

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

**ФАКУЛЬТЕТ РАДІОФІЗИКИ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ**

Кафедра радіотехніки та радіоелектронних систем

«На правах рукопису»

Робота допущена до захисту в ЕК  
рішенням кафедри радіотехніки та радіоелектронних систем  
від \_\_\_\_\_ 2024 року, протокол № \_\_\_\_\_.  
Завідувач кафедри доктор фіз.-мат. наук, професор  
\_\_\_\_\_ Ігор АНІСІМОВ

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА**

**на тему:**

**«ДВОНАПРАВЛЕНИЙ АС/DC ІНВЕРТОР»**

**Виконав:**

студент 4-го курсу  
денної форми навчання  
спеціальності 172 - Телекомунікації та радіотехніка  
ОПП «Інформаційна безпека телекомунікаційних систем і мереж»  
Татаринцев Ілля Олександрович \_\_\_\_\_

**Науковий керівник:**

канд. фіз.-мат. наук, асистент  
Фесенко Сергій Олександрович \_\_\_\_\_

**Рецензент:**

канд. фіз.-мат. наук, доцент  
Загороднюк Сергій Петрович \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій бакалаврській роботі  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань

Студент \_\_\_\_\_ Ілля ТАТАРИНЦЕВ

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 25 с., 5 рис., 1 дод. (1с.), 11 джерел.

ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНА МОДУЛЯЦІЯ, ДВОНАПРАВЛЕНИЙ ІНВЕРТОР, АКТИВНИЙ КОРЕКТОР КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ, СИНХРОННЕ ВИПРЯМЛЕННЯ.

Об'єкт розроблення - Двонаправлений АС/DC інвертор.

Мета роботи – побудова принципової схеми АС/DC інвертора.

Двонаправлені АС-DC інвертори є важливим елементом сучасних систем енергопостачання, оскільки вони дозволяють ефективно перетворювати електричну енергію з змінного струму (АС) в постійний струм (DC) і навпаки. Це особливо актуально для систем з відновлюваними джерелами енергії, такими як сонячні батареї та вітрові турбіни, а також для електричних транспортних засобів і систем зберігання енергії.

Основний принцип роботи двонаправленого інвертора полягає в управлінні напрямком потоку енергії. У режимі зарядки інвертор перетворює АС в DC для зарядки батарей, а в режимі розрядки – навпаки, перетворює DC в АС для постачання енергії до мережі. Це забезпечується за рахунок використання напівпровідникових компонентів, таких як MOSFET та IGBT транзистори, а також спеціалізованих драйверів для їх управління.

Для досягнення високої ефективності та надійності, двонаправлені інвертори зазвичай використовують складні алгоритми керування, такі як широтно-імпульсна модуляція (ШІМ), яка дозволяє точно регулювати вихідну напругу та струм. Окрім того, важливим аспектом є забезпечення електромагнітної сумісності та мінімізації втрат на перемикання.

Сучасні двонаправлені інвертори можуть використовувати різні топології, серед яких найпоширенішими є топології на основі мостових схем. Це дозволяє забезпечити високу ефективність перетворення та зменшити габарити та вагу пристрою.

Одним із важливих аспектів розробки інверторів є вибір компонентів. MOSFET транзистори використовуються для високошвидкісного перемикання завдяки їх низькому опору в увімкнутому стані, тоді як IGBT транзистори використовуються для роботи з високими напругами та струмами завдяки їх високій пробивній напрузі та стійкості до перенавантажень.

Експериментальні дослідження на прототипах інверторів дозволяють перевірити теоретичні результати та підтвердити ефективність розроблених схем. Особлива увага приділяється тепловому режиму роботи компонентів, оскільки перегрів може призвести до їх виходу з ладу. Для цього використовуються різні методи охолодження, такі як радіатори та вентилятори.

У висновку можна зазначити, що двонаправлені AC-DC інвертори є ключовим елементом в розвитку сучасних енергетичних систем. Їх використання дозволяє підвищити ефективність використання енергії та забезпечити стабільність енергопостачання. Подальші дослідження та вдосконалення цих пристроїв сприятимуть зростанню використання відновлюваних джерел енергії та розвитку екологічно чистих технологій.

## ЗМІСТ

Вступ .....	6
1. Принцип дії та побудова двонаправленого АС-DC інвертора.....	7
1.1 Драйвер верхнього та нижнього ключів NSi6602AD.....	8
1.2 Біполярні транзистори з ізольованим затвором (IGBT).....	10
2. Принципова електрична схема двонаправленого АС-DC інвертора.....	12
2.1. Низьковольтна частина інвертора.....	12
2.2 Високовольтна частина АС-DC інвертора .....	18
Висновки .....	22
Перелік джерел посилання.....	23
Додаток А перелік компонентів принципої схеми.....	25

## **ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція;

АС – змінний струм (напруга);

DC – постійний струм (напруга);

APFC – активний коректор коефіцієнту потужності;

MOSFET – польовий транзистор з ізольованим затвором;

IGBT – біполярний транзистор з ізольованим затвором;

## ВСТУП

З розвитком альтернативних джерел енергії, зокрема з масовим використанням сонячних панелей, інвертор напруги знаходить дедалі ширше застосування. Оскільки застосовується як постійний, так і змінний струм, то часто виникає необхідність перетворення енергії одного роду в інший. Пристрої, що перетворюють змінний струм на постійний називаються випрямлячами. Як випрямляч найчастіше застосовують діодний міст. А пристрій, що перетворює постійний струм змінний називають інвертором.

