

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2021-42-10>

УДК 621.31.33

Лишук Віктор Васильович, доцент

<https://orcid.org/0000-0003-4049-8467>

Євсюк Микола Миколайович, доцент

<https://orcid.org/0000-0002-3768-8959>

Селепина Йосип Романович, доцент

<https://orcid.org/0000-0002-2421-1844>

Мороз Сергій Анатолійович, доцент

<https://orcid.org/0000-0003-4677-5170>

Літковець Сергій Петрович, доцент

<https://orcid.org/0000-0003-2896-8518>

Луцький національний технічний університет

ІМПУЛЬСНО-ФАЗОВЕ КЕРУВАННЯ В ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЯХ

В.В. Лишук, М.М. Євсюк, Й.Р. Селепина, С.А. Мороз, С.П. Літковець. Імпульсно-фазове керування в електротехнічних пристроях. У статті запропонований імпульсно-фазовий спосіб регулювання напруги в електротехнічних пристроях. Запропонована синхронна система імпульсно-фазового керування з вертикальним керуванням дає змогу підвищити швидкодію при регулюванні напруги в електротехнічних пристроях та формувати необхідні кути керування тиристорами. Запропонований генератор пилоподібної напруги як опорної щодо формування імпульсів дає змогу добитися лінійності регулювальних характеристик вентильних перетворювачів.

Ключові слова: випрямляч, система імпульсно-фазового керування, тиристор, регулювання напруги.

В.В. Лышук, Н.Н. Евсюк, И.Р. Селепина, С.А. Мороз, С.П. Литковец. Импульсно-фазовое управление в электротехнических устройствах. В статье предложен импульсно-фазовый способ регулирования напряжения в электротехнических устройствах. Предложенная синхронная система импульсно-фазового управления с вертикальным управлением позволяет повысить быстродействие при регулировании напряжения в электротехнических устройствах и формировать необходимые углы управления тиристорами. Предложенный генератор пилообразного опорного напряжения для формирования импульсов позволяет добиться линейности регулировочных характеристик вентильных преобразователей.

Ключевые слова: выпрямитель, система импульсно-фазового управления, тиристор, регулировка напряжения.

V.V. Lyshuk, M.M. Yevsiuk, Y.R. Selepyna, S.A. Moroz, S.P. Litkovets'. Pulse-phase control in electrical devices. The article proposes a pulse-phase method of voltage regulation in electrical devices. The proposed synchronous system of impulse-phase control with vertical control makes it possible to increase the speed of the voltage regulation in electrical devices and to form the necessary angles of thyristor control. The proposed sawtooth reference voltage generator for pulse shaping makes it possible to achieve linearity of the regulating characteristics of valve converters.

Key words: rectifier, pulse-phase control system, thyristor, voltage regulation.

Постановка наукової проблеми. На сьогодні з усіх видів енергій найбільш широке застосування має електрична енергія. Її переваги полягають в тому, що вона легко трансформується в інші види енергії, а саме (механічну, теплову, світлову тощо). Її можна пересилати на великі відстані, розподіляти по приймачах, змінювати параметри (величину напруги, число фаз тощо).

Змінний синусоїдний струм знаходить широке застосування на виробництві, в сільському господарстві і промисловості. Це зумовлено тим, що змінний трифазний струм дає змогу легко отримувати обертове магнітне поле, яке застосовується в приводних електродвигунах змінного струму. Також, якщо говорити про змінний струм, то така його форма і промислова частота дають змогу отримати найвищі значення ККД і оптимальні розміри електрообладнання [1, 3, 5].

Поряд зі змінним струмом широко використовується і постійний струм. Тут основними споживачами є обладнання для зарядки акумуляторних батарей, установки електролізу для отримання технічно чистих металів, установки цинкування металів, здатних до корозії, електроживлення кіл керування силовими схемами, і наймасовіше – це застосування двигунів постійного струму в промисловості і на електротранспорті [4].

