

**ПРОЕКТУВАННЯ СИЛОВИХ ТРАНЗИСТОРНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ  
ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ****В. О. Мельников**Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: melnykow@gmail.com

Однією з невід'ємних частин сучасних мехатронних модулів руху, в яких електричні двигуни забезпечують перетворення електричної енергії в корисну механічну дію, є силові напівпровідникові перетворювачі. На сьогоднішньому етапі розвитку промисловості використання перетворювачів енергії на повністю керованих напівпровідникових ключах відкриває широкі можливості при розробці та впровадженні високоефективних ресурсо- та енергозберігаючих пристроїв. В системах автоматизованого електропривода постійного струму широкого застосування знайшли два типи перетворювачів: керовані тиристорні випрямлячі та широтно-імпульсні перетворювачі постійної напруги, основу принципу дії яких складає ключовий режим роботи регулюючого напівпровідника, за допомогою якого здійснюється періодичне підключення напруги джерела до вихідного кола перетворювача. В роботі представлено лабораторний зразок силового напівпровідникового перетворювача енергії постійного струму, що може забезпечити надійну роботу електродвигуна як в двигунному, так і гальмівному режимах роботи. Представлений транзисторний перетворювач енергії містить дві основні частини: перша частина виконує головну – керуючу роль, до складу якої входить блок керування, мікроконтролер, та пристрій відображення поточної інформації. Друга ж частина представляє собою силовий модуль, до складу якого входять необхідні джерела живлення, драйвери керування та силові транзисторні ключі перетворювача. Для можливості отримання високих показників якості перехідних процесів системи електропривода схема оснащена додатковими датчиками струму, напруги та швидкості, які можуть брати участь у формуванні керуючого сигналу та при організації систем захисту від перенапруг та сплесків струму. В роботі обґрунтовано параметри складових частин та розроблено технічні рішення побудови мікропроцесорної системи керування транзисторним перетворювачем енергії постійного струму. Показано, що для забезпечення сталою генераторного режиму в системах автоматизованого електропривода, в яких первинним перетворювачем енергії є некерований випрямляч, в ланці постійного струму доцільно встановлювати коло скидання енергії.

**Ключові слова:** двигун постійного струму, перетворювач енергії, гальмівний режим, коло скидання енергії.

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИЛОВЫХ ТРАНЗИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ  
ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА****В. А. Мельников**Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: melnykow@gmail.com

Одной из неотъемлемых частей современных мехатронных модулей движения, в которых электрические двигатели обеспечивают преобразование электрической энергии в полезное механическое действие, являются силовые полупроводниковые преобразователи. На сегодняшнем этапе развития промышленности использования преобразователей энергии на полностью управляемых полупроводниковых ключах открывает широкие возможности при разработке и внедрении высокоэффективных ресурсо- и энергосберегающих устройств. В системах автоматизированного электропривода постоянного тока широкого применения нашли два типа преобразователей: управляемые тиристорные выпрямители и широтно-импульсные преобразователи постоянного напряжения, в основе принципа действия которых лежит ключевой режим работы регулирующего полупроводника, с помощью которого осуществляется периодическое подключение напряжения источника питания к выходной цепи преобразователя. В работе представлены лабораторный образец силового полупроводникового преобразователя энергии постоянного тока, который может обеспечить надежную работу электродвигателя как в двигательном, так и тормозном режимах работы. Представленный транзисторный преобразователь энергии содержит две основные части: первая часть выполняет главную – управляющую роль, в состав которой входит блок управления, микроконтроллер, и устройство отображения текущей информации. Вторая часть представляет собой силовой модуль, в состав которого входят необходимые источники питания, драйверы управления и силовые транзисторные ключи преобразователя. Для возможности получения высоких показателей качества переходных процессов системы электропривода схема оснащена дополнительными датчиками тока, напряжения и скорости, которые могут участвовать в формировании управляющего сигнала и при организации систем защиты от перенапряжений и всплесков тока. В работе обоснованы параметры составных частей и разработаны технические решения построения микропроцессорной системы управления транзисторным преобразователем энергии постоянного тока. Показано, что для обеспечения устойчивого генераторного режима в системах автоматизированного электропривода, в которых первичным преобразователем энергии является неуправляемый выпрямитель, в звене постоянного тока целесообразно устанавливать цепь сброса энергии.

**Ключевые слова:** двигатель постоянного тока, преобразователь энергии, тормозной режим, цепь сброса энергии.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Розвиток силових напівпровідників призвів до широкого впровадження силової електроніки у всі області електротехніки. Враховуючи постійно зростаючу тенденцію до впровадження заходів щодо економії ресурсів (енергозбереження), використання відновлюваних джерел енергії (енергія вітру та фотоелектрична енергія) та потреба в альтернативному паливі (електричні та гібридні приводи для транспортних засобів), прогрес у розвитку напівпровідників має все більше значення. На рис. 1 показано максимальні значення струму та напруги керованих силових напівпровідників, що представлені на сьогодні на ринку [1, 2].