Введенням в енергетичну арену, ці інвертори стають перехідними елементами між двома формами електроенергії - змінного та постійного струмів, відкриваючи безліч можливостей для управління та оптимізації енергетичних потоків. Здатність цих пристроїв перетворювати енергію у двох напрямках - від джерела живлення до споживача та навпаки - відкриває нові перспективи для розробки інтелектуальних енергетичних систем, які здатні пристосовуватися до змінних умов у виробництві та споживанні електроенергії.

Двонаправлені AC/DC інвертори знайшли широке застосування в різних сферах, де важлива ефективна система електропостачання та можливість обміну енергією між джерелами живлення та споживачами. Ці пристрої використовуються у таких сферах, як електромобільна техніка, відновлювальна енергетика, у зберіганні енергії а також у автономних системах живлення. Отже, ці пристрої корисні для будь-яких організацій, домогосподарств та індивідуальних користувачів, які прагнуть забезпечити стабільну та ефективну систему електропостачання, а також для тих, хто зацікавлений у використанні відновлювальних джерел енергії та збереженні електроенергії.

## 1. ПРИНЦИП ДІЇ ТА ПОБУДОВА ДВОНАПРАВЛЕНОГО АС-DC ІНВЕРТОРА

Однією з великих переваг двонаправленого інвертора напруги є можливість керувати енергією завдяки одними і тими ж компонентами чи елементами електричних кіл чи ланцюгів. У колі струм може протікати в протилежних напрямках, залежно від режиму роботи. Таким чином, один і той же двонаправлений перетворювач може працювати як інвертор і як випрямляч. У режимі генерації змінного струму схема може мати шлях для перетворення постійного струму в змінний. У режимі заряду та сама схема може мати той самий шлях для перетворення змінного струму в постійний. У деяких випадках струм може протікати в різних (і/або протилежних) напрямках уздовж одного кола для режиму постійного струму в змінний струм і режиму змінного струму в постійний струм.

Двонаправлений перетворювач може під керуванням програмного забезпечення переналаштувати себе з режиму генерації змінного струму на режим зарядки. У режимі генерації змінного струму вхідна потужність постійного струму від джерела енергії, такого як батарея або конденсатор, може перетворюватися на змінний струм. Наприклад, вхідну потужність постійного струму можна перетворити на 220 В змінного струму, 50/60 Гц, однофазну. У режимі заряду змінний струм може перетворюватися на постійний. В одній реалізації 220 В змінного струму, 50/60 Гц можна перетворити на постійний струм за певним алгоритмом, щоб зарядити джерело живлення постійного струму.

Вихідну напругу та струм двонаправленого перетворювача можна контролювати дуже точно, щоб забезпечити точну доставку потужності та енергії до потрібного навантаження. Двонаправлений перетворювач може мати програмований алгоритм зарядки акумулятора в режимі заряду, а також плавний перехід в режим генерації змінного струму (в тому числі режим постійної напруги). Це може бути особливо корисним у програмах відновлення енергії,

таких як рекуперативне гальмування автомобіля, відновлення енергії ліфта, енергоспоживання в режимі очікування тощо.

### 1.1 Драйвер верхнього та нижнього ключів NSi6602AD

Мікросхема NSi6602AD відіграє ключову роль у двонаправлених інверторах, забезпечуючи надійне та швидке керування силовими транзисторами, такими як IGBT та MOSFET, її функціональна схема показана на рисунку 1.1.

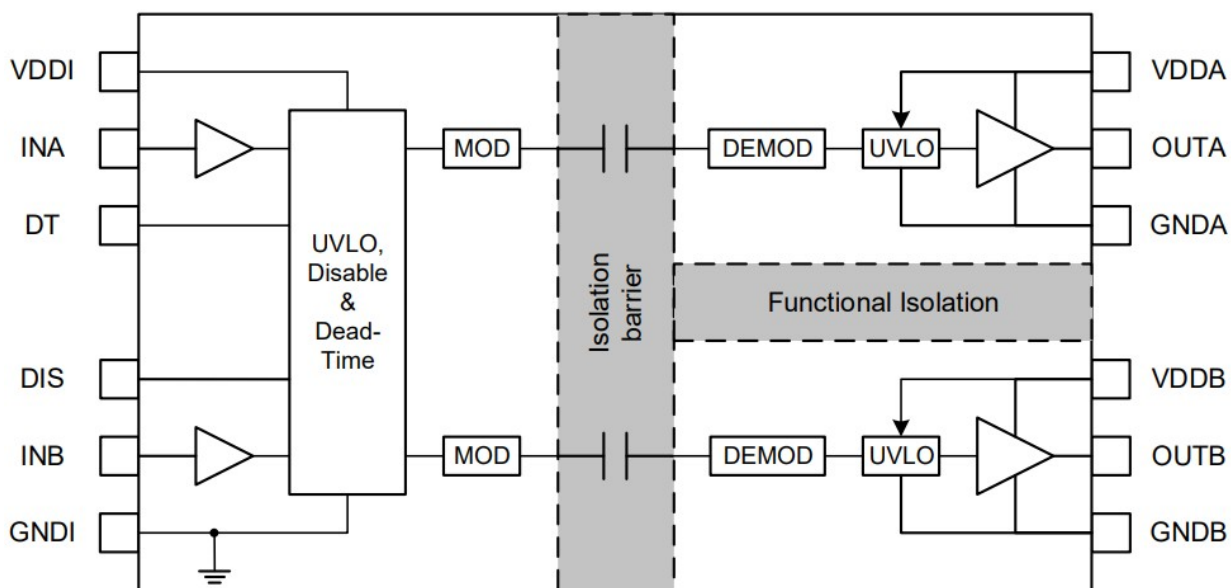


Рисунок 1.1 – Функціональна блок-схема драйвера NSi6602AD

Виділимо ключові характеристики ізольованого двоканального драйвера NSi6602AD [1]:

