

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної
та транспортної інфраструктури

Кафедра альтернативної електроенергетики та електротехніки

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до

бакалаврської кваліфікаційної роботи

на тему:

«Застосування MOSFET-транзисторів на основі карбіду кремнію в
електрифікованому транспорті»

Студент:

Ілля КУРІННИЙ

студент 3 курсу

гр. НВДЕ 2023-1у

Керівник: к.т.н. доц.

Іван КОСТЕНКО

Рецензент: к.т.н. доц.

Яна ФОРКУН

Харків – 2026

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
імені О. М. Бекетова

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та транспортної
інфраструктури

Кафедра альтернативної електроенергетики та електротехніки

Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр

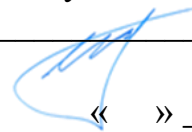
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії

ЗАТВЕРДЖУЮ

завідувач кафедри АЕЕ

канд.техн.наук., доцент Олексій ЄГОРОВ



« » _____ 2026
р.

З А В Д А Н Н Я
до бакалаврської кваліфікаційної роботи

Курінний Ілля Дмитрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1.Тема: Застосування MOSFET-транзисторів на основі карбіду кремнію в
електрифікованому транспорті

керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи:

Костенко Іван Олександрович, к.т.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом університету від «22 » травня 2026 р. №440-03

2. Строк подання студентом роботи 14.06.26

3. Схема силових електронних систем електрифікованого транспортного засобу із застосуванням SiC MOSFET.

4. Зміст бакалаврської кваліфікаційної роботи (перелік питань, які потрібно розробити):

4.1 Огляд сучасних систем електрифікованого транспорту. Аналіз силових напівпровідникових приладів для транспортних застосувань. Фізичні властивості карбіду кремнію. Переваги та недоліки SiC MOSFET порівняно з кремнієвими MOSFET та IGBT.

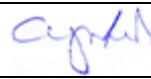
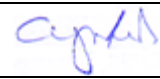
4.2. Конструкція та принцип роботи SiC MOSFET. Застосування SiC MOSFET у тягових інверторах, DC/DC-перетворювачах та бортових зарядних пристроях електромобілів. Структурні схеми силових електронних систем електрифікованого транспорту.

4.3. Розрахунок втрат потужності та коефіцієнта корисної дії тягового інвертора на базі SiC MOSFET. Порівняння енергетичних показників SiC MOSFET та IGBT.

4.4. Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових слайдів):

1. Фізичні властивості карбіду кремнію та порівняння з кремнієм;
 2. Конструкція та принцип роботи SiC MOSFET
 3. Порівняння характеристик Si MOSFET, IGBT та SiC MOSFET;
6. Консультанти розділів бакалаврської кваліфікаційної роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	Костенко І.О., доц., к.т.н.		
Охорона праці	Серіков Я.О. доц.,к.т.н		

7. Дата видачі завдання: 25.05.26

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Стан питання	25.05-28.05.26	
2.	Технічна частина	29.05-30.05.26.	
3	Розрахункова частина	31.05-02.06.26	
4.	Охорона праці	03.06-7.06.26	
5.	Оформлення паперового та електронного варіантів роботи	8.06-10.06.26	
6.	Підготовка доповіді та презентації	11.06-14.06.26	

Студент



Ілля КУРІННИЙ

Керівник



Іван КОСТЕНКО

АНОТАЦІЯ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі на тему «Застосування MOSFET-транзисторів на основі карбіду кремнію в електрифікованому транспорті» обсягом **60 стр.**, досліджено особливості застосування MOSFET-транзисторів на основі карбіду кремнію в системах електрифікованого транспорту.

Проведено аналіз фізичних властивостей карбіду кремнію та визначено переваги SiC MOSFET порівняно з традиційними кремнієвими силовими приладами.

Розглянуто конструкцію, принцип роботи та особливості використання SiC MOSFET у тягових інверторах, DC/DC-перетворювачах і бортових зарядних пристроях електромобілів. Проаналізовано перспективи розвитку карбід-кремнієвих технологій та оцінено економічну ефективність їх впровадження в сучасний електрифікований транспорт.

У розрахунковій частині визначено показники ефективності силового перетворювача на базі SiC MOSFET та виконано оцінку втрат потужності.

У розділі охорони праці розроблено заходи щодо забезпечення електробезпеки, нормативних параметрів мікроклімату та санітарно-гігієнічного стану повітря робочої зони.

Ключові слова: SiC MOSFET, карбід кремнію, силова електроніка, тяговий інвертор, DC/DC-перетворювач, електромобіль, електрифікований транспорт, енергоефективність.