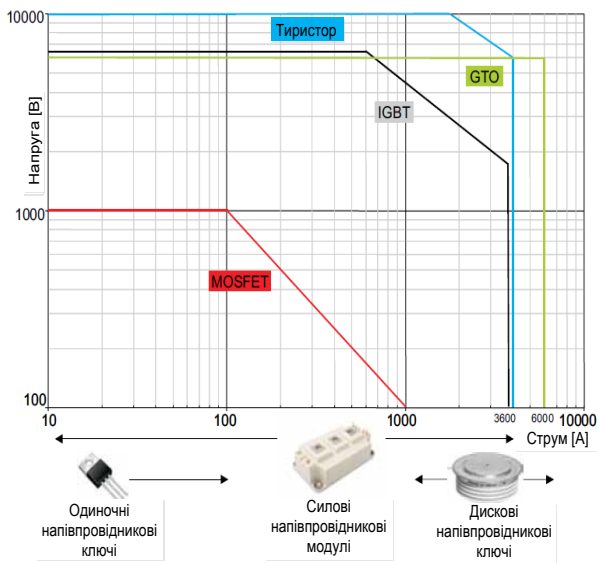


Рисунок 1 – Максимальні значення струму та напруги силових напівпровідникових ключів

Для живлення споживачів електричної енергії, які потребують регулювання підведеної до них постійної напруги, широкого застосування знайшли широтно-імпульсні перетворювачі. Основу принципу дії такого перетворювача складає ключовий режим роботи регулюючого напівпровідника, за допомогою якого здійснюється періодичне підключення напруги джерела до вихідного кола перетворювача [3]. При цьому тривалість такого підключення можна змінювати, регулюючи тим самим середнє значення підведеної до навантаження напруги.

Імпульсні перетворювачі найбільшою мірою задовольняють основним вимогам, які ставлять до напівпровідникових перетворювачів систем електропривода і застосовуються в тих випадках, коли на перше місце ставлять високі показники економічності, надійності, малих габаритів, малої чутливості до коливань температури, високої гнучкості та точності регулювання. В свою чергу застосування в таких перетворювачах в якості силових ключів Mosfet та IGBT транзисторів з високими частотами перемикання дозволяє

підвищити динамічну точність відтворення вхідних заданих впливів, підвищити швидкодію і поліпшити інші показники якості замкнутих систем автоматичного регулювання електроприводів постійного струму та створює умови їх використання для керування технологічними процесами з підвищеними вимогами до систем електропривода.

Мета роботи – дослідження режимів роботи та розробка технічних рішень побудови мікропроцесорної системи керування транзисторним перетворювачем постійного струму.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Сучасні широтно-імпульсні перетворювачі можна поділити на: нереверсивні, що перетворюють напругу на імпульсну з постійною амплітудою й полярністю, але з різною тривалістю; реверсивні, що перетворюють напругу на імпульсну з постійною амплітудою, різною тривалістю й полярністю за один період. При цьому, для формування сигналів керування існує два способи [4, 5]:

– широтно-імпульсна модуляція (ШІМ) характеризується тим, що середнє значення вихідної напруги змінюється за рахунок співвідношення між часом імпульсу  $t_{im}$  і часом паузи між ними  $t_n$  при постійному періоді  $T = const$ , тобто при постійній частоті комутації ключа  $f_{im} = 1/T = const$ ;

– частотно-імпульсна модуляція (ЧІМ) характеризується тим, що ширина імпульсу (або паузи) залишається постійною, а частота проходження імпульсів є змінною величиною  $f_{im} = 1/T = var$ .

В окремих випадках може використовуватись комбінація із цих двох методів.

*Керування імпульсними перетворювачами*

На практиці, для вирішення задачі керування двигуном постійного струму, найбільш широкого розповсюдження набули імпульсні перетворювачі, силова частина яких побудована на основі мостової схеми (рис. 2). В залежності від обраного методу керування силовими ключами схеми така система розширює можливості по регулюванню швидкості двигуна, так як в такому випадку регулювання можна проводити у всіх чотирьох квадрантах [6].

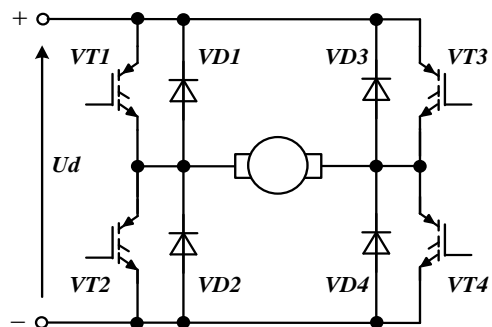


Рисунок 2 – Мостова схема перетворювача енергії

В реверсивних перетворювачах найбільш широкого застосування знайшли три способи керування ключами: симетричний, несиметричний та почерговий [7]. На практиці також можуть застосовуватися деякі модифікації зазначених законів керування [8]. Але у будь-якому з перерахованих методів керування можна виділити дві основні фази роботи, це: період корисної роботи, та період неробочого ходу. Період виконання корисної роботи при усіх законах керування виглядає майже однаково, і зводиться до того, що один з транзисторів верхнього плеча одного напівмоста та протилежний йому (по діагоналі) транзистор нижнього плеча іншого напівмоста відкриваються, і таким чином через навантаження починає протікати струм. Період неробочого ходу також реалізується завдяки комбінаціям відкритих та закритих транзисторів. Саме від обраного закону керування залежить те, струм якої величини та на протязі якого часу буде протікати через ті чи інші елементи схеми.

Одним із найбільш розповсюджених методів керування мостовим ШПІ є *симетричний метод керування чи «фіксована протифаза» (Lock anti-phase drive)* [9]. Його основною перевагою є те, що він дозволяє майже повністю виключити протікання струму через зворотні діоди, що позитивно відображається на теплових втратах схеми. Принцип роботи перетворювача при симетричному керуванні базується на підключенні навантаження під час неробочого ходу до напруги протилежної полярності. Тобто, якщо в робочому режимі відкриті транзистори  $VT2$  та  $VT3$ , то у момент неробочого ходу відкриваються транзистори  $VT1$  та  $VT4$  (рис. 3).