- Забезпечує ізоляцію до 5700 В змінного струму, що гарантує безпеку та надійність у високовольтних застосуваннях.
- Напруга живлення з боку входу (VDDI): 2.7V до 5.5V.
- Напруга живлення з боку драйвера (VDDA, VDDB): до 25V з функцією захисту від низької напруги живлення (UVLO).
- Здатен забезпечувати піковий струм до 4A для джерела та до 6A для стоку, що критично для ефективного перемикання силових транзисторів.
- Типова затримка становить 25 нс, а максимальна відповідність затримок – 5 нс. Це зменшує втрати на перемикання та підвищує ефективність інвертора.

- Забезпечує можливість налаштування затримки між перемиканням транзисторів, що зменшує ризик коротких замикань та втрат енергії.
- $\pm 150$  кВ/мкс забезпечує стабільну роботу в умовах сильних електромагнітних перешкод, що критично для інверторів, які працюють у мінливих умовах.
- Мінімальна ширина вхідного імпульсу становить 20 нс, що дозволяє швидко реагувати на зміни вхідного сигналу.
- Діапазон робочих температур від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $125^{\circ}\text{C}$ , що забезпечує надійність у різних умовах експлуатації.

Мікросхема NSi6602AD використовується для керування затворами IGBT та MOSFET транзисторів у двонаправлених інверторах. Вона забезпечує точне та синхронізоване перемикання транзисторів, що дозволяє ефективно керувати потоком енергії між AC та DC сторонами інвертора. Це забезпечує двонаправлене перетворення енергії з мінімальними втратами та високою ефективністю, що важливо для таких застосувань, як енергозберігаючі системи, зарядні станції для електромобілів та інші системи зберігання енергії.

Типова схема застосування включає вхідні сигнали (INA, INB), регулювання мертвого часу (DT), блокування (DIS), вихідні драйвери (OUTA, OUTB) та підключення до джерел живлення (VDDI, VDDA, VDDB).

Таким чином, NSi6602 є критичним компонентом для забезпечення ефективної, надійної та безпечної роботи двонаправлених інверторів у різних додатках.

## 1.2 Біполярні транзистори з ізолюваним затвором (IGBT)

Біполярні транзистори з ізолюваним затвором (IGBT) є комбінованими приладами, у них встановлені польові транзистори з ізолюваним затвором, які керують потужним біполярним транзистором. Отже цей тип транзисторів поєднує переваги MOSFET транзисторів (зручність керування за рахунок високого вхідного імпедансу) та біполярних транзисторів (можливість керування значними струмами при високих напругах) [2]. Саме тому IGBT транзистори є ключовим компонентом двонаправлених інверторів, завдяки своїм високим характеристикам перемикання та надійності. Умовне позначення IGBT транзистора показано на рисунку 1.2.

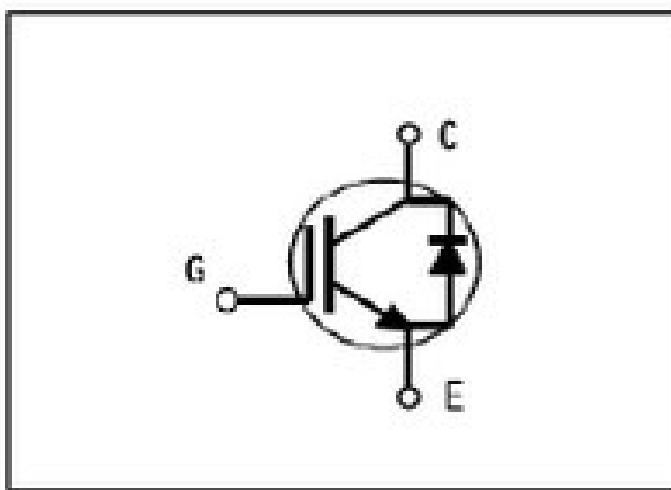


Рисунок 1.2 – Умовне позначення біполярного транзистора з ізолюваним затвором.

Завдяки своїм особливостям IGBT транзистори є важливим елементом у двонаправлених інверторах, де вони використовуються для ефективного керування потоком енергії між AC та DC сторонами. Їх здатність працювати з високими струмами та напругами, швидке перемикання і низькі втрати на провідність роблять його ідеальним для таких додатків, як інвертори для сонячних батарей, приводи моторів та системи зберігання енергії.

IGBT транзистор у складі двонаправленого інвертора працює разом з драйверами, такими як NSi6602, які забезпечують точне та синхронізоване перемикання. Це дозволяє ефективно керувати потоком енергії та забезпечує надійну роботу системи. Завдяки використанню IGBT транзисторів у складі інвертора вдається досягнути наступних переваг:

1. Висока ефективність: Завдяки низьким втратам на провідність і швидкому перемиканню.
2. Надійність: Висока здатність розсіювання тепла та надійні характеристики перемикання.
3. Універсальність: Підходить для різних додатків, включаючи інвертори, системи зберігання енергії та приводи моторів.

Таким чином IGBT транзистор є критичним компонентом для забезпечення ефективної, надійної та безпечної роботи двонаправлених інверторів у різних додатках.

## 2. ПРИНЦИПОВА ЕЛЕКТРИЧНА СХЕМА ДВОНАПРАВЛЕНОГО АС-DC ІНВЕРТОРА

### 2.1 Низьковольтна частина інвертора.

На рисунку 2.1 показана принципова електрична схема низьковольтної (холодної) частини двонаправленого АС-DC інвертора.