Розвиток напівпровідникової електроніки призвів до створення керованих напівпровідникових пристроїв, які відрізняються від інших апаратів, наприклад електромагнітних, високою швидкістю, низькою споживаною потужністю та малими габаритами, чутливістю, надійністю, економічністю і широкими можливостями перетворення інформації. Застосування електронних ключів, зокрема тиристорів в однофазних чи трифазних схемах випрямлення, а також інших пристроях (тиристорні регулятори напруги) є дуже ефективним в схемах комутації, регулювання і трансформації напруги.

Найбільш перспективним на сьогодні щодо надійності, швидкодії та універсальності є використання керованих випрямлячів. Подаючи імпульси керування з деякою затримкою щодо

моментів природного ввімкнення, що визначаються кутом управління α , можна регулювати значення випрямленої напруги. На даний час найбільшого поширення набули керовані випрямлячі з імпульсно-фазовим методом регулювання вихідної напруги.

Будь-яка із схем випрямлячів може працювати в режимі керованого випрямляча, якщо замінити діоди на тиристори, момент ввімкнення яких забезпечується СІФК. Її необхідно проектувати або вибирати, зважаючи на діапазон та плавність регулювання, коефіцієнт потужності та ККД [2, 3].

Аналіз досліджень. Система керування випрямлювальним пристроєм призначена для генерації і формування електричних імпульсів керування визначеної тривалості та форми, з однієї сторони, а з іншої, що головне, правильно подавати їх у відповідні фази і змінювати моменти подачі цих імпульсів на керуючі електроди тиристорів з метою регулювання вихідної напруги [1, 2].

Основними областями застосування керованих тиристорних систем є:

- безконтактний захист і керування електротехнічними пристроями, зокрема й побутовими електричними машинами;

- системи регулювання частоти обертання і забезпечення оптимальних режимів електричних машин малої потужності шляхом регулювання напруги;

- системи регулювання температури і сили світла, зарядні пристрої тощо.

Моменти подачі імпульсів часу задаються величиною напруги керування U_k , яка подається на вхід СІФК і визначає значення вихідних параметрів перетворювача, а саме середніх або діючих значень струму і напруги на виході випрямляча. Отже, в залежності від величини напруги керування U_k , визначаються кути відкриття тиристорів α . Визначення моментів часу подачі імпульсів на керуючі електроди тиристорів та формування цих імпульсів реалізується двома основними блоками СІФК: фазозсуваючого пристрою (ФЗП) та формувача імпульсів (ФІ) (рис.1).

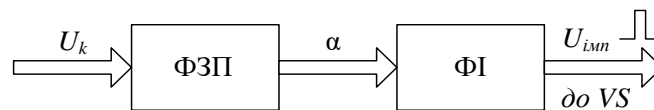


Рис.1. Структурна схема СІФК.

Фазозміщуючий пристрій формує задачу перетворення напруги керування в керуючий сигнал (кут α), тобто електричної величини у часову.

Формувачі імпульсів формують імпульси на керуючих електродах тиристорів заданої тривалості, форми і потужності, а також забезпечують силову гальванічну розв'язку між силовим колом і колом керування.

Вимоги до СІФК:

1. Тривалість і амплітуда імпульсів визначаються відповідно до параметрів застосовуваних ключів, режимами роботи перетворювача і повинні бути достатніми для надійного відкриття ключів перетворювача. Амплітуди напруги і струму для імпульсу повинні складати $U = 5 \div 10$ В, $I = 0,1 \div 0,5$ А.

2. Діапазон регулювання кута відкриття α вентилями визначається типом перетворювача, режимом його роботи (безперервний або переривчастий),

характером навантаження (R або $R-L$) і повинен бути достатній для регулювання вихідної напруги в заданому діапазоні.

3. Висока крутизна переднього фронту імпульсу керування (до 10 В/мкс);

4. Довготривалість імпульсу повинна бути такою, щоб за час його дії анодний струм тиристора досяг значення, що перевищує струм утримання тиристора. Як правило в сучасних СІФК $\tau \approx 10^\circ$ (ел. град.)

5. Асиметрія відкриваючих імпульсів не повинна перевищувати 3° . У протилежному випадку збільшується асиметрія струму та додаткові втрати в колах навантаження [3].

