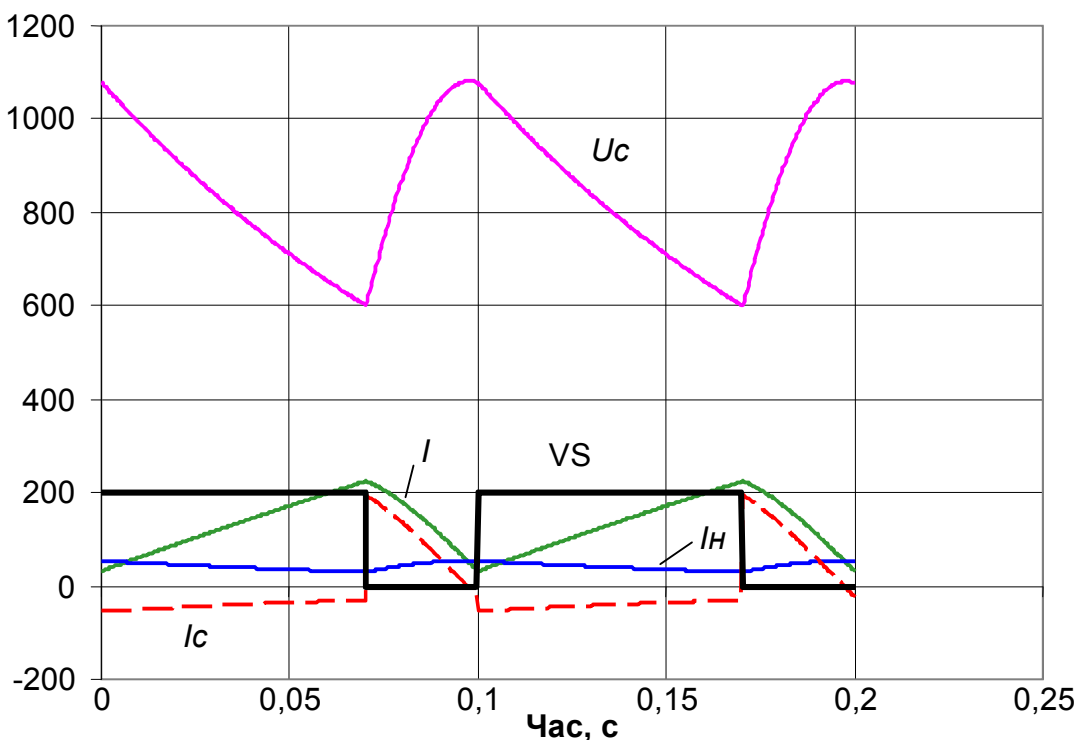


Рис. 4 Вплив збільшення тривалості відкритого стану тиристора

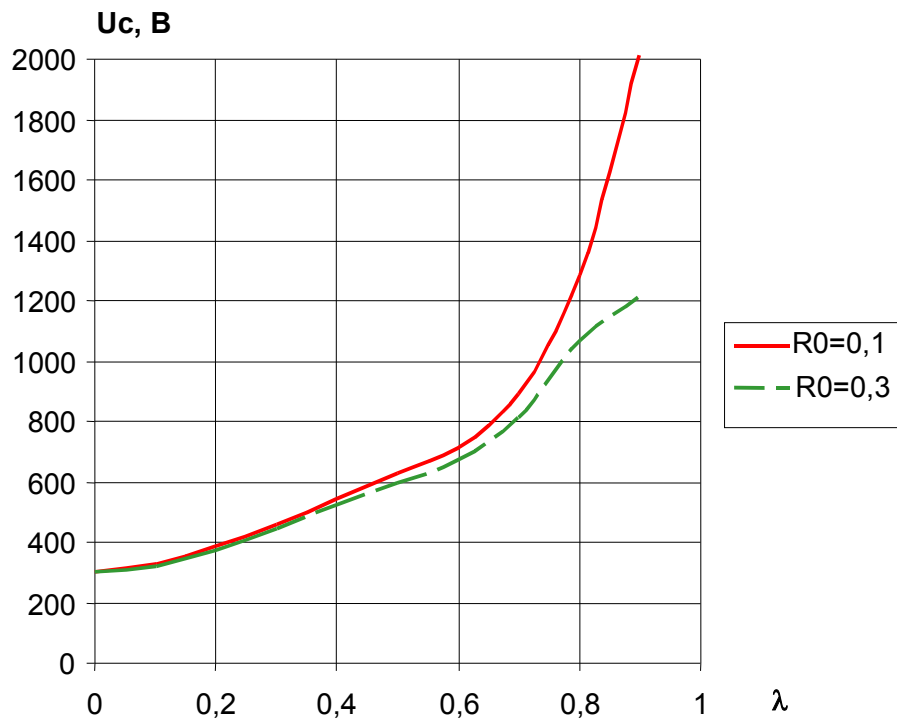


Рис. 5 Регулювальні характеристики

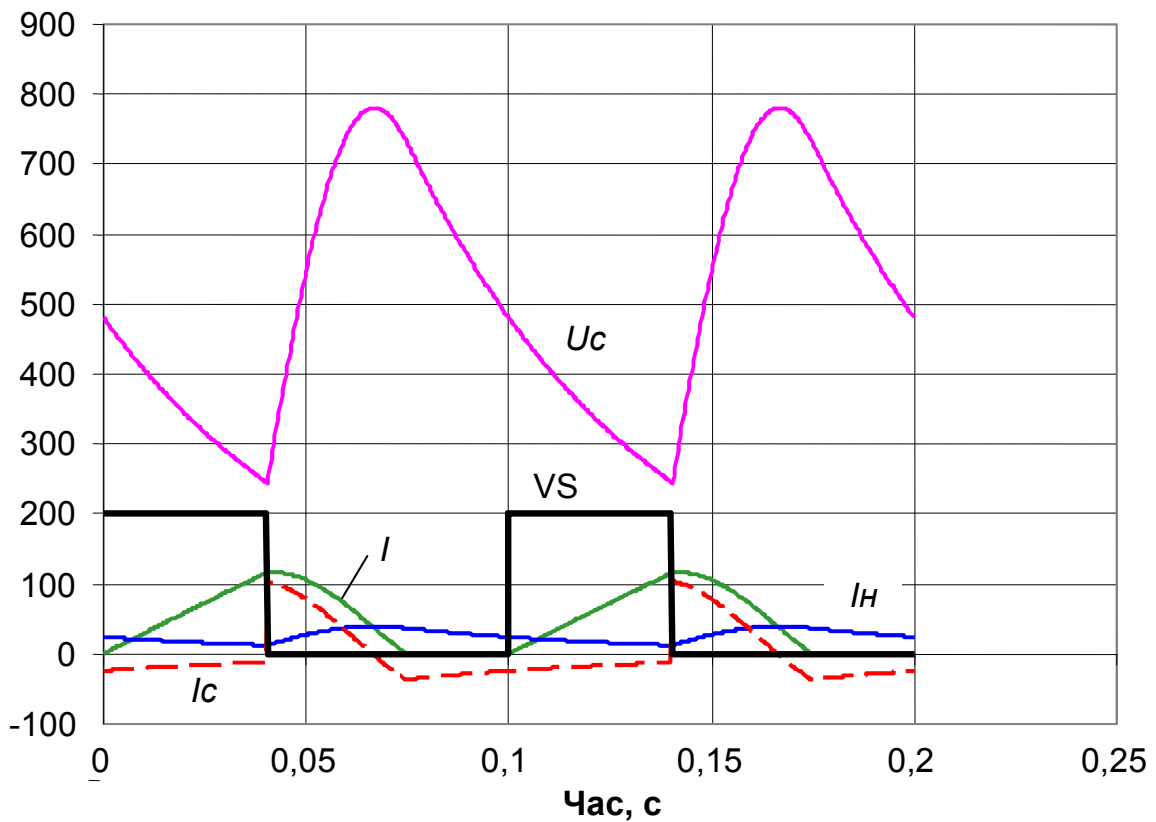


Рис. 6 Вплив збільшення вхідного опору

Якщо збільшити (порівняно з рис. 3) ємність конденсатора, коливання вихідної напруги суттєво зменшуються і навіть дещо зростає її середній рівень (рис. 7).