формул.....	21
рисунків.....	15
таблиць.....	5
графічних робіт	8

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 СТАН ПИТАННЯ.....	9
1.1 Загальна характеристика карбіду кремнію	9
1.2 Фізичні властивості карбіду кремнію	10
1.3 Порівняння властивостей Si та SiC напівпровідників	13
1.4 Переваги компонентів на основі карбіду кремнію (SiC) в автомобільних застосуваннях.....	15
2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....	19
2.1 Конструкція та принцип роботи SiC MOSFET	19
2.2 Використання SiC MOSFET у тягових інверторах	23
2.3 Перспективи застосування SiC MOSFET в електрифікованому транспорті	27
2.4 Економічна ефективність впровадження SiC-технологій.....	30
3 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА.....	33
3.1 Розрахунок втрат потужності та коефіцієнта корисної дії тягового інвертора на базі SiC MOSFET	33
4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	39
4.1 Завдання в галузі охорони праці	39
4.2 Аналіз умов праці при розробці та дослідженні силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів. Виявлення небезпечних і шкідливих виробничих факторів	41
4.2.1. Фізичні небезпечні та шкідливі виробничі фактори	44
4.2.2 Психофізіологічні небезпечні та шкідливі виробничі фактори	45
4.3 Розробка організаційних та технічних заходів з охорони праці під час дослідження та застосування SiC MOSFET у системах електрифікованого транспорту	46

4.3.1 Забезпечення нормативних параметрів мікроклімату під час дослідження та застосування SiC MOSFET у системах електрифікованого транспорту	47
4.3.2 Забезпечення нормативного санітарно-гігієнічного складу повітря робочої зони під час дослідження та налагодження SiC MOSFET-модулів. Проєктування місцевої витяжної вентиляції	49
4.4 Забезпечення електробезпеки під час дослідження та випробування силових перетворювачів на базі SiC MOSFET	53
4.4.1 Організаційно-технічні заходи забезпечення електробезпеки під час дослідження SiC MOSFET у системах електрифікованого транспорту.....	54
4.6 Висновки до розділу «Охорона праці».....	55
ВИСНОВОК.....	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	59

ВСТУП

Стрімкий розвиток електрифікованого транспорту є одним із пріоритетних напрямків сучасної транспортної та енергетичної галузей. Зростання вимог до енергоефективності, запасу ходу, швидкості заряджання та надійності електротранспортних засобів стимулює впровадження новітніх технологій силової електроніки. Одним із ключових елементів сучасних електромобілів, електробусів та гібридних транспортних засобів є силові напівпровідникові прилади, що забезпечують перетворення та керування потоками електричної енергії в тягових приводах, зарядних пристроях та системах накопичення енергії.

Традиційно в силових перетворювачах електрифікованого транспорту використовуються кремнієві MOSFET- та IGBT-транзистори. Проте подальше підвищення ефективності силових систем обмежується фізичними властивостями кремнію, що призводить до зростання втрат енергії, необхідності використання громіздких систем охолодження та збільшення масогабаритних показників обладнання.

Перспективним напрямком розвитку силової електроніки є застосування напівпровідникових приладів на основі карбіду кремнію (SiC). MOSFET-транзистори на основі карбіду кремнію характеризуються високою пробивною напругою, малою питомою провідністю у відкритому стані, низькими комутаційними втратами та здатністю працювати на підвищених частотах і температурах. Використання SiC MOSFET дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії силових перетворювачів, зменшити масу та габарити пасивних компонентів, а також покращити динамічні характеристики електротранспортних систем.

На сьогодні SiC MOSFET активно впроваджуються у тягові інвертори електромобілів, бортові зарядні пристрої, DC/DC-перетворювачі, швидкісні зарядні станції та системи накопичення енергії. Провідні виробники електротранспорту використовують дану технологію для підвищення ефективності силових установок та збільшення запасу ходу транспортних засобів.

У зв'язку з цим актуальним є дослідження особливостей конструкції, принципів роботи, переваг та перспектив застосування SiC MOSFET-транзисторів в електрифікованому транспорті.

Метою бакалаврської кваліфікаційної роботи є дослідження особливостей MOSFET-транзисторів на основі карбіду кремнію та аналіз ефективності їх застосування в системах електрифікованого транспорту.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- дослідити фізичні властивості карбіду кремнію як матеріалу для силових напівпровідникових приладів;
- розглянути конструкцію та принцип роботи SiC MOSFET-транзисторів;
- виконати порівняльний аналіз характеристик кремнієвих та карбід-кремнієвих транзисторів;
- дослідити особливості застосування SiC MOSFET у тягових інверторах, DC/DC-перетворювачах та зарядних пристроях електротранспорту;
- проаналізувати переваги та недоліки використання SiC MOSFET у транспортних електротехнічних системах;
- визначити перспективи подальшого розвитку та впровадження карбід-кремнієвих технологій в електрифікованому транспорті.