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. В роботі зосередимо увагу на розробці та аналізі СІФК, що керують однофазними випрямлячами та регуляторами напруги і живлять навантаження невисокої потужності. Тобто, у нас виникає задача спроектувати СІФК, яка б задовольняла швидкодію щодо регулювання потрібного значення напруги для відповідного електроустаткування та вироблення необхідних кутів керування тиристорами.

Насьогодні наявна така класифікація СІФК. За можливістю синхронізації з джерелом живлення СІФК або фазозміщуючі пристрої ФЗП поділяють на синхронні та асинхронні, за кількістю фаз перетворювача на однофазні, трифазні та багатофазні, за принципом зсуву керуючого імпульса в

синхронних СІФК на горизонтальні та вертикальні, за числом формування каналів керування – одноканальні та багатоканальні, за способом опрацювання інформації – аналогові та цифрові [3, 4].

Багатоканальні забезпечують швидкодію системи щодо регулювання вихідних параметрів і використовуються в однофазних та трифазних мостових схемах, але є дещо дорожчими із-за збільшення каналів керування та електронних елементів у них.

Як говорилось вище існують синхронні та асинхронні СІФК. Синхронні СІФК характеризуються тим, що кожний канал n -фазної СІФК синхронізується з синусоїдною напругою джерела живлення. Це найбільш поширений спосіб. У синхронному ФЗП кут керування у відповідності з фазовою характеристикою фіксується для кожного з тиристорів від моменту природного ввімкнення.

Інший спосіб фіксація фази ввімкнення від моменту переходу напруги джерела через нуль. Таким чином, фаза подачі k -го імпульсу становить

$$\alpha = \alpha_n + \frac{2\pi}{p}(k-1) + q_k(U_{кер}). \quad (1)$$

Тут $2\pi/p$ – інтервал повторюваності вихідних напруг і струму, α_n – початковий кут відліку фази по відношенню до напруги джерела, p – кількість пульсацій перетворювача, q_k – регульований кут затримки $q_k = \omega t_k$, де $k=1,2,3\dots$

Синхронні ФЗП виконуються багатоканальними, одноканальними та комбінованими. «При асинхронному керуванні імпульси керування формуються спеціальною слідкуючою замкненою системою регулювання, синхронізація з мережею відсутня. Використовується така система при високій ймовірності завад. Тобто при такому керуванні момент подачі керуючого імпульсу від системи керування на наступний тиристор відрховується від моменту подачі попереднього імпульсу» [5]. В усталеному стані імпульси слідують з інтервалом повторюваності, тобто

$$\alpha_k = \alpha_{k-1} + \frac{2\pi}{p} + \Delta\alpha_k, \quad (2)$$

де $\Delta\alpha_k$ – приріст кута керування в перехідних станах.

На рис.2 показано структурну схему СІФК з горизонтальним керуванням. «При горизонтальному способі керування керуючого імпульсу здійснюється в момент час, коли синусоїда напруги живлення переходить через нульове значення, а зміна її фази забезпечується зміною фази синусоїдної напруги керування, тобто зміщенням його по горизонталі (вісь часу t). Така система є синхронною» [5].

Її характерною особливістю є наявність каналу синхронізації роботи СІФК з напругою мережі. Напруга синхронізації використовується для формування опорної напруги. Це забезпечує фазування керуючих імпульсів відносно напруги мережі. Крім напруги синхронізації, до входу СІФК подається керуюча напруга, яка зазвичай є пропорційною бажаній випрямленій напрузі [3].

Генератор змінної напруги ГЗН генерує синусоїдну напругу, що знаходиться в певному фазовому співвідношенні напругою на аноді тиристора даного каналу, а саме зсунуто на 90° відносно напруги мережі (рис.3, а). Зсув опорної напруги $U_{мфн}$, що є опорною напругою $U_{оп}$, на виході фазообертаючого пристрою відносно напруги ГЗН пропорційний величині напруги керування u_z (з урахуванням її знака), яка подається до іншого входу МФП. Формувач імпульсів у момент змінзнака опорної напруги з «-» на «+» формує короткий керуючий імпульс, що після підсилення подається на керуючий електрод тиристора. На рис.3,а зображені діаграми напруг у СІФК при нульовій керуючій напрузі (зсув опорної напруги відсутній, кут керування $\alpha=90^\circ$, середня випрямлена напруга близька до нуля). На рис.3,б керуюча напруга більша від нуля, опорна напруга зсунута ліворуч, $\alpha < 90^\circ$, середня випрямлена напруга більша, ніж у попередньому випадку [3].