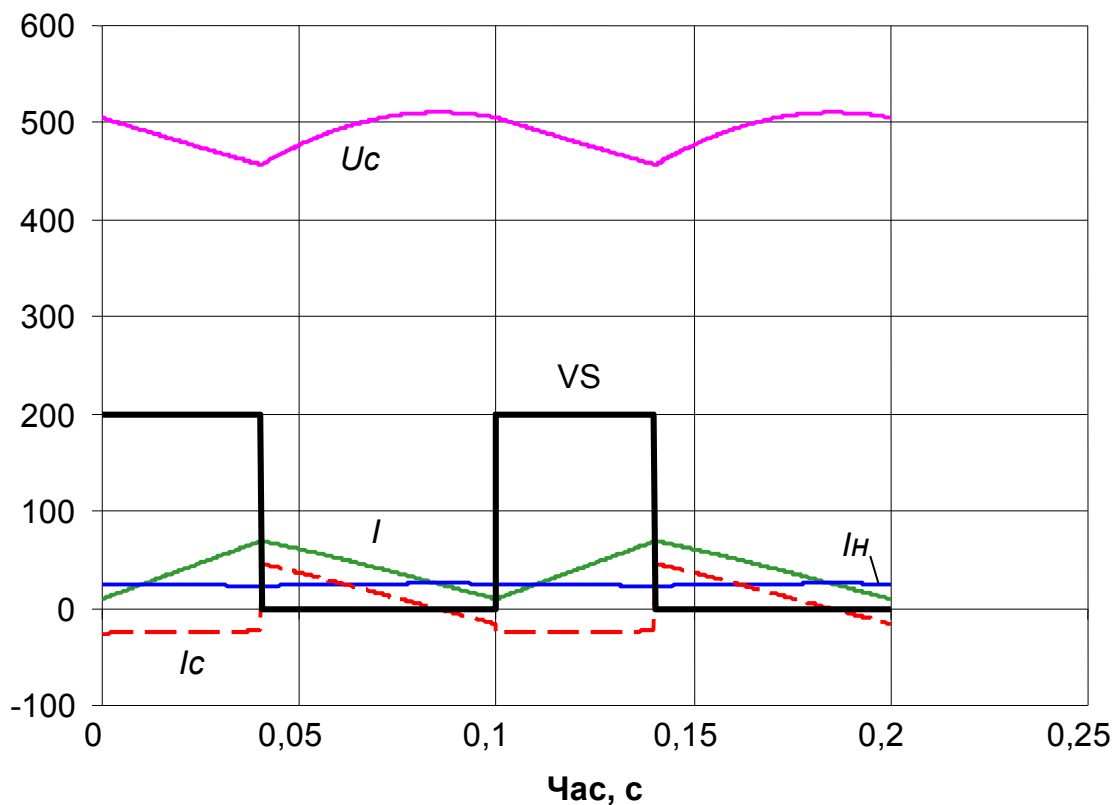


Рис. 7 Вплив збільшення ємності конденсатора

4. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Робота виконується на математичній моделі переривника, реалізованій за допомогою електронних таблиць *Excel*.
2. Клітинки, в яких розташовані змінні вихідні дані, виділені рожевим кольором. Змінювати вміст інших клітинок не рекомендується.
3. Змістом роботи є дослідження електромагнітних процесів на готових моделях шляхом зміни вихідних даних (λ , параметрів вхідного та вихідного кіл переривника).
4. У таблиці “Результати” в файлі *Excel* наведені деякі інтегральні характеристики режиму переривника, які змінюються зі зміною параметрів схеми та можуть бути корисними під час аналізу.
5. Під час виконання роботи студент повинен:
 - дослідити вплив λ на середнє значення вихідної напруги та зняти дві регульовальні характеристики переривника $U_{\text{сєєр}} = f(\lambda)$, які відрізняються значеннями вхідного опору R_0 (значення задаються викладачем). Характеристику будувати в *Excel*, а значення $U_{\text{сєєр}}$ слід копіювати з моделі та вставляти в таблицю за допомогою команди “Правка\Спеціальная вставка\Значения”.
 - дослідити вплив ємності та вхідного опору на середнє значення вихідної напруги та ККД за незмінного значення λ .
 - дослідити вплив λ , R_0 , L_0 на появу та зникнення паузи у вхідному струмі.