Об'єктом дослідження є процеси перетворення та керування електричною енергією в системах електрифікованого транспорту.

Предметом дослідження є MOSFET-транзистори на основі карбіду кремнію та особливості їх використання у силових перетворювачах електротранспортних засобів.

Практичне значення роботи полягає у визначенні переваг застосування SiC MOSFET-транзисторів у сучасних системах електрифікованого транспорту, що дозволяє підвищити енергоефективність силових перетворювачів, знизити втрати електроенергії, покращити теплові режими роботи обладнання та підвищити техніко-економічні показники транспортних електротехнічних комплексів.

1 СТАН ПИТАННЯ

1.1 Загальна характеристика карбіду кремнію

Карбід кремнію (SiC) є широкозонним напівпровідниковим матеріалом, який утворюється в результаті хімічного з'єднання кремнію та вуглецю. Матеріал був відкритий наприкінці XIX століття та тривалий час використовувався переважно як абразив завдяки високій твердості. Проте розвиток технологій вирощування монокристалів дозволив застосовувати карбід кремнію у виробництві сучасних силових напівпровідникових приладів.

На відміну від традиційного кремнію, карбід кремнію характеризується значно ширшою забороненою зоною, високою електричною міцністю та підвищеною теплопровідністю. Завдяки цьому напівпровідникові прилади на його основі здатні працювати при вищих напругах, температурах та частотах комутації.

Кристалічна структура карбіду кремнію може існувати у великій кількості модифікацій, які називаються політипами. Найбільш поширеними є 3C-SiC, 4H-SiC та 6H-SiC. Для виробництва силових MOSFET-транзисторів переважно використовується політип 4H-SiC, який має оптимальне поєднання електричних характеристик та технологічних можливостей виробництва.

Сучасні SiC-прилади широко застосовуються в електромобілях, тягових перетворювачах, системах накопичення енергії, промислових інверторах та зарядних станціях великої потужності.[1]

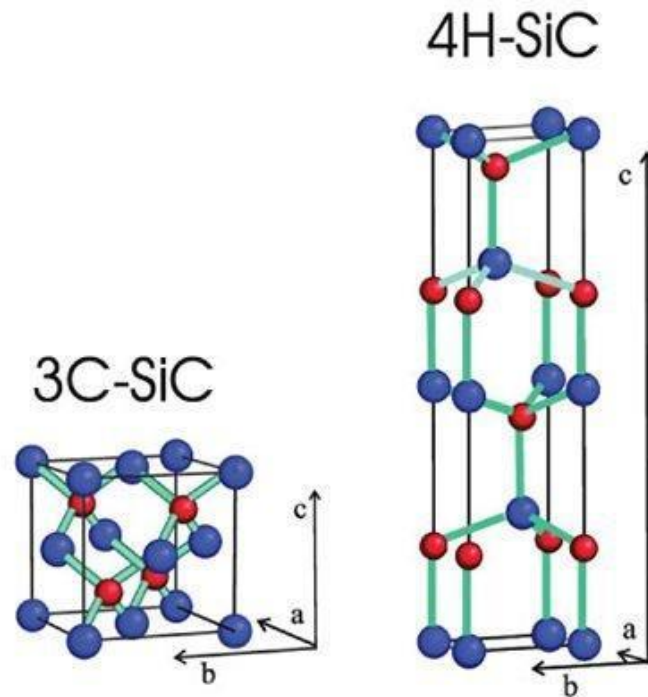


Рисунок 1.1 – Кристалічна структура політипу 4H-SiC

Основними перевагами карбіду кремнію є:

- висока пробивна напруга;
- низькі втрати під час комутації;
- можливість роботи при температурах понад 200 °C;
- висока теплопровідність;
- зменшення масогабаритних показників силових перетворювачів;
- підвищення коефіцієнта корисної дії енергетичних систем.

1.2 Фізичні властивості карбіду кремнію

Ефективність застосування карбіду кремнію в силовій електроніці обумовлена його унікальними фізичними властивостями. Найважливішими параметрами є ширина забороненої зони, критична напруженість електричного поля, теплопровідність та швидкість насичення носіїв заряду.