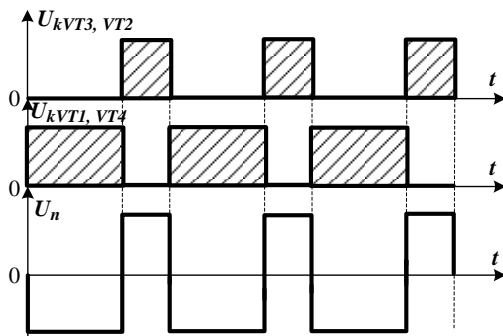


Рисунок 3 – Симетричний спосіб керування

Недоліком такого способу керування є зміна знаку миттєвих значень вихідної напруги що призводить до зміни напрямку протікання струму, і, як наслідок, виникнення моменту двигуна, протилежного основному. Модифікацією симетричного методу керування є *метод активного зменшення поля (Active field-collapse drive)* [10], принцип роботи якого ґрунтується на підключенні навантаження під час періоду неробочого ходу до напруги протилежної полярності, що дозволяє дуже

швидко зменшувати залишкове магнітне поле (рис. 4). Але на відміну від попередньої реалізації закону керування, струм навантаження протікаючи у зворотному напрямку в даному випадку не досягає великих значень.

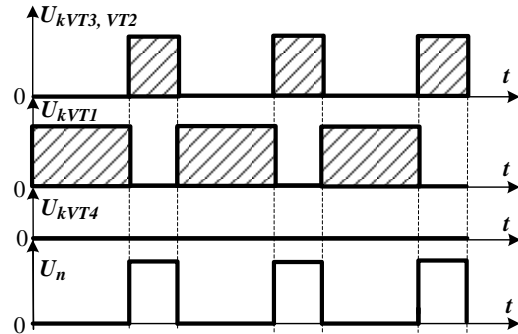


Рисунок 4 – Метод активного зменшення поля

У період виконання корисної роботи транзистори  $VT2$  та  $VT3$  відкриті. У період неробочого ходу обидва транзистори закриваються і відкривається транзистор  $VT1$ . Це призводить до того, що діод  $VD4$  починає проводити струм, і тим самим інтенсивно зменшувати залишкове поле. Недоліком даного методу є те, що у період неробочого ходу обмотка двигуна буде під'єднана до плюсової шини, а значить двигун буде продовжувати обертатися. В той самий час проти ЕРС двигуна буде відкривати діод  $VD3$ , утворюючи короткозамкнутий контур, який буде підтримувати залишкове поле.

Порівняно з симетричним керуванням, при якому струми у зворотних діодах майже нульові, метод активного зменшення поля передбачає деяке навантаження на діоди  $VD4$  та  $VD3$ .

Керування транзисторами мостового перетворювача може бути забезпечено також використанням *несиметричного методу керування (Sign/Magnitude)* [9]. В даному випадку мають бути відкритими два транзистори на протилежних кінцях діагоналі моста  $VT2$  та  $VT3$  (рис. 5). Протягом періоду неробочого ходу транзистор верхнього плеча залишається відкритим, а транзистор нижнього – закривається. Струм у колі продовжує текти зберігаючи свій напрям через транзистор  $VT3$  та зворотний діод  $VD1$ . Як тільки струм стане рівним нулю, діод  $VD1$  закриється, і на виводах двигуна встановиться напруга на рівні проти ЕРС.

Діод  $VD1$  проводить струм з моменту його найбільшого значення, і проводить його майже протягом усього циклу керування. Це означає, що розсіювана діодом тепла енергія досить значна, що є небажаним при роботі перетворювача. Для зменшення навантаження на діод, можна використати модифікований метод несиметричного керування при якому замість транзистора  $VT3$  відкритим протягом усього циклу роботи може залишатися транзистор  $VT2$ . Оскільки

перемикання транзисторного ключа в даному режимі доволі повільне, як і перехідні процеси, що в ньому протікають, починають зростати втрати на перемикання. Через це, частіше використовують перший варіант несиметричного керування.

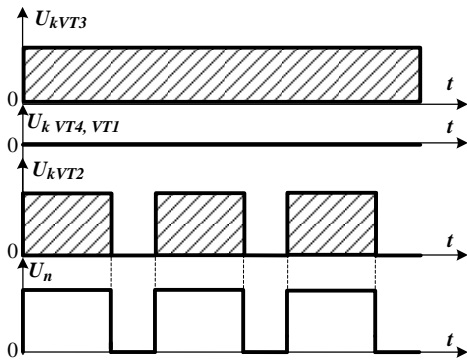


Рисунок 5 – Несиметричний спосіб керування

В свою чергу за *почергового методу* [9] керування відкриваються два ключі, розташовані на протилежних сторонах моста, тоді як друга пара ключів постійно закриті (рис. 6). Якщо керування здійснюється ключами VT1 та VT2, то ключі VT3 та VT4 закриті. При цьому ключі VT1 та VT2 відкриваються не одночасно, як за симетричного керування, а зі зсувом у часі, що дорівнює періоду вихідних імпульсів напруги перетворювача. Таким самим інтервалом визначається й момент закриття цих ключів. У результаті частота роботи кожного ключа у два рази менша, ніж частота вихідної напруги.