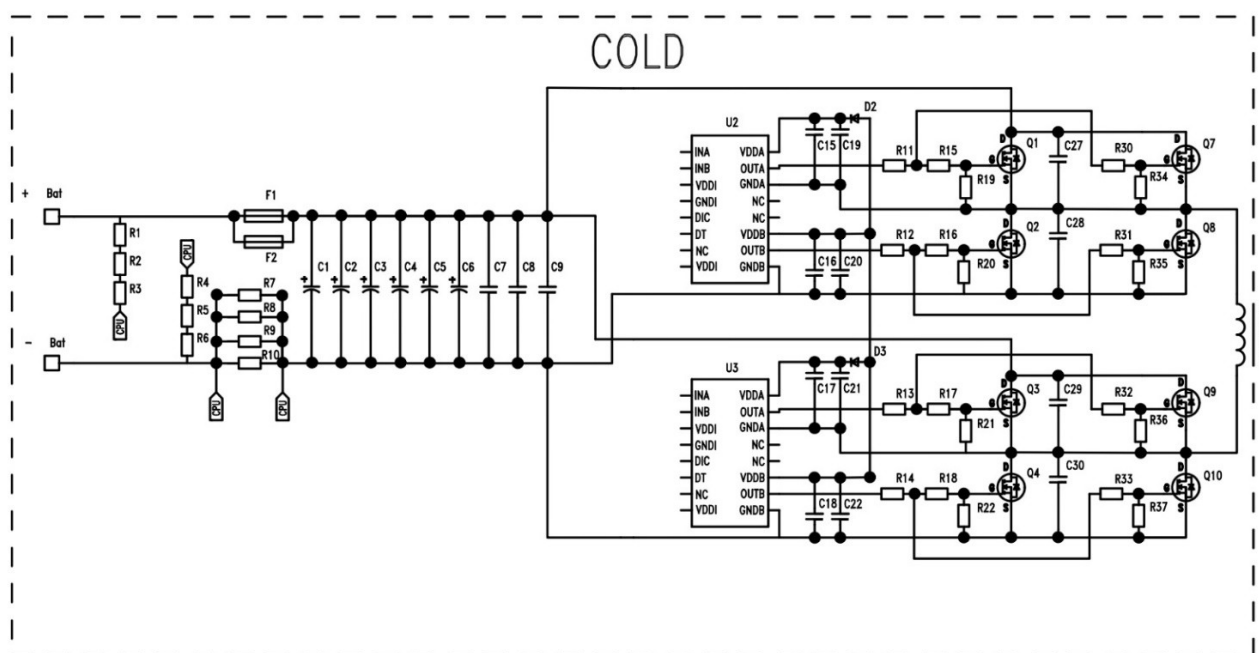


Рисунок 2.1 – Принципова електрична схема низьковольтної частини двонаправленого АС-DC інвертора

Представлена на рисунку 2.1 принципова схема містить високочастотний трансформатор Т1 одна з обмоток якого підключена до низьковольтної мостової схеми на потужних MOSFET [3] транзисторах. У даному випадку (низька напруга, значні струми) MOSFET транзистори мають перевагу над IGBT [2] транзисторами, оскільки дозволяють отримати значно меншу напругу на відкритому ключі. Для збільшення потужності у кожне плече моста включено паралельно по два транзистори. При паралельному з'єднанні транзисторів їх затвори не можна з'єднувати паралельно, тому, що внаслідок технологічного розкиду параметрів порогові затворні напруги можуть відрізнятись і в момент

комутації на одному транзисторі будуть вищі динамічні втрати. Окрім того, у паразитному контурі (затворна ємність + індуктивність провідників друкованої плати) може виникнути явище паразитних коливань, так званий “звон”. Для усунення згаданих негативних явищ між затворами, які з’єднуються треба встановити низькоомні резистори ( $R15 + R30$ ), ( $R16 + R31$ ), ( $R17 + R32$ ), ( $R18 + R33$ ), які переводять контур в аперіодичний режим. Окрім згаданих резисторів, послідовно з ними, додатково включені опори  $R11$ ,  $R12$ ,  $R13$ ,  $R14$  які зменшують комутаційні струми затворів.

Для керування затворами транзисторів необхідна спеціальна схема, яка називається драйвером. Її задачею є швидка перезарядка затворної ємності, тому вона має бути здатною видати порівняно значний піковий струм (як парвило, декілька ампер). Не викликає значних проблем керування нижнім ключем, витік якого з’єднаний із землею (“мінусом” батареї). Однак, на відміну від нижнього, витік верхнього ключа має плаваючий потенціал і це значно ускладнює керування. У таких випадках встановлюють розв’язувальні сигнальні трансформатори, високошвидкісні оптичні розв’язки або спеціалізовані мікросхеми драйверів, що і зроблено у нашому випадку. У якості такої мікросхеми обрано NSI6602AD — драйвер верхнього і нижнього ключів із посиленої ізоляцією між сигнальною і затворною частинами. Як і подібні мікросхеми такого типу (наприклад IR2110) даний драйвер має частину схеми з плаваючим потенціалом, що дозволяє йому керувати верхнім ключем. Для живлення цієї “плаваючої” частини мікросхеми використовується так званий бутстрепний конденсатор, який заряджається низькою напругою живлення драйвера при відкритому нижньому ключі, а при відкритому верхньому — віддає заряд для живлення драйвера. На схемі рисунку 2.1 такими конденсаторами є:  $C15||C19$  та  $C17|C21$ . Для запобігання зворотнього відтоку зарядку з конденсаторів встановлені діоди  $D2$  та  $D3$ . Слід зауважити, що даний тип драйверу дозволяє відкрити одночасно верхній і нижній ключі, що неодмінно закінчиться плачевно

для транзисторів, тому для запобігання цього ефекту має бути виключено (бажано апаратно) одночасну подачу відкриваючих сигналів на входи драйвера.