Ширина забороненої зони для 4H-SiC становить приблизно 3,26 еВ, тоді як для кремнію цей показник дорівнює лише 1,12 еВ. Завдяки цьому суттєво зменшуються струми витоку та підвищується температурна стабільність роботи приладів.[2]

Критична напруженість електричного поля карбіду кремнію приблизно у 10 разів перевищує аналогічний показник кремнію. Це дозволяє створювати високовольтні транзистори з меншою товщиною дрейфової області та нижчим опором відкритого каналу.

Висока теплопровідність SiC забезпечує ефективніше відведення тепла від кристала, що позитивно впливає на надійність силових модулів та дозволяє зменшити габарити систем охолодження.

Крім того, висока швидкість руху носіїв заряду сприяє роботі транзисторів на значно вищих частотах комутації порівняно з кремнієвими аналогами.

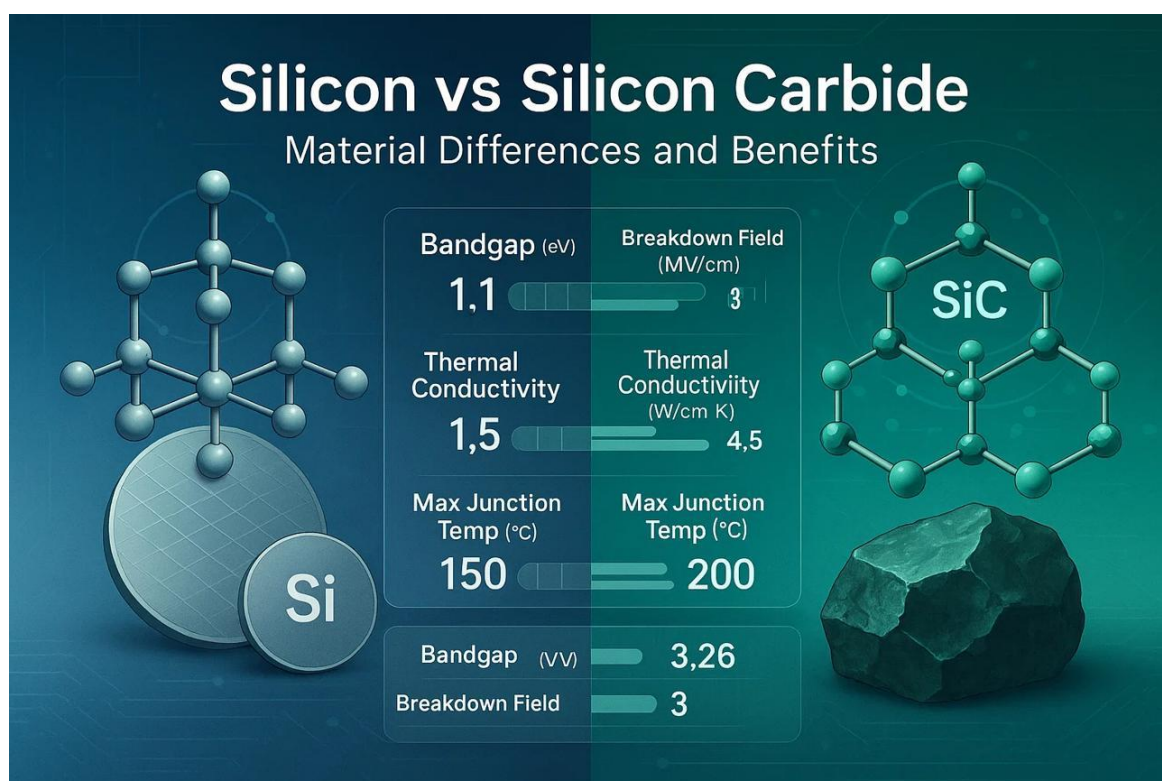


Рисунок 1.2 – Порівняння фізичних властивостей кремнію та карбіду кремнію

Основні параметри карбіду кремнію наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні фізичні параметри напівпровідникових матеріалів Si та 4H-SiC

Параметр	Кремній (Si)	Карбід кремнію (4H-SiC)
Ширина забороненої зони, E_g , eV	1,12	3,26
Критична напруженість електричного поля, МВ/см	0,3	2,8
Теплопровідність, Вт/(см·К)	1,5	4,9
Робоча температура переходу, °C	до 150	понад 200
Швидкість насичення електронів, см/с	1×10^7	2×10^7
Діелектрична проникність	11,8	9,7
Рухливість електронів, $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	1400	950
Питомий опір дрейфової області при однаковій пробивній напрузі	1	приблизно 1/300
Максимальна робоча напруга приладів, В	до 1200	понад 6500
Частота комутації	десятки кГц	сотні кГц – одиниці МГц
Втрати на перемикання	Високі	Низькі
Розміри системи охолодження	Значні	Зменшені
Щільність потужності перетворювачів	Середня	Висока

Як видно з таблиці 1.1, карбід кремнію суттєво перевершує кремній за критичною напруженістю електричного поля, шириною забороненої зони та теплопровідністю. Це дозволяє створювати силові напівпровідникові прилади з вищою робочою напругою, меншими втратами потужності та покращеними тепловими характеристиками. Саме тому SiC MOSFET-транзистори набувають широкого поширення в сучасних системах електрифікованого транспорту, де особливе значення мають високий ККД, компактність та надійність силових перетворювачів.