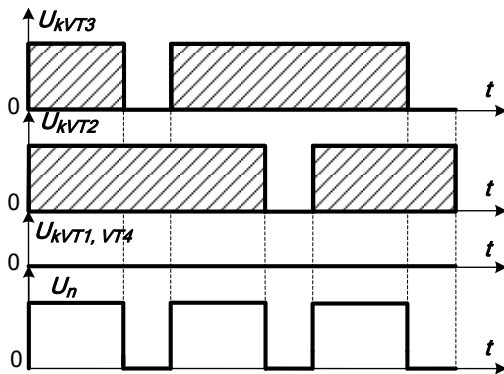


Рисунок 6 – Почерговий спосіб керування

Таким чином за симетричного та несиметричного керування забезпечується двосторонній обмін енергією між джерелом живлення й навантаженням, а за почергового керування – лише в одному – від джерела живлення до навантаження. Виходячи з цього, та з огляду на недоліки симетричного методу керування, що проявляються в зміні знаку миттєвих значень вихідної напруги та виникненні істотних пульсацій напруги на навантаженні, які вносять певні обмеження на використання даного закону

керування, при побудові високоефективної системи електропривода доцільно використовувати несиметричний закон керування.

*Робота в генераторному режимі*

Найбільш розповсюдженим джерелом живлення більшості мехатронних систем є мережа змінного струму, в той час як напруга живлення широтно-імпульсного перетворювача представляється постійною величиною. Для узгодження параметрів мережі живлення та параметрів навантаження, як правило, використовуються некеровані випрямлячі, що можуть бути як однофазними, так і багатозначними [11]. На виході некерованого випрямляча завжди включається конденсатор, який відіграє роль фільтра (рис. 7).

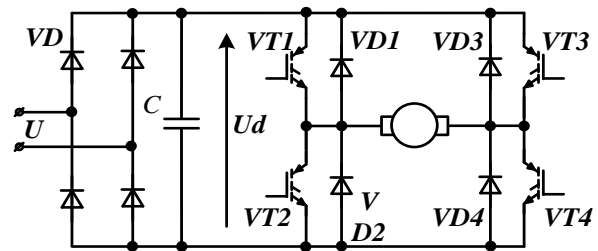


Рисунок 7 – Імпульсний перетворювач

В даному випадку якщо електрична машина, включена на виході перетворювача, працює у робочому режимі, то напруга  $U_d$  на конденсаторі фільтра не перевищує величину проти ЕРС  $E$ , і струм у навантаженні – позитивний, а енергія спрямована від мережі до машини. Якщо електрична машина, включена на виході перетворювача, працює у генераторному режимі, то проти ЕРС перевищує напругу  $U_d$  на конденсаторі фільтра, відповідно струм у навантаженні негативний, а енергія спрямована від машини до джерела струму. У цьому режимі перетворювач енергії повинен створювати шляхи для протікання негативного струму в навантаженні щоб уникнути наростання напруги на конденсаторі вище допустимого рівня. Оскільки вхідний некерований випрямляч не створює шляху для протікання негативного струму і володіє тільки одностороннім енергетичним зв'язком, тому сталий генераторний режим електричної машини в даному випадку не забезпечується.

Для забезпечення сталого генераторного режиму в системах з некерованими випрямлячами в ланці постійного струму може бути встановлено коло скидання енергії [12], схема якого показана на рис. 8. У цій схемі транзисторний ключ VT0 спільно з опором  $R_0$  утворює коло скидання енергії, накопиченої в обертовій частині системи.

Транзистор ввімкнений в замкнуту систему регулювання, на вхід якої подається напруга завдання  $U_0^*$  та напруга зворотного зв'язку  $U_0$  з конденсатора фільтра. При цьому напруга завдання

дорівнює амплітуді лінійної напруги мережі. Коло скидання енергії забезпечує обмеження напруги до тих пір, поки  $I_n \leq U_d/R_0$ . Стабілізація напруги забезпечується застосуванням релейного регулятора в схемі керування.

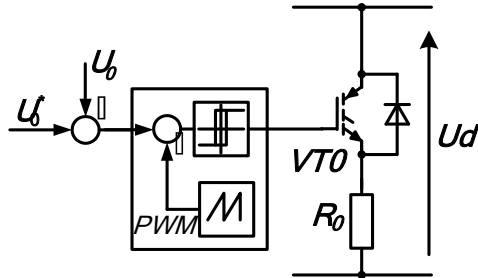


Рисунок 8 – Коло скидання енергії

Дослідження режимів роботи представленого перетворювача проводилося на математичній моделі, в якій в якості закону керування був обраний несиметричний метод. Керування колом скидання енергії забезпечується замкненням за напругою ланки постійного струму контуром, що дозволяє стабілізувати напругу при її збільшенні вище заданої. Для досліджень було обрано двигун типу 2ПН100L, з параметрами:  $P_n = 1,1$  кВт,  $U_n = 220$  В,  $I_n = 6,76$  А,  $n_n = 1500$  об/хв,  $\eta = 0,74$ ,  $R_a = 2,2$  Ом,  $L_a = 0,083$  Гн,  $J = 0,011$ .

Так графіки перехідних процесів за швидкістю та моментом досліджуваного двигуна наведено на рис. 9, де I – пуск двигуна без навантаження; II – робота в режимі неробочого ходу, III, V – робота з номінальним навантаженням, IV – розгін двигуна постійного струму до швидкості більше номінальної (генераторній режим).

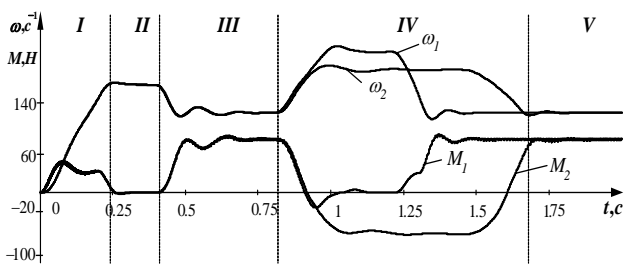


Рисунок 9 – Швидкість та момент двигуна:  
1 – система без використання кола скидання енергії;  
2 – система з використанням кола скидання енергії

Сигнал напруги в ланці постійного струму представленого перетворювача та струму навантаження без та з використанням кола скидання енергії наведено на рис. 10–11.