Аналізуючи горизонтальний спосіб керування можна констатувати, що кут керування визначається зміщенням в часі синусоїдної або напруги. Відбувається або зміщення заднього фронту кривої напруги або напруги в цілому. Слід відмітити, що це зміщення відбувається у функції керуючого сигналу і яке дещо знижує швидкодію системи керування.

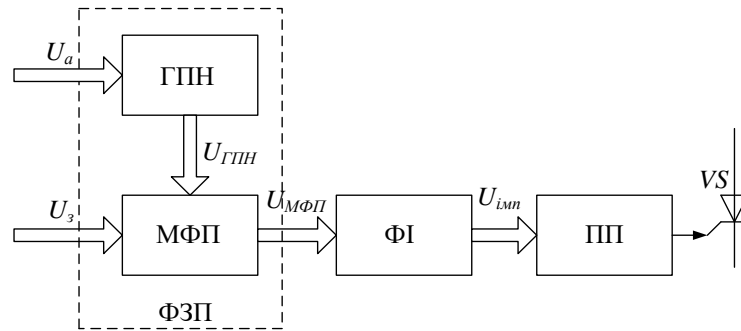


Рис.2. Структурна схема СІФК з горизонтальним керуванням.

З виходу мостового фазообертального пристрою МФП зсунута за фазою напруга керування $U_{мфп}$ надходить на формувач імпульсів ФІ, де в момент переходу синусоїди через нуль генерується імпульс керування. Потім імпульс керування $U_{имп}$ підсилюється підсилювачем потужності ПП до значення, необхідного для надійного керування тиристора VS. Кут зсуву фаз (рис.3, б) регулюється зміною напруги завдання U , а ГПН і МФП в сукупності утворюють фазозміщуючий пристрій ФЗП.

Горизонтальний метод управління не знайшов широкого застосування, тому що мостові фазообертаючі пристрої чутливі до форми і частоти напруги, що подається, а використання в якості активного регульованого опору транзисторів призводить до порушення симетрії формованих імпульсів.

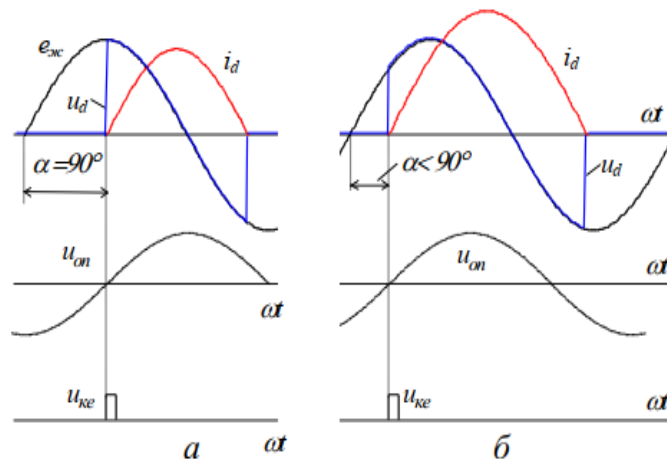


Рис.3. Процеси в СІФК при горизонтальному керуванні.

Вертикальний спосіб набув широкого застосування в системах регулювання вихідних параметрів у керованих тиристорах. Він легко може адаптуватись до перебудови з одноканальних систем до багатоканальних.

При вертикальному способі напруга керування порівнюється за величиною з опорною. Опорна напруга може бути косинусоїдною та пілкоподібними з наростанням та спаданням напруг.

При косинусоїдній формі зміни маємо

$$U_{оп} = U_{max} \cos \omega t, \quad (3)$$

де $\omega t = 0$ – момент природної комутації i -го вентиля.