1.3 Порівняння властивостей Si та SiC напівпровідників

Традиційний кремній протягом багатьох десятиліть був основним матеріалом для виробництва силових напівпровідникових приладів. Однак зі зростанням вимог до енергоефективності електротранспортних систем можливості кремнієвих компонентів поступово наближаються до своїх фізичних меж. Структура SiC напівпровідників зображена на рисунку 1.3

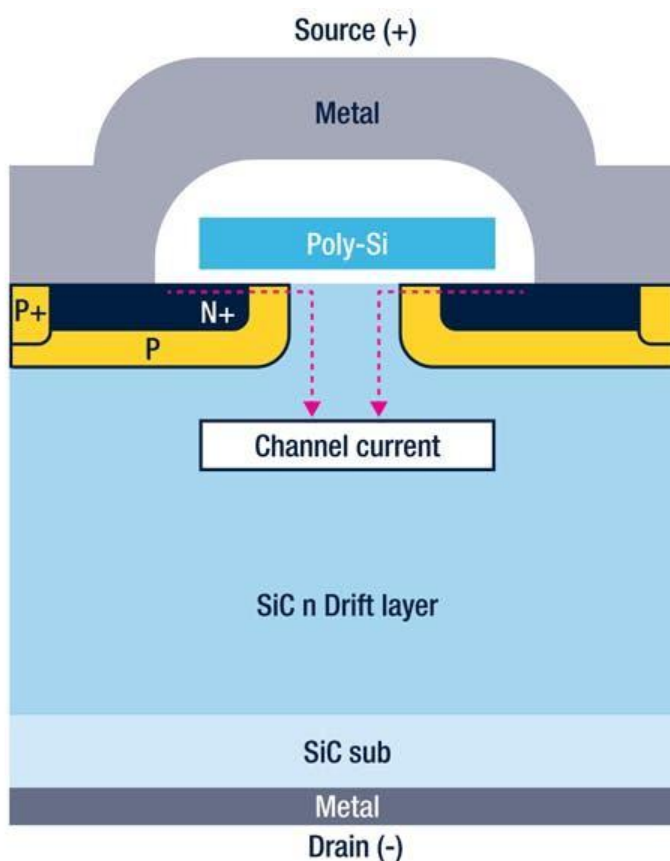


Рисунок 1.3 – Пошарова структура SiC

Головною перевагою кремнієвих транзисторів залишається їхня відносно низька вартість та добре відпрацьована технологія виробництва. Водночас збільшення робочої напруги та частоти комутації призводить до суттєвого зростання втрат потужності.[3]

Застосування карбіду кремнію дозволяє значно зменшити як статичні, так і динамічні втрати. У результаті коефіцієнт корисної дії сучасних перетворювачів може перевищувати 98–99 %.

Для електрифікованого транспорту це означає:

- збільшення запасу ходу електромобіля;
- зменшення маси силового перетворювача;
- зменшення розмірів систем охолодження;
- можливість використання акумуляторних батарей з вищою напругою;
- підвищення надійності силових модулів.

Порівняння структури та втрат потужності Si та SiC MOSFET зображено на рисунку 1.4.