Трансформатор Т1 відіграє ключову роль у перетворенні енергії між низьковольтною частиною та високовольтною, забезпечуючи ізоляцію та зміну амплітуди напруги. Має дві обмотки, які не можна назвати первинною і вторинною, оскільки тут реалізована двонаправлена передача енергії і ролі обмоток змінюються. Розглянемо його функції в обох режимах роботи інвертора: зарядка і розрядка акумуляторів.

1. У режимі розрядки ( $DC \rightarrow AC$ ) трансформатор працює як підвищуючий трансформатор, підвищуючи вихідну амплітуду змінної напруги (AC) до потрібної величини.

2. У режимі зарядки ( $AC \rightarrow DC$ ) Трансформатор працює як знижуючий трансформатор, знижуючи вхідну амплітуду змінної напруги (AC) до необхідного рівня змінної напруги для подальшого вирівнювання транзисторами.

При розрядці акумуляторів схема працює як перетворювач постійного струму в змінний ( $DC \rightarrow AC$ ). Нижче показаний детальний процес роботи транзисторів в H-мостовій схемі в цьому режимі.

Півцикл 1: Струм у одному напрямку

1. Відкриття верхнього плеча (Q1 і Q7) та нижнього плеча (Q4 і Q10):
  - Драйвери NSI6602AD відкривають транзистори Q1 і Q7 (верхнє плече) та транзистори Q4 і Q10 (нижнє плече).
  - Це дозволяє струму текти через Q1 і Q7, далі через первинну обмотку трансформатора Т1, і потім через Q4 і Q10 до землі.
2. Струм через трансформатор:
  - У цей момент струм через трансформатор протікає в одному напрямку, створюючи магнітне поле в первинній обмотці трансформатора.

Півцикл 2: Струм у протилежному напрямку

3. Зміна стану транзисторів:

- Драйвери NSI6602AD закривають транзистори Q1 і Q7 та Q4 і Q10.
- Одночасно відкривають транзистори Q2 і Q8 (верхнє плече) та Q3 і Q9 (нижнє плече).

4. Струм у протилежному напрямку:

- Струм тепер протікає через Q2 і Q8, далі через первинну обмотку трансформатора T1 у протилежному напрямку, і потім через Q3 і Q9 до землі.
- Ця зміна напрямку струму через трансформатор створює змінну напругу на виході трансформатора.

Частота перемикання транзисторів у таких схемах зазвичай висока (десятки або сотні кілогерц, часто навіть мегагерци), що дозволяє використовувати менші та легші пасивні компоненти (індуктивності, конденсатори). Однак, збільшення частоти збільшує втрати на перемикання транзисторів (динамічні втрати), втрати на перемагнічування осердя трансформатора, а також, втрати за рахунок електромагнітного випромінювання і скін-ефекту.

Трансформатор T1 працює як підвищуючий або знижуючий в залежності від напрямку потоку енергії (розрядка або зарядка).

Частота роботи є високою, що дозволяє зменшити розмір і вагу пасивних компонентів, але потребує врахування додаткових втрат і використання спеціальних компонентів.

При зарядці акумуляторів схема працює у режимі перетворювача змінного струму в постійний (AC-DC). Ось детальний опис роботи холодної частини схеми у цьому режимі:

1. Змінний струм подається на вхід схеми через трансформатор T1, який в даному режимі працює як знижуючий трансформатор.

2. Трансформатор T1 знижує вхідну амплітуду змінної напруги до рівня, придатного для подальшого перетворення у постійний струм, а напруга з вторинної обмотки трансформатора подається на мостову схему з n-канальними транзисторами.

У цьому режимі драйвери NSI6602AD керують транзисторами таким чином, щоб випрямити змінний струм. Випрямлення здійснюється шляхом послідовного відкривання і закривання транзисторів, формуючи постійний струм. Після випрямлення струму, постійний струм проходить через фільтруючі конденсатори, які згладжують залишкові пульсації. Це забезпечує стабільну напругу для зарядки акумуляторів, тоді стабілізований постійний струм подається на акумулятори, забезпечуючи їх зарядку.

При зарядці, струм рухається у зворотному напрямку в порівнянні з режимом розрядки. Трансформатор T1 і транзистори працюють в іншому режимі, знижуючи змінну напругу і випрямляючи її до постійної. Як і в режимі розрядки, частота перемикання транзисторів залишається високою, що дозволяє забезпечити ефективне перетворення енергії та зменшити розміри пасивних компонентів. Драйвери NSI6602AD забезпечують точне керування транзисторами, відкриваючи і закриваючи їх у необхідній послідовності для забезпечення ефективного перетворення змінного струму в постійний.

Для перетворення змінної напруги в постійну використовується процес випрямлення та згладжування. У цій схемі, яка включає H-мостову конфігурацію з транзисторами, цей процес реалізується за допомогою синхронного випрямлення та згладжувальних компонентів.

Синхронне випрямлення здійснюється за допомогою транзисторів, які відкриваються і закриваються в залежності від фази змінної напруги. Використовуються n-канальні транзистори у H-мостовій конфігурації.