Тоді в момент $\omega t = \alpha$ маємо:

$$U_{оп} = U_{кер} = U_{max} \cos \alpha. \quad (4)$$

З цього рівняння можна отримати фазову характеристику ФЗП:

$$\alpha = \arccos \left(\frac{U_{кер}}{U_{max}} \right). \quad (5)$$

Вентильний перетворювач, що працює від синусоїдної симетричної мережі, при відсутності комутаційних спотворень вихідної напруги, в режимі безперервного струму навантаження характеризується відомим співвідношенням, так званою регулювальною характеристикою:

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

При підстановці виразу (6) в рівняння (5) отримуємо:

$$U_d = \frac{U_{d0}}{U_{max}} \cdot U_{кер}. \quad (7)$$

Отже, регулювальна характеристика $U_d = f(U_{кер})$ вентильного перетворювача при косинусоїдній опорній напрузі, має лінійний характер. Опорна напруга косинусоїдної форми, може бути сформована від напруги джерела. Для цього напруга джерела повинна бути надійти на фільтр Φ , що здійснить зсув по фазі і усунення вищих гармонійних складових [3, 4].

В даному випадку використовуємо генератор пилкоподібної наростаючої напруги ГПН. Остання напруга повинна бути синхронізована з напругою мережі. Момент їх рівності визначає фазу (кут керування) та керуючий імпульс.

Розглянемо структурну схему одноканальної СІФК при вертикальному керуванні, зображену на рис.4. Назва «вертикальний» пов'язана з тим, що напруга керування ковзає по вертикалі і може перетинати опорну напругу в різні моменти часу й тим самим змінювати кут керування.

Блок живлення призначений для генерування як змінної синусоїдної напруги для синхронізуючого пристрою, так і фіксовану постійну ± 12 В для живлення ГПН, як основного елемента фазозміщуючого пристрою, формувача імпульсів ФІ, підсилювача імпульсів П.

Пристрій синхронізації ПС забезпечує зв'язок з джерелом живлення. ПС відслідковує переходи через нуль напруги живлення ($U_{синх}$) і формує у випадку багатоканальних СІФК сигнали U_1 і U_2 , що відповідають додатнім та від'ємним півперіодам напруги джерела живлення [3].

На вхід фазозміщуючого пристрою ФЗП поступає напруга з пристрою синхронізації ПС, що масштабує сигнал вхідного струму, через фільтр Φ поступає змінна напруга. Призначення фільтра виділити першу гармоніку та сформувати зсув за фазою $\varphi < 10^0$.

У ролі електронного ключа K може бути використаний транзистор, що працює з частотою комутації 50 Гц або з частотою 100 Гц у випадку двоканальної СІФК. У даному випадку співвідношення між напругами на вході (з фільтра) та опорною напругою приймає вигляд

$$U_{оп} = \frac{1}{RC} \int_0^t U_{BX} dt = U_{BX} \frac{t}{\tau}. \quad (8)$$

Звідси

$$U_{оп}(t) = U_{ГПН}(t) = U_{BX}(t) \cdot \frac{t}{\tau_{им}} = U_{BX}(t) \cdot \frac{\alpha}{\omega_0 \cdot \tau_{им}} = U_{BX}(t) \cdot \frac{\alpha}{\pi}, \quad (9)$$

де $\tau_{им} = RC$ – тривалість імпульсу, $t = \alpha / \omega_0$.

Підставляючи кут α , отримаємо такий закон керування

$$\alpha = k U_{кер}, \quad (10)$$

де $k = \omega_0 \tau_{им} / U_{BX}$.