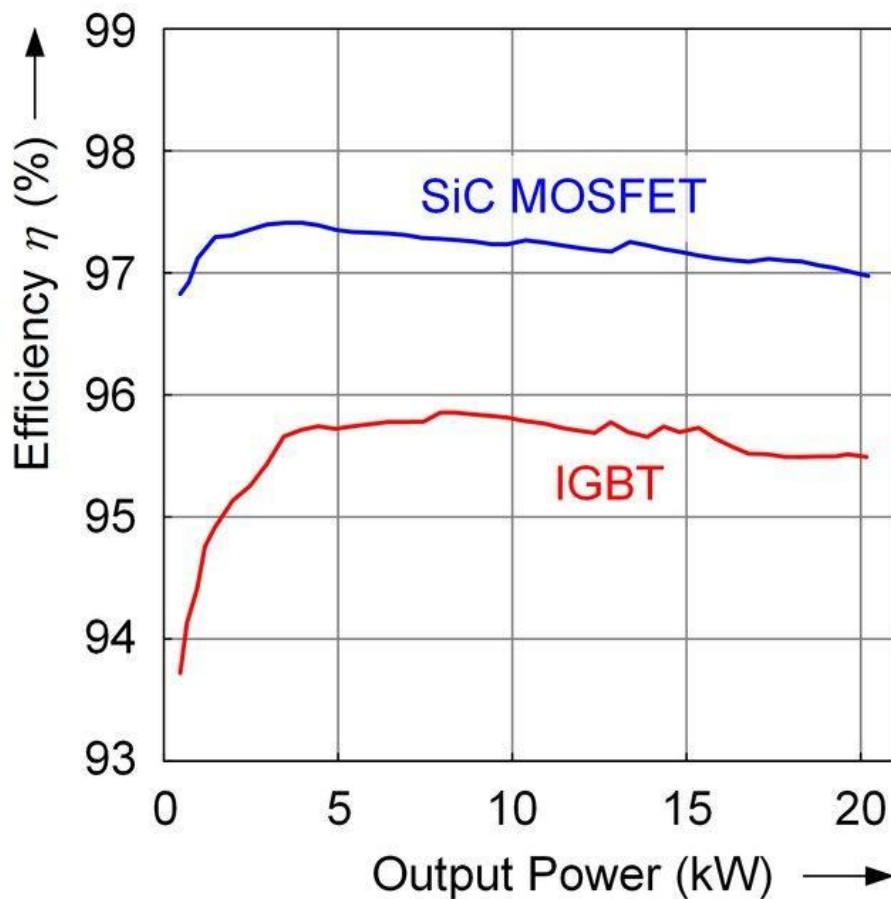


Рисунок 1.4 – Порівняння структури та втрат потужності Si та SiC MOSFET

У сучасних електромобілях використання SiC MOSFET дозволяє підвищити ефективність тягового інвертора на 1–3 %, що забезпечує помітне збільшення запасу ходу без зміни ємності акумуляторної батареї. Саме тому більшість виробників високоефективного електротранспорту поступово переходять від кремнієвих IGBT до карбід-кремнієвих транзисторів.

1.4 Переваги компонентів на основі карбіду кремнію (SiC) в автомобільних застосуваннях

Сучасний розвиток електрифікованого транспорту безпосередньо пов'язаний із необхідністю підвищення енергоефективності транспортних засобів, скорочення споживання викопних палив та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Посилення екологічних вимог і впровадження міжнародних програм декарбонізації сприяють стрімкому зростанню кількості електромобілів у світі. Так, за період з 2010 по 2021 рік світовий парк легкових електромобілів збільшився з 0,017 млн до 16,267 млн одиниць, що свідчить про надзвичайно високі темпи розвитку галузі. Зростання кількості електрифікованих транспортних засобів стимулює розвиток нових технологій силової електроніки та підвищує вимоги до енергоефективності силових перетворювачів.

Одним із ключових елементів сучасного електротранспорту є силові напівпровідникові прилади, які використовуються в тягових інверторах, бортових зарядних пристроях та DC/DC-перетворювачах. До останнього часу переважна більшість силових систем будувалася на основі кремнієвих MOSFET- та IGBT-транзисторів. Особливо широкого поширення набули IGBT-модулі, які завдяки високій пробивній напрузі та низькому опору провідності успішно використовуються у тягових електроприводах великої потужності.

Проте подальше підвищення ефективності кремнієвих приладів обмежується фізичними властивостями самого матеріалу. Кремнієві транзистори характеризуються відносно високими комутаційними втратами та обмеженою швидкістю перемикання. Як наслідок, робоча частота більшості силових

перетворювачів на основі IGBT зазвичай не перевищує 20 кГц. Це призводить до збільшення втрат енергії, розмірів пасивних компонентів та систем охолодження.

Перспективною альтернативою кремнію стали широкозонні напівпровідникові матеріали третього покоління, серед яких особливе місце займає карбід кремнію (SiC). Порівняно з кремнієм карбід кремнію характеризується значно вищою теплопровідністю, більшою діелектричною проникністю, підвищеною швидкістю насичення носіїв заряду, високою температурою плавлення та значною механічною міцністю. Порівняння основних фізичних параметрів кремнію та карбіду кремнію наведено на рисунку 1.2 та в таблиці 1.1.