Проведені дослідження підтверджують доцільність використання кола скидання енергії в ланці постійного струму, використання якого

забезпечує сталий генераторний режим роботи двигуна.

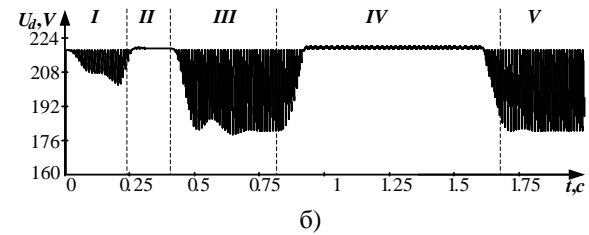
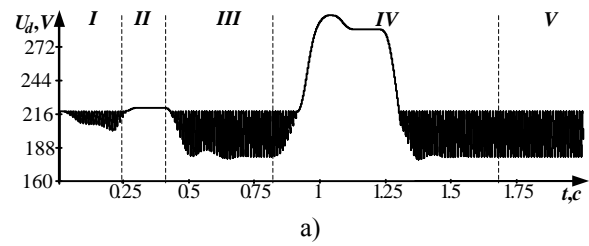


Рисунок 10 – Напруга ланки постійного струму в системі без використання кола скидання енергії (а) та з його використанням (б)

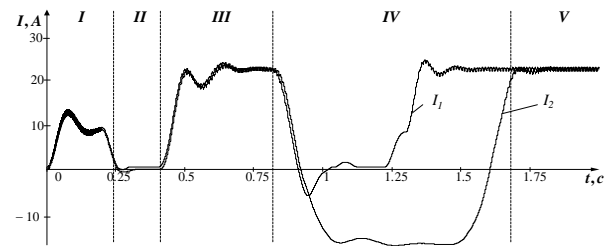


Рисунок 11 – Струм досліджуваного двигуна:  
1 – система без використання кола скидання енергії;  
2 – система з використанням кола скидання енергії

#### Технічна реалізація перетворювача

Важливим питанням при створенні мостового імпульсного перетворювача, є вибір напівпровідникових ключів [13]. Існує безліч факторів, які необхідно враховувати при виборі типу ключа, але основних з них усього декілька, це: максимальний струм навантаження, напруга джерела живлення, а також частота комутації ключів [14].

Основні фактори, що необхідно враховувати при розробці імпульсних перетворювачів наступні.

1. Коли IGBT працює в ключовому режимі, він може мати два стани: відкритий і закритий. У відкритому стані він в тій чи іншій мірі поводить себе як резистор з незначним опором. Очевидно, що чим вище це значення, тим більше втрати енергії на IGBT [15]. Тобто, чим менше значення опору відкритого каналу, тим краще, і тим вище ККД.

2. При виборі транзистора, слід звертати увагу на паразитну ємність конденсатора, від якої суттєво залежить максимальна частота роботи ШПП і втрати на перемикання, і як наслідок, ККД усього

перетворювача. Втрати енергії при перемиканні не так важливі тільки у випадку роботи пристрою на низьких частотах, але при збільшенні частоти ці втрати значно збільшуються, а після певної точки вони стають основним джерелом втрат [16].

3. Слід враховувати обраний закон керування силових ключів, оскільки від нього будуть залежати загальні втрати енергії в перетворювачі. Особливо важливе це питання при роботі перетворювача з навантаженням яке має значну індуктивність.

4. Одна з основних умов правильної роботи мостових перетворювачів полягає в тому, що обидва транзистори одного плеча ні при яких обставинах не можуть бути відкритими одночасно, так як це може стати причиною короткого замикання. Тому необхідно формувати захисну паузу між вимкненням транзистора верхнього плеча та ввімкненням транзистора нижнього плеча (і навпаки).

5. Не менш важливим питанням є вибір способу керування IGBT. Взагалі до схем керування IGBT висуваються наступні вимоги [17]: напруга затвора при вмиканні повинна бути на 15–20 В вище напруги шини живлення; драйвер повинен керуватись логічним рівнем сигналу (0, +5 В), незв'язаним із загальним живленням транзистора; потужність, що розсіює схема керування, повинна бути малою, порівняно з загальною потужністю розсіювання.

Для задачі керування частотою обертання двигуна постійного струму було розроблено транзисторний перетворювач з широтно-імпульсним керуванням, структурна схема якого наведена на рис. 12.

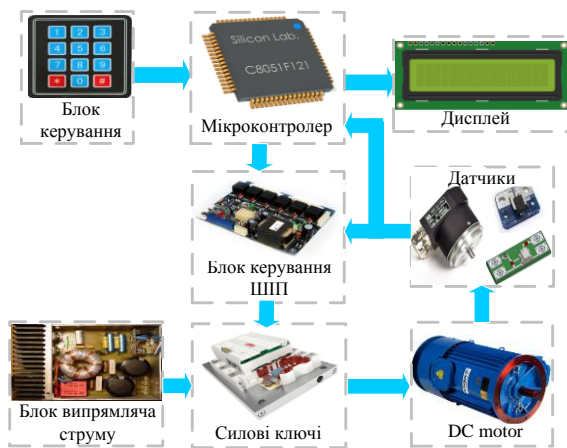


Рисунок 12 – Структурна схема транзисторного перетворювача енергії

Представлений перетворювач містить дві основні частини: перша частина виконує головну – керуючу роль, до складу якої входить блок керування, мікроконтролер, та пристрій

відображення поточної інформації. Друга ж частина представляє собою силовий модуль, до складу якого входять необхідні джерела живлення, драйвери керування та силові транзисторні ключі перетворювача.