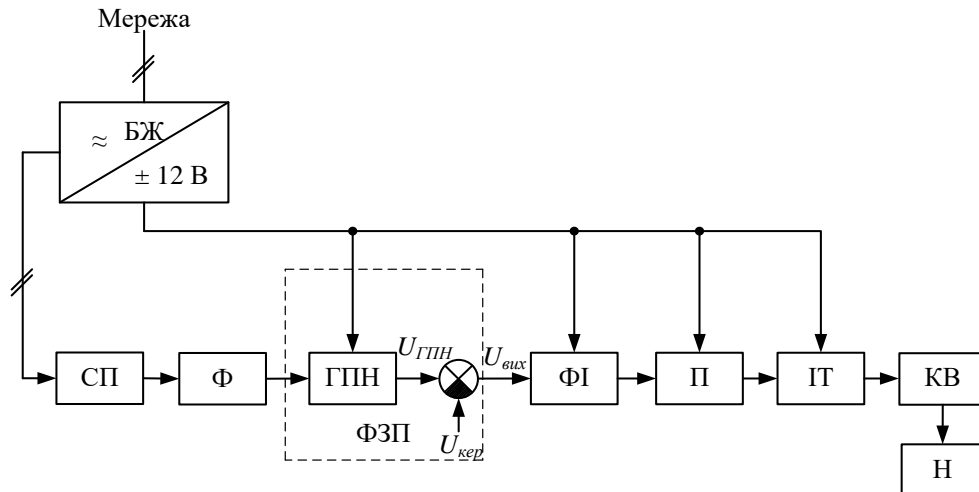


Рис.4. Структурна схема одноканальної СІФК з вертикальним керуванням.

Таким чином, завдання СІФК є інформаційною задачею та зводиться до перетворення керуючого сигналу (наприклад, напруги входу) у часову величину – кут керування α .

Напруга з ГПН починає формуватися в початковий момент проходження синусоїди напруги через нуль ($t=0$) і закінчується в момент часу $t = \pi$.

Така тривалість напруги ГПН забезпечує діапазон зміни фази імпульсу керування, що дорівнює половині періоду напруги мережі. При невеликих змінах кута фази $\alpha < 20^\circ$ можна обійтись без ГПН, використовуючи для формування імпульсу керування вхідну напругу синусоїдальної форми з фільтра Ф. При рівності на суматорі напруг $U_{ГПН}$ та $U_{кер}$ на формувач імпульсів ФІ надходить сигнал, а він формує імпульс певної тривалості, тобто кут α визначається точкою порівняння цих напруг. На схемі суматор інтерпретується компаратором.

Підсилювач П, побудований на транзисторі, забезпечує підсилення керуючого імпульсу для гарантованого відкриття тиристорів. Імпульсний трансформатор ІТ працює з завадоусуваючим фільтром. Керований випрямляч КВ (тиристор) регулює постійну напругу на навантаженні Н [3].

Якщо розглядати двоканальні схеми керування, наприклад однофазну мостову схему, то тут після формувача імпульсів ФІ слід розмістити розподільвачі імпульсів PI_1 , PI_2 , побудовані на логічних елементах «І».

Завдяки елементам «І» в силовому колі забезпечується по чергове відкриття пар тиристорів при появі на керуючому електроді імпульсу. Знак напруги джерела закладений у напругах компараторів, що входять вже до видозміненого пристрою синхронізації ПС. Тому імпульс проходить тільки через той елемент «І», на одному з входів якого вже присутній додатній потенціал. Таким чином, керуючий імпульс по черзі (раз за період) надходить дотієї чи іншої пари тиристорів.

«Підсилювачі П призначені для підсилення сформованого імпульсу до рівня, придатного до відкриття тиристора. Потенційні розв'язки ПР забезпечують гальванічну розв'язку силового кола та системи керування. Вихід імпульсних трансформаторів під'єднаний до керуючих електродів тиристорів, що ввімкненні в діагоналі моста керованого випрямляча. Тобто тут відбувається попарне відкриття тиристорів. Для захисту від появи на керуючому електроді від'ємного потенціалу необхідно в його коло ввімкнути в потрібній полярності діод» [5].

На рис.5 показано часові діаграми одноканальної СІФК з вертикальним керуванням.