Півцикл 1: Позитивна напівхвиля

1. Відкриття Q1 і Q7 та Q4 і Q10:

- Коли на первинну обмотку трансформатора подається позитивна напівхвиля, драйвери NSI6602AD відкривають транзистори Q1 (верхнє плече) та Q4 (нижнє плече).

- Це дозволяє струму текти через Q1, через первинну обмотку трансформатора T1 і через Q4 до землі.

- Таким чином, створюється струм через навантаження (акумулятори).

Півцикл 2: Негативна напівхвиля

2. Закриття Q1 і Q7 та Q4 і Q10, відкриття Q2 і Q8 та Q3 і Q9:

- Під час негативної напівхвилі драйвери NSI6602AD закривають транзистори Q1 і Q7 та Q4 і Q10 та відкривають транзистори Q2 і Q8 (верхнє плече) та Q3 і Q9 (нижнє плече).

- Це дозволяє струму текти через Q2 і Q8, через первинну обмотку трансформатора T1 у протилежному напрямку, і через та Q3 і Q9 до землі.

- Струм через навантаження тепер протікає в тому ж напрямку, як і в позитивній напівхвилі.

Таким чином, через навантаження (акумулятори) постійно тече струм в одному напрямку, створюючи випрямлену напругу.

Після випрямлення отримується пульсуюча постійна напруга. Щоб отримати стабільну постійну напругу, використовується фільтрація за допомогою конденсаторів C1 – C9, які заряджаються під час піків випрямленої напруги і розряджаються під час спадів, згладжуючи пульсації, що зменшує риплінг напруги та забезпечує її більшу стабільність.

До переваг синхронного випрямлення можна віднести менші втрати у транзисторах, які мають вищу провідність, ніж діоди.

## 2.2. Високовольтна частина AC-DC інвертора

На рисунку 2.2 показана принципова схема високовольтної частини двонаправленого інвертора.

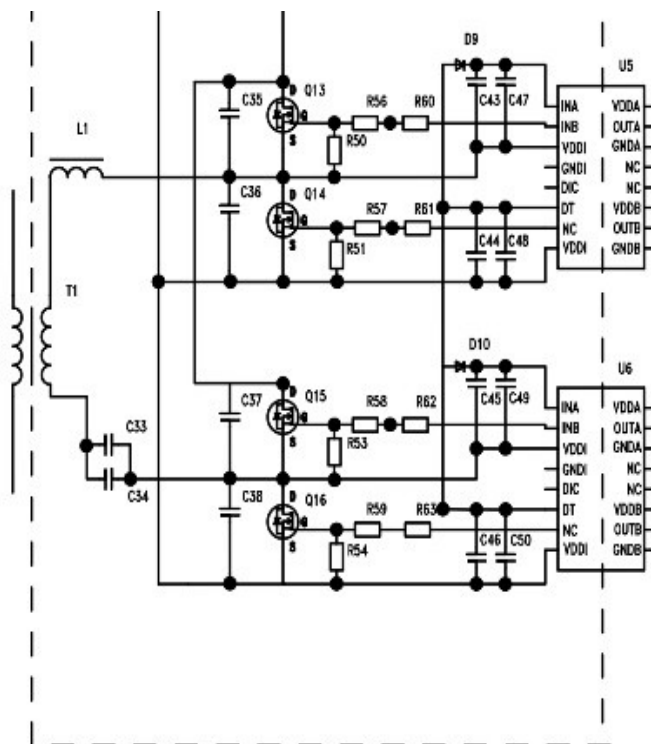


Рисунок 2.2 – Високовольтна частина двонаправленого AC-DC інвертора

Показана на рисунку 2.1 схема високовольтної частини інвертора може працювати у режимі випрямлення — коли відбувається споживання енергії від акумулятора або в режимі генерації — коли акумулятор заряджається.

Спочатку розглянемо процес випрямлення n-канальними транзисторами змінної напруги в постійну у високовольтній частині.

### Фаза 1: Перетворення змінної напруги

Трансформатор T1 приймає змінну напругу з низьковольтної частини і передає її на високовольтні MOSFET - транзистори OSG65R130 (Q13, Q14, Q15, Q16). Змінна напруга з вторинної обмотки трансформатора подається на ці транзистори, які використовуються для синхронного випрямлення.

## Фаза 2: Синхронне випрямлення

Синхронне випрямлення забезпечується завдяки керуванню відкриттям та закриттям MOSFET - транзисторів в залежності від фази змінної напруги.

Позитивна напівхвиля:

- Транзистори Q13 і Q16 відкриваються, пропускаючи струм від вторинної обмотки через транзистори до накопичувальних конденсаторів.

Негативна напівхвиля:

- Транзистори Q14 і Q15 відкриваються, пропускаючи струм в протилежному напрямку, також заряджаючи накопичувальні конденсатори.

## Фаза 3: Накопичення постійної напруги

Накопичувальні конденсатори згладжують пульсації випрямленої напруги, забезпечуючи стабільну постійну напругу на виході. Випрямлена напруга поступово накопичується на цих конденсаторах до досягнення бажаного рівня (410 В).

Паралельно каналам силових транзисторів увімкнено конденсатори C35-C38, які виконують роль снаберів [4]. Снаберний ланцюжок (snubber circuit) — це електричний компонент або набір компонентів, які використовуються для захисту силових напівпровідників, таких як транзистори (IGBT, MOSFET тощо), від перенапруги та перехідних процесів. Основна мета снаберних ланцюжків — зменшення або усунення паразитних коливань та пікових напруг, які можуть виникати під час перемикавання.