Для можливості отримання високих показників якості перехідних процесів системи електропривода схема оснащена додатковими датчиками струму, напруги та швидкості [18], які будуть брати участь у формуванні керуючого сигналу та при організації систем захисту від перенапруг та сплесків струму.

Основною частиною системи керування є мікроконтролер, блок індикації та керування. Оскільки мікроконтролер повинен мати досить велику швидкодію, що дозволить звести затримки розрахунку до мінімуму, тим самим приблизити показники цифрової системи керування до аналогової, то був обраний мікроконтролер PIC18F4550. Для реалізації індикації було обрано дисплей WH1602B-YYK-CTK. В якості датчиків струму були обрані датчики на ефекті Холла ACS712 (рис. 13, а), в якості датчиків напруги використовуються резистивні подільники з підсилювачами з гальванічною розв'язкою HCPL 7800 (рис. 13, б), як датчики швидкості можуть бути використані тахогенератори чи енкодери.

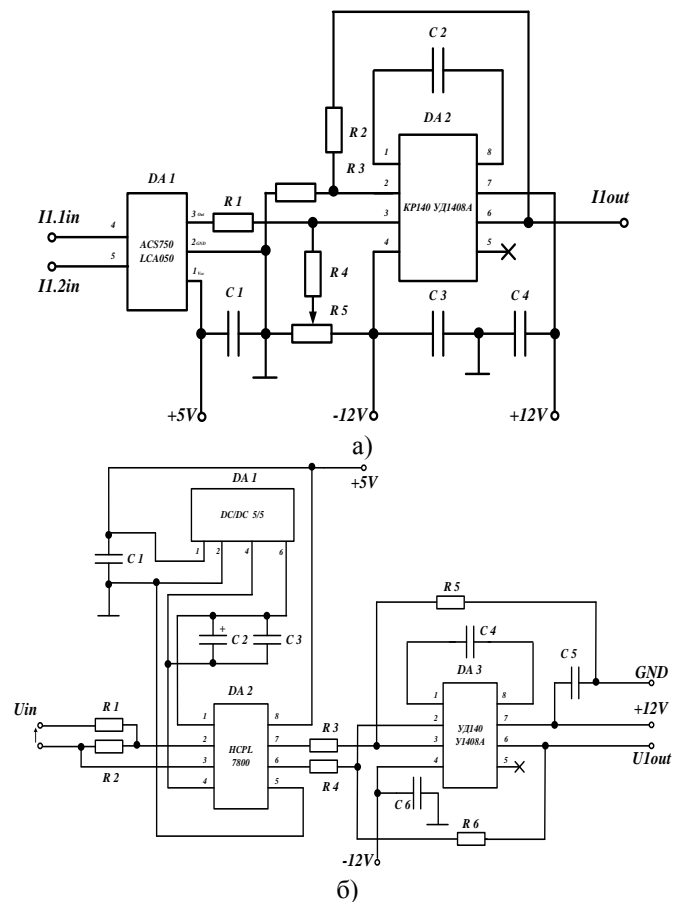


Рисунок 13 – Схема включення датчиків струму (а) та датчиків напруги (б)

Основною складовою силової частини реверсивного перетворювача є схема керування силовими транзисторними ключами. Оскільки в якості закону перемикавання силових ключів було надано перевагу несиметричному закону, то використання традиційного підходу до керування транзисторами верхнього та нижнього плеча в даному випадку є неможливим. Це пов'язано з тим, що при несиметричному керуванні, один з ключів напівмоста завжди має бути відкритим, а використання бутстрепного каскаду живлення для транзистора верхнього плеча не дозволяє тримати хоча б один ключ в постійно ввімкненому стані, оскільки не будуть створюватися умови для постійного заряду та розряду бутстрепної ємності як це відбувається у системах з широтно-імпульсним керуванням.

Для вирішення зазначеного недоліку був використаний альтернативний підхід до керування затвором IGBT. Даний метод заснований на використанні DC/DC перетворювачів та силових операційних підсилювачів моделі HCPL-314 J від компанії AVAGO Tehnology. Дана мікросхема являє собою силовий двоканальний драйвер IGBT, і має високі експлуатаційні характеристики. В результаті, схема керування двома транзисторами перетворювача набуває вигляду як зображено на рис. 14. Окрім інвертора та стандартної схеми включення драйвера, на схемі присутні і додаткові захисні схемні рішення. Так, на виході кожного каналу драйверу встановленні резистори на 4,3 та 2,3 кОм та стабілітрон, що обмежують зарядний та розрядний струм транзистора, захищаючи драйвер. Окрім цього захист встановлено і на самих транзисторах, до яких під'єднано захисне RC коло (демфер), який зменшує струми перехідних процесів у транзисторах, захищаючи їх від пробую.