- переконалися, що за допомогою переривника можна стабілізувати вихідну напругу за нестабільної вхідної. Для цього слід зменшити вхідну напругу удвічі порівняно з початковим значенням, після чого шляхом збільшення λ довести вихідну напругу до попереднього рівня.
6. Під час роботи з моделлю не рекомендується змінювати параметри більш ніж у кілька разів порівняно з початковими, задавати нульові значення ємності, індуктивності, опорів, виходити за межі $\lambda = 0 \dots 1$, вводити до клітинок нечислові значення.

5. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

- 5.1. Яке призначення конденсатора та діода у схемі рис. 1?
- 5.2. Безпосередньо перед відкриттям діода яка з напруг більша: джерела U або вихідна U_c ?
- 5.3. Як середнє значення вихідної напруги переривника залежить від λ ?
- 5.4. Яким шляхом протікає струм навантаження після відкриття тиристора?
- 5.5. Як збільшення λ впливає на ККД переривника?
- 5.6. Як змінюється ККД переривника після зменшення вхідного опору R_0 ?
- 5.7. Як збільшення L_0 впливає на середній рівень вихідної напруги?
- 5.8. Чи можна за допомогою переривника за схемою рис. 1 отримати середній рівень вихідної напруги, менший за вхідну?
- 5.9. У якому напрямі передається енергія через переривник: від джерела U до навантаження або навпаки?
- 5.10. За яких умов відкривається діод в схемі рис. 1?
- 5.11. Чому зменшення вхідного опору призводить до збільшення вихідної напруги?
- 5.12. За яким законом змінюється у часі напруга на конденсаторі, якщо діод закритий?
- 5.13. Запишіть диференціальне рівняння напруг для кола навантаження, коли діод закритий.
- 5.14. Як збільшення вхідного опору впливає на тривалість паузи у вхідному струмі?
- 5.15. Як темп зміни вхідного струму залежить від величині індуктивності дроселя?
- 5.16. Як після зменшення вхідної напруги вплине на рівень вихідної і як після цього має змінитися величина λ , щоб поновити попереднє значення вихідної напруги?
- 5.17. Чи можуть у схемі рис. 1 бути одночасно відкритими діод та тиристор?
- 5.18. Як змінюється струм конденсатора одразу після відкривання тиристора?

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. Сен П. Тиристорные электроприводы постоянного тока. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 232 с.
4. Глазенко Т.А. Полупроводниковые преобразователи в электроприводах постоянного тока. – Л.: Энергия, 1973. – 304 с.
5. Казачковський М. М. Автономні перетворювачі та перетворювачі частоти: навч. посіб. [Електронний ресурс] / М. М. Казачковський; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Електрон. текст. дані. – 2-ге вид., випр. та допов. – Дніпро.: НГУ, 2017. – 324 с. (режим доступу: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/150764?show=full>).
6. Силовые полупроводниковые устройства для управления двигателями переменного тока: Учебный модуль для студентов ВУЗов специальности 141 «Электроэнергетика, электротехника и электромеханика» (специализация «Электромеханические системы автоматизации и электропривод»). Теоретическая часть / [Електронний ресурс] Н.Н. Казачковський. Шнейдер Электрик, 2017. – 193 с. (Режим доступу: http://elprivod.nmu.org.ua/files/converters/%D0%9C%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BB%D1%8C%D0%A8%D0%AD_17.pdf)

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