Розглянутий вище двонаправлений інвертор, насправді, ще не є DC → AC перетворювачем, він лише є мостом між низьковольтною та високовольтною постійними напругами, з можливістю обміну енергією в обидва боки. Для утворення змінної напруги з постійної використовується мостова схема на транзисторах Q5, Q6, Q11, Q12 – яка також має подвійне призначення, в залежності від режиму роботи (рисунок 2.3). Отже, у режимі живлення

навантаження від акумуляторів, розглянутий вище двонаправлений перетворювач генерує високу напругу (410В) з низької, яку видає акумулятор.

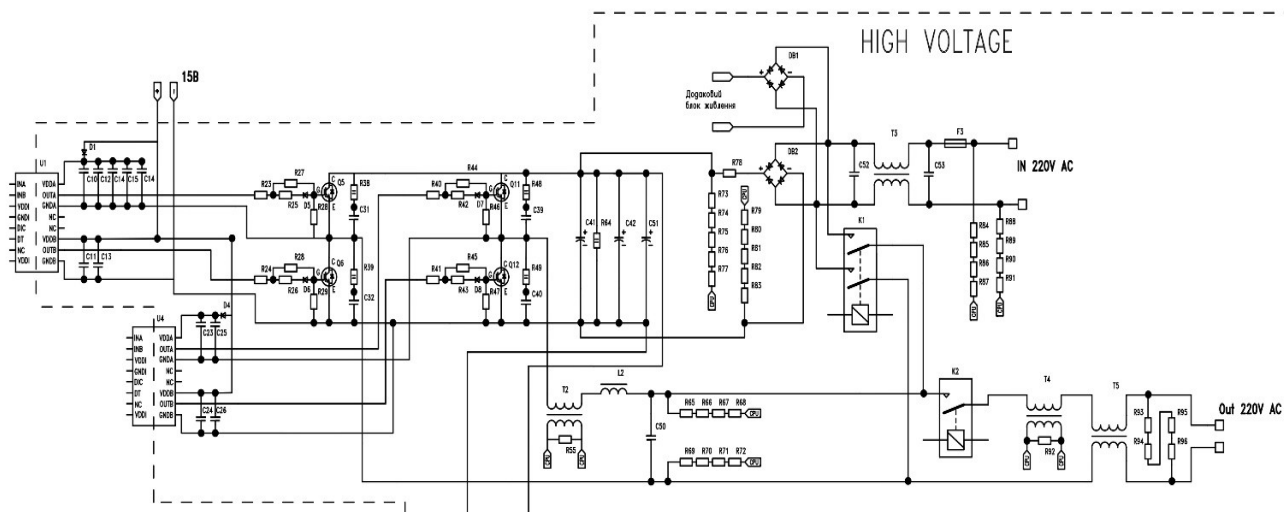


Рисунок 2.3 – Схема перетворення постійної напруги у змінну.

Ця висока напруга згладжується накопичувальними конденсаторами великої ємності C41, C42, C51 і подається на одну з діагоналей мосту Q5, Q6, Q11, Q12. До іншої діагоналі через замикання контактів реле K2 підключається навантаження [5]. Схема керування транзисторами подає відкриваючі сигнали на драйвери U1 та U4 і в залежності від алгоритму може сформувати вихідну напругу у вигляді меандру або синусоїди. В принципі, можливі й інші варіанти форми вихідної напруги, проте вони не актуальні, оскільки меандр обирається через простоту реалізації, а синус — щоб задовольнити вимоги чутливого навантаження, такого як асинхронні електродвигуни [6]. У випадку формування синуса, його форма отримується шляхом широтно-імпульсної модуляції тривалості відкривання транзисторів, і вихідна напруга на виході моста зовсім не нагадує синусоїду. Її форма є прямокутною зі змінним коефіцієнтом заповнення імпульсів — за синусом. Однак, середнє значення цієї напруги є синусоїдою і от щоб виділити це середнє значення використовується НЧ фільтр L2 C50, який обрізає високочастотну область спектру напруги [7]. У режимі зарядки акумулятора контакти реле K1 та K2 замикаються і напруга мережі прямо

подається до навантаження. Для контролю струму споживання моста і навантаження встановлені трансформатори струму T2 та T4 [8]. Окрім того, змінна напруга мережі тепер подається і на ту діагональ моста Q5, Q6, Q11, Q12, яка раніше генерувала змінну напругу. Навіть якщо всі IGBT транзистори залишити закритими, то через їх антипаралельні діоди, які утворюють схему діодного мосту відбудеться заряджання накопичувальних конденсаторів C41, C42, C51 (слід зауважити, що на відміну від MOSFET, IGBT транзистор може не мати антипаралельного діода, проте у нашому випадку використовуються транзистори саме з діодами). Як відомо, подібні схеми, у яких після діодного мосту встановлений накопичувальний конденсатор значної ємності споживають з мережі імпульсний струм на гребнях синусоїди напруги. Таке явно нелінійне навантаження на мережу призводить до появи у спектрі струму нелінійних спотворень, що зменшує коефіцієнт потужності. Для боротьби з вказаним явищем використовують пасивні та активні коректори коефіцієнта потужності (APFC) і нашій випадок — не виключення [9, 10]. Однак, у розробленій схемі використаний особливий тип такого коректора, який отримав назву “тотемного стовпа” (APFC Totem Pole) [11]. Він побудований на тому ж самому мості Q5, Q6, Q11, Q12, як і було вище сказано, що він має подвійне призначення. Під час роботи два з них працюють як основні перемикачі, а два інші використовуються для рециркуляції струму через свої внутрішні діоди.