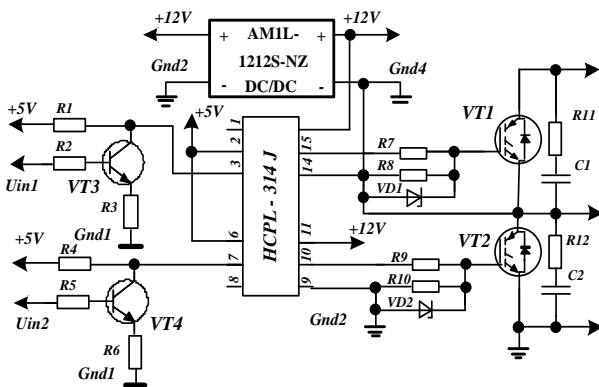


Рисунок 14 – Схема керування напівмостом транзисторного перетворювача

**ВИСНОВКИ.** Обґрунтовано параметри складових частин та розроблено технічні рішення побудови мікропроцесорної системи керування чотириквadrантним

перетворювачем енергії постійного струму. Показано, що для забезпечення сталого генераторного режиму роботи електропривода доцільним є використання кола скидання енергії в ланці постійного струму.

#### ЛІТЕРАТУРА

- Schulz W. M., Spang M., Wintrich A., König B., Berberich S. E. Novel Monolithic Integrated Device with Gate Resistor for External IGBT Clamping Leading to Enhanced Short Circuit Behavior. *2021 33rd International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)*. P. 119–122, DOI: 10.23919/ISPSD50666.2021.9452211.
- Воронин П. А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. Изд. 2-е, перераб. и доп. Москва : Издательский дом Додэка–XXI, 2005. 384 с.
- Мелешин В. И. Транзисторная преобразовательная техника. Москва : Техносфера, 2006. 632 с.
- Vogler B., Rossberg M., Herzer R., Reusser L., Wurm T. 600V Converter/Inverter/Brake (CIB) – Module with integrated SOI Gate Driver IC for Medium Power Applications. *5th International Conference on Integrated Power Electronics Systems*. 2008. P. 1–5.
- Гейтенко Е. Н. Источники вторичного электропитания. Схемотехника и расчет : учебное пособие. Москва : СОЛОН-ИПЕСС, 2008. 448 с.
- Mayer E. Development of motor controls using the Semikron advanced integration power module. *Proceedings Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo*. 2005. P. 236–239. DOI: 10.1109/EEIC.2005.1566298.
- Дьяконов В. П., Максимчук А. А., Ремнев А. М., Смердов В. Ю. Энциклопедия устройств на полевых транзисторах. Москва : СОЛОН-П., 2002. 512 с.
- Buetow S., Herzer R., Burani N., Bittner R., Kujath M. New Compact Automotive SiC-Sixpack Converter System with stacked 3D-Gate Driver. *2019 31st International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)*. 2019. P. 235–238. DOI: 10.1109/ISPSD.2019.8757591.
- Yurkevich V. D., Stepanov N. A. PWM speed control of DC motor based on singular perturbation technique. *2014 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*. 2014. P. 434–440. DOI: 10.1109/ICUMT.2014.7002140.
- Senghani N. N., Rao G. S. Multi quadrant operation of DC motor using hybrid topology with reduced number of switches. *2014 Innovative Applications of Computational Intelligence on Power, Energy and Controls with their impact on Humanity (CIPECH)*. 2014. P. 268–272. DOI: 10.1109/CIPECH.2014.7019122.



11. Семенов Б. Ю. Силовая электроника: профессиональные решения. Москва : СОЛОН-ПРЕСС, 2011. 416 с.

12. Das S., Rashid M. M., Firdous J., Haque M. N. M. Design, Analysis and Simulation of a Solar Powered DC Motor using MOSFET H-bridge Converter. *2020 11th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*. 2020. P. 1–7. DOI: 10.1109/ICCCNT49239.2020.9225583.

13. Kasko I., Berberich S. E., Gross M., Beckedahl P., Buetow S. High efficient approach to utilize SiC MOSFET potential in power modules. *2017 29th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's (ISPSD)*. 2017. P. 259–262. DOI: 10.23919/ISPSD.2017.7988909.

14. Бормотов А., Мартыненко В., Мускатынъев В. Некоторые вопросы эксплуатации IGBT-модулей. *Компоненты и технологии*. 2005. № 5. С. 116–120.

15. Мельников В. О. Оцінка динамічних режимів

роботи силових IGBT у складі напівпровідникового перетворювача енергії. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2013. № 2 (22). С. 189–195.

16. Melnykov V., Perduľak J. Experimental investigations of working modes of power thyristor keys in semiconductor converters. *13th Scientific Conference of Young Researchers of Faculty of Electrical Engineering and Informatics Technical University of Košice*. 2013. P. 18–321.

17. Lehmann J., Katzenberger G., Königsmann G., Roßberg M., Herzer R. IGBT driver chip set with advanced digital signal processing. *2011 IEEE 23rd International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs*. 2011. P. 196–199. DOI: 10.1109/ISPSD.2011.5890824.

18. Прітченко О. В., Калінов А. П., Мельников В. О., Скрипников О. В. Концепція побудови мало-габаритних лабораторних стендів. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2010. № 2 (10). С. 56–61.