Ширина забороненої зони для політипу 4H-SiC становить приблизно 3,26 еВ, тоді як для кремнію цей показник дорівнює лише 1,12 еВ. Таким чином, ширина забороненої зони карбіду кремнію майже втричі перевищує аналогічний параметр кремнію. Це забезпечує значно меншу концентрацію неосновних носіїв заряду та підвищує електричну міцність напівпровідникової структури.[4]

Не менш важливою характеристикою є критична напруженість електричного поля. Для кремнію вона становить близько 0,3 МВ/см, тоді як для карбіду кремнію досягає 2,8 МВ/см. Це майже у 10 разів більше, що дозволяє створювати високовольтні прилади з меншою товщиною дрейфової області та нижчим опором відкритого каналу.

Теплопровідність карбіду кремнію становить приблизно 4,9 Вт/(см·К), що більш ніж втричі перевищує відповідний показник кремнію (1,5 Вт/(см·К)). Завдяки цьому забезпечується ефективніше відведення тепла від кристала, що дозволяє зменшити габарити радіаторів та систем охолодження силових модулів.

Висока швидкість насичення електронів також є важливою перевагою SiC. Для кремнію цей показник становить близько 1×10^7 см/с, а для карбіду кремнію – приблизно 2×10^7 см/с. Це забезпечує можливість роботи на значно вищих частотах комутації та сприяє зменшенню масогабаритних показників силових перетворювачів.

Завдяки переліченим фізичним властивостям SiC MOSFET-транзистори мають менші втрати провідності та комутації, вищу швидкість перемикавання, менші габарити та вищу пробивну напругу порівняно з кремнієвими аналогами.

Крім того, максимально допустима температура переходу для сучасних SiC MOSFET може перевищувати 200 °C, а окремі експериментальні зразки здатні працювати при температурах до 300 °C. Це суттєво розширює можливості їх використання в електротранспортних системах, де часто виникають значні теплові навантаження.

Застосування SiC MOSFET у тягових інверторах, бортових зарядних пристроях та DC/DC-перетворювачах дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії силових систем до 98–99 %, зменшити втрати електроенергії та підвищити щільність потужності обладнання. Завдяки цьому зменшуються маса та габарити силових модулів, а також збільшується запас ходу електромобілів.

Запровадження карбіду кремнію (SiC) в автомобільних застосуваннях наведено на рисунку 1.5.

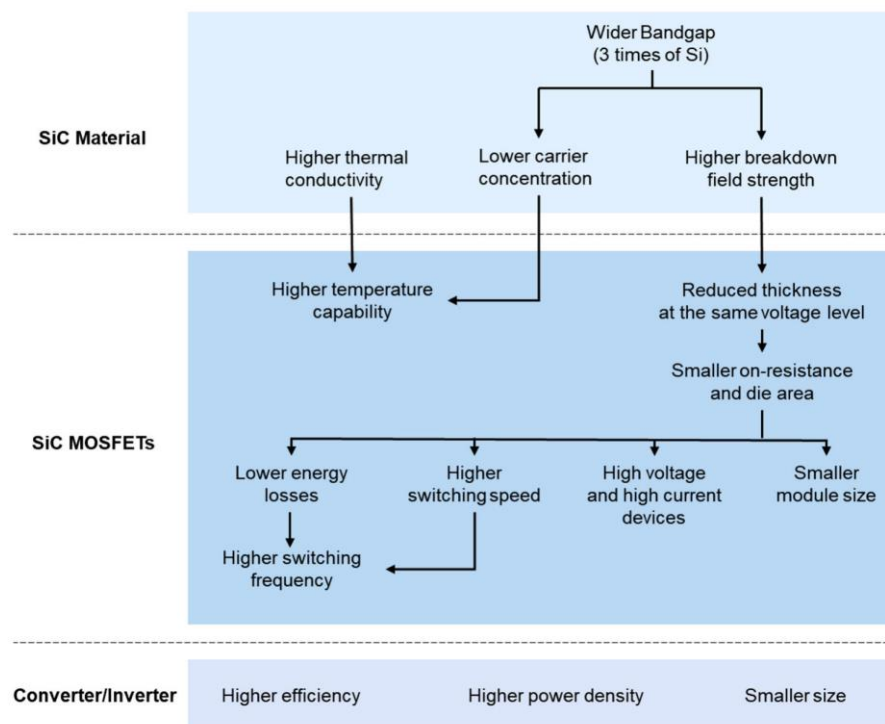


Рисунок 1.5 – Карбід кремнію (SiC) в автомобільних застосуваннях

Етапи розвитку технології карбіду кремнію та впровадження SiC MOSFET у транспортній галузі наведено на рисунку 1.6.