Розглянемо принцип роботи тотемного стовпа: у випадку позивної півхвилі напруги мережі (потенціал витоку Q11 вищий, ніж Q5) відбувається високочастотна комутація транзистора Q12, який відкриваючись накачує енергію в дросель L2, а закриваючись енергія дроселя через антипаралельний діод транзистора Q11 заряджає накопичувальні конденсатори. При негативній півхвилі напруги мережі відбувається високочастотна комутація транзистора Q11. Це дозволяє заряджати накопичувальні конденсатори навіть тоді, коли напруга мережі нижча від напруги конденсаторів.

## ВИСНОВКИ

Спроектовано двонаправлений АС-DC інвертор, який поєднує в собі функції перетворення змінної напруги в постійну і навпаки. Розроблений двонаправлений АС-DC інвертор демонструє високу ефективність і надійність у обох режимах роботи — зарядки і розрядки акумуляторів. Використання сучасних компонентів, таких як MOSFET та IGBT транзистори, дозволило досягти високих показників ефективності та мінімізувати втрати енергії. Завдяки впровадженню APFC Totem Pole схеми, вдалося покращити коефіцієнт потужності та забезпечити стабільну роботу інвертора у різних режимах.

Цей проект підтверджує можливість створення ефективних та надійних двонаправлених інверторів, що можуть знайти широке застосування у сучасних енергетичних системах, забезпечуючи надійне живлення та ефективне управління енергоресурсами.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Офіційна довідкова інформація на драйвер NSi6602:  
<http://www.szhaina.com/uploads/media/20220417/1650184278.pdf> (дата звернення 18.06.2024)
2. Nakagawa, Akio; Ohashi, Hiromichi; Tsukakoshi, Tsuneo (1984). "High Voltage Bipolar-Mode MOSFET with High Current Capability". *Extended Abstracts of the 1984 International Conference on Solid State Devices and Materials*. doi:10.7567/SSDM.1984.B-6-2
3. Williams, R. K.; Darwish, M. N.; Blanchard, R. A.; Siemieniec, R.; Rutter, P.; Kawaguchi, Y. (2017). "The Trench Power MOSFET—Part II: Application Specific VDMOS, LDMOS, Packaging, Reliability". *IEEE Transactions on Electron Devices*. 64 (3): 692–712. Bibcode:2017ITED...64..692W. doi:10.1109/TED.2017.2655149. ISSN 0018-9383. S2CID 38550249.
4. Ott, Henry W. (1976). *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems*. John Wiley. pp. 189–192. ISBN 0-471-65726-3.
5. Офіційна довідкова інформація на електромагнітне реле:  
[https://assets.omron.eu/downloads/datasheet/en/v3/j175\\_mk-s\(x\)\\_power\\_relays\\_datasheet\\_en.pdf](https://assets.omron.eu/downloads/datasheet/en/v3/j175_mk-s(x)_power_relays_datasheet_en.pdf) (дата звернення 18.06.2024)
6. Thompson, Silvanus Phillips (1895). *Polyphase Electric Currents and Alternate-Current Motors* (1st ed.). London: E. & F.N. Spon. p. 261. Retrieved 2 December 2012.
7. Michael Peter Norton & Denis G. Karczub (2003). *Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers*. Cambridge University Press. ISBN 978-0-521-49913-2.
8. Guile, A.; Paterson, W. (1977). *Electrical Power Systems, Volume One*. Pergamon. p. 331. ISBN 0-08-021729-X.

9. Boylestad, Robert (2002-03-04). *Introductory Circuit Analysis* (10th ed.). p. 857. ISBN 978-0-13-097417-4.
10. Zhang, S. (July 2006), "Analysis of some measurement issues in bushing power factor tests in the field", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 21 (3): 1350–56, doi:10.1109/tpwrd.2006.874616, S2CID 39895367, ...(the measurement) gives both negative power factor and negative resistive current (power loss) (коефіцієнт потужності)
11. Jacques, Sebastien & Reymond, Cedric & Le Bunetel, Jean-Charles & Benabdelaziz, Ghafour. (2021). Comparison of the power balance in a Totem-Pole Bridgeless PFC topology with several inrush current limiting strategies. *Journal of Electrical Engineering*. 72. 10.2478/jee-2021-0002.

## ДОДАТОК А ПЕРЕЛІК КОМПОНЕНТІВ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ

Конденсатори:

C1-C9 – 1000 мкФ, 63В

C10-C26, C43 – C50 – 10 мкФ, 50В

C27-C32 — 10 мкФ, 100В

C33, C34 - 223J 22 нФ, 1кВ

C35-C40 – 22мкФ, 100В

C41, C42, C51 - 330 мкФ, 500В

Запобіжники:

F1, F2 – 50 А

F3 – 20 А

Резистори:

R1-R6, R65-R77, R79-R91 – 300 кОм

R7-R10 – 0,001 Ом

R11-R14 – 2,2 Ом

R15-R18, R23, R24, R30-R33, R40, R41, R60-R63 – 4,7 Ом

R19-R22, R28, R29, R34-R37, R46, R47 R50, R51, R53, R54 – 47 кОм

R25, R26, R42, R43, R55, R92 – 68 Ом

R27, R28, R44, R45, R56-R59 – 20 Ом

R38, R39, R48, R49 – 15 Ом

R64 – 910 кОм

R78 – 390 Ом

R93-R96 – 150 кОм

Транзистори:

Q1-Q4, Q7-Q10 – CRTT067N10N

Q5, Q6, Q11, Q12 – G40T60AN3H

Q13-Q16 – GSG65R130HT

Мікросхеми:

U1-U6 – NSI6602AD

Діоди:

D1-D10 - US1M

Діодні мости:

DB2 – GBU25M