## DESIGN OF THE POWER TRANSISTOR ENERGY CONVERTERS FOR AUTOMATED DC-DRIVE SYSTEMS

### V. Melnykov

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: melnykow@gmail.com

**Purpose.** One of the integral parts of modern mechatronic motion modules, where electric motors provide the conversion of electrical energy into useful mechanical action, are power semiconductor converters. At the current stage of industrial development, the use of energy converters as a part of a fully controlled semiconductor switches opens wide opportunities for the development and implementation of highly efficient resource- and energy-saving devices. **Methodology.** Two types of converters are widely used in automated DC electric drive systems: controlled thyristor rectifiers and pulse-width DC converters, the principle of operation of which is based on the key mode of operation of the regulating semiconductor, which periodically connects the source voltage to the output circuit. The paper presents a laboratory sample of a power semiconductor DC energy converter, which can ensure reliable motor operation in both motor and braking modes. **Results.** The presented transistor energy converter consists of two main parts: the first part performs the main role – control, and it includes a control unit, a microcontroller, and a device for displaying current information. The second part is a power module, which includes the necessary power supply modules, control drivers and power transistor switches of the converter. To obtain high quality transients of the electric drive system, the circuit is equipped with additional sensors of current, voltage and speed, which takes part in the formation of the control signal and in the protection systems against overvoltage and current jumps. **Practical value.** The paper substantiates the parameters of the components and proposes developed technical solutions for the construction of a microprocessor control system for a transistor DC energy converter. It is shown that in order to ensure a constant generator mode in automated electric drive systems, where the primary energy converter is an uncontrolled rectifier, it is expedient to install an energy discharge circuit in the DC link. References 18, figures 14.

**Key words:** direct current motor, energy converter, braking mode, energy reset circuit.

### REFERENCES

1. Schulz, W. M., Spang, M., Wintrich, A., König, B. & Berberich, S. E. (2021). Novel Monolithic Integrated Device with Gate Resistor for External IGBT Clamping Leading to Enhanced Short Circuit Behavior. *2021 33rd International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)*. 119–122. DOI: 10.23919/ISPSD50666.2021.9452211.

2. Voronin, P. A. (2005). *Silovue poluprovodnikovue kluchi: semeystva, harakteristiki, primenenie [Power semiconductor switches: family, features,*

*application]*. Moscow: Izdatelskiy dom Dodeka-XXI. [in Russian]

3. Meleshin, V. I. (2006). *Tranzistornaia preobrazovatelnaia tehnik [Transistor converter equipment]*. Moscow: Tehnosvera. [in Russian]

4. Vogler, B., Rossberg, M., Herzer, R., Reusser, L., & Wurm, T. (2008). 600V Converter/Inverter/Brake (CIB) – Module with integrated SOI Gate Driver IC for Medium Power Applications. *5th International Conference on Integrated Power Electronics Systems*. 1–5.



5. Geytenko, E. N. (2008). *Istochniki vtorichnogo electropitania. Shemotehnika i raschet [Secondary power sources. Scheme and technique and calculation]*. Moscow: Solon-Press. [in Russian]
6. Mayer, E. (2005). Development of motor controls using the Semikron advanced integration power module. *Proceedings Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo*. 236–239. DOI: 10.1109/EEIC.2005.1566298.
7. Diakonov, V. P., Maksimchuk, A. A., Remnev, A. M., & Smerdov, V. Yu (2002). *Enchiklopediia ystroistv na polevuh tranzistorah [Encyclopedia of the field effect transistor]*. Moscow: Solon-R. [in Russian]
8. Buetow, S., Herzer, R., Burani, N., Bittner, R., & Kujath, M. (2019). New Compact Automotive SiC-Sixpack Converter System with stacked 3D-Gate Driver. *2019 31st International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)*. 235–238. DOI: 10.1109/ISPSD.2019.8757591.
9. Yurkevich, V. D., & Stepanov, N. A. (2014). PWM speed control of DC motor based on singular perturbation technique. *2014 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*. 434–440. DOI: 10.1109/ICUMT.2014.7002140.
10. Senghani, N. N., & Rao, G. S. (2014). Multi quadrant operation of DC motor using hybrid topology with reduced number of switches. *2014 Innovative Applications of Computational Intelligence on Power, Energy and Controls with their impact on Humanity (CIPECH)*. 268–272. DOI: 10.1109/CIPECH.2014.7019122.
11. Semenov, B. Yu. (2011). *Silovaia elektronika: profesionalnie resheniia [Power Electronics: professional solutions]*. Moscow: Solon-Press. [in Russian]
12. Das, S., Rashid, M. M., Firdous, J., & Haque, M. N. M. (2020). Design, Analysis and Simulation of a Solar Powered DC Motor using MOSFET H-bridge Converter. *2020 11th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*. 1–7. DOI: 10.1109/ICCCNT49239.2020.9225583.
13. Kasko, I., Berberich, S. E., Gross, M., Beckedahl, P., & Buetow, S. (2017). High efficient approach to utilize SiC MOSFET potential in power modules. *2017 29th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's (ISPSD)*. 259–262. DOI: 10.23919/ISPSD.2017.7988909.
14. Bormotov, A., Martunenko, V., & Myskatiniyev, V. (2005). Some operational issues of IGBT-modules. *Komponentu i tehnologii*, 5, 116–120. [in Russian]
15. Melnykov, V. (2013). Evaluation of dynamic modes of the power IGBT consisting of semiconductor power converters. *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi*, 2 (22), part 2, 189–195.
16. Melnykov, V., & Perduľak, J. (2013). Experimental investigations of working modes of power thyristor keys in semiconductor converters / V. Melnykov. *13th Scientific Conference of Young Researchers of Faculty of Electrical Engineering and Informatics Technical University of Košice*. 18–321.
17. Lehmann, J., Katzenberger, G., Königsmann, G., Roßberg, M., & Herzer, R. (2011). IGBT driver chip set with advanced digital signal processing. *2011 IEEE 23rd International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs*. 196–199. DOI: 10.1109/ISPSD.2011.5890824.
18. Prithenko, O., Kalinov, A., Melnykov, V., & Skripnikov, O. (2010). The concept of small laboratory stands. *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi*, 2 (10), 56–61. [in Ukrainian]

Стаття надійшла 11.05.2021.