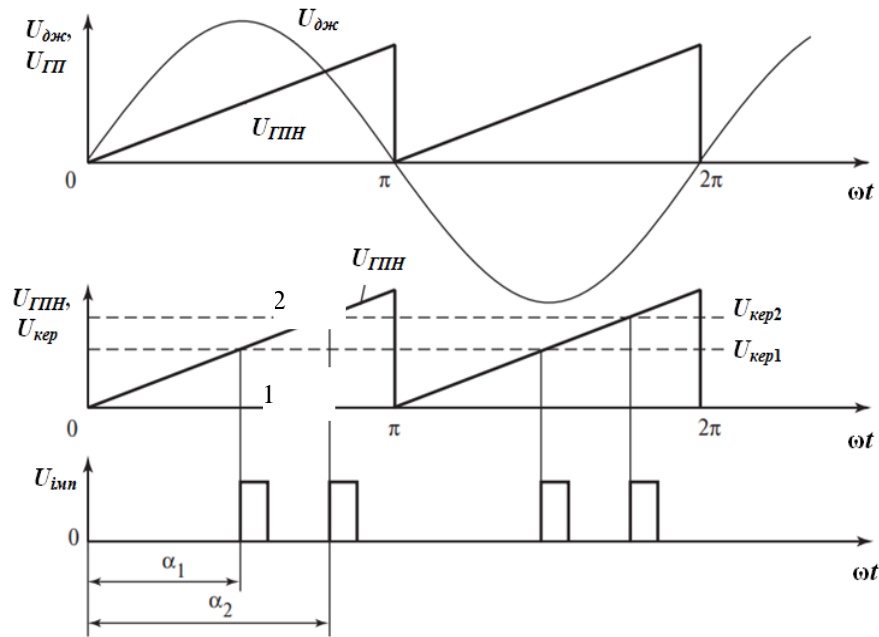


Рис.5. Діаграми роботи СІФК при вертикальному способі керування.

Як видно з діаграми при $U_{кер1}$ формується керуючий імпульс, що відповідає куту керування α_1 (точка 1). Якщо $U_{кер}$ збільшити до значення $U_{кер2}$, то пілкоподібна напруга пізніше досягає цього значення, відповідно й пізніше сформується керуючий імпульс з кутом α_2 (точка 2). Кут керування при цьому збільшиться, а вихідна напруга зменшиться.

Таким чином, вертикальний спосіб керування дає змогу отримати лінійні регульовальні характеристики вентильного перетворювача.

Висновки та перспективи подальшого дослідження. У роботі проведено аналіз способів і методів регулювання електричних параметрів, визначено роль і місце систем керування в області силової електроніки. Обґрунтовано фізичні основи імпульсно-фазового керування тиристорами. Вибрано синхронну систему імпульсно-фазового керування з вертикальним способом, як просту в реалізації з мінімальним набором електронних елементів. Запропонований вертикальний спосіб керування тиристорами для регулювання напруги дає змогу отримати різні характеристики, зокрема регулювання частоти обертання різного електроінструменту, виконавчих електродвигунів малої та середньої потужності.

Список бібліографічного опису

1. Казачковський М.М. Керовані випрямлячі: Навчальний посібник / М.М. Казачковський. – Дніпропетровськ, 1999. – 229 с.
2. Маковский А. Л. Силовые преобразователи электрической энергии в технических системах управления : учеб. пособие / А. Л. Маковский. – Минск, 2018. – 252 с.
3. Попков О.З. Основы преобразовательной техники : учеб. пособие для вузов / О.З. Попков. – М. : Издательский дом МЭИ, 2010. – 200 с.
4. Руденко В.С. Преобразовательная техника / В.С. Руденко, В.І. Сенько, І. М. Чиженко.– К.: Вища школа, 1978. – 424 с.
5. Савюк Т.В. Система імпульсно-фазового керування для джерел регульованої напруги / Т.В. Савюк // Випускна кваліфікаційна робота магістра. – Луцьк, Луцький НТУ, 2020. – 86 с.

Referenses

1. Kazachkovsky M.M. Controlled rectifiers: Textbook / M.M. Kazachkovsky. - Dnipropetrovsk, 1999. - 229 p.
2. Makovsky A.L. Power converters of electric energy in technical control systems: textbook. manual / AL Makovsky. - Minsk, 2018. - 252 p.
3. Popkov O.Z. Fundamentals of conversion technology: textbook manual for university / O.Z. Popkov. - M.: Publishing house MEI, 2010. - 200 p.
4. Rudenko V.S. Conversion technology / V.S. Rudenko, V.I. Senko, I.M. Chizhenko. - Kyiv.: Higher school, 1978. - 424 p.
5. Savyuk T.V. Pulse-phase control system for regulated voltage sources / T.V. Savyuk // Graduation thesis of the master. – Lutsk, LNTU, 2020. - 86 p.