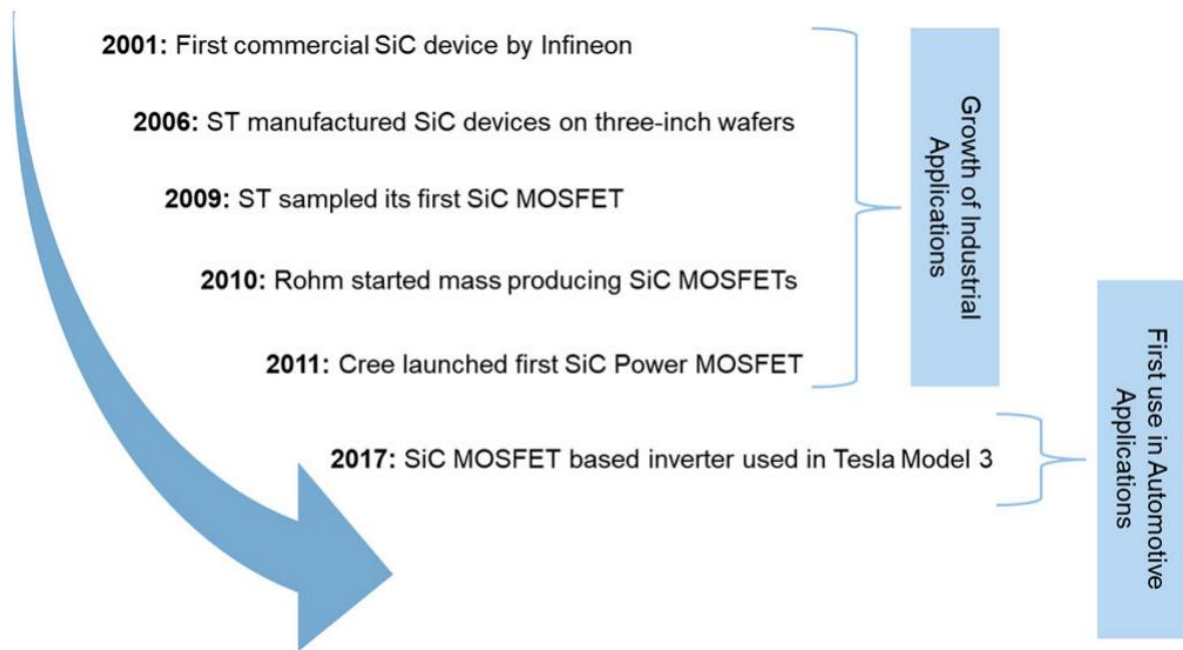


Рисунок 1.6 – Етапи розвитку технології карбіду кремнію та впровадження SiC MOSFET у транспортній

Незважаючи на те, що перші комерційні SiC-прилади були створені ще на початку 2000-х років, їх масове впровадження в автомобільній промисловості розпочалося лише після 2017 року. Сьогодні сфера застосування карбід-кремнієвих транзисторів продовжує стрімко розширюватися, що робить дану технологію одним із найперспективніших напрямків розвитку сучасної силової електроніки для електрифікованого транспорту.

2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1 Конструкція та принцип роботи SiC MOSFET

MOSFET-транзистори на основі карбіду кремнію (SiC MOSFET) є сучасними силовими напівпровідниковими приладами, які поєднують високу швидкодію польового транзистора з унікальними фізичними властивостями карбіду кремнію. Завдяки низьким комутаційним втратам, високій робочій температурі та можливості роботи при значних напругах SiC MOSFET знаходять широке застосування в тягових інверторах електромобілів, бортових зарядних пристроях та DC/DC-перетворювачах.

На відміну від традиційних кремнієвих MOSFET, карбід-кремнієві транзистори виготовляються на основі політипу 4H-SiC, який характеризується широкою забороненою зоною (3,26 eV), високою критичною напруженістю електричного поля (2,8 MB/см) та підвищеною теплопровідністю. Завдяки цьому можливо створювати високовольтні транзистори з низьким опором відкритого каналу та малими втратами потужності.

Конструктивно сучасний SiC MOSFET має вертикальну структуру, яка дозволяє пропускати значні струми через кристал. Типова структура транзистора складається з таких основних елементів:

- витік (Source);
- затвор (Gate);
- стік (Drain);
- оксидний шар SiO₂;
- р-бази;
- n-дрейфової області;
- n⁺ підкладки.

Провідний канал формується під затвором у р-базі при подачі позитивної напруги між затвором та витоком.

Під час подачі напруги на затвор виникає електричне поле, яке притягує електрони до поверхні р-бази. У результаті формується інверсійний канал n-типу, через який електрони можуть рухатися від витoku до стоку. Таким чином транзистор переходить у відкритий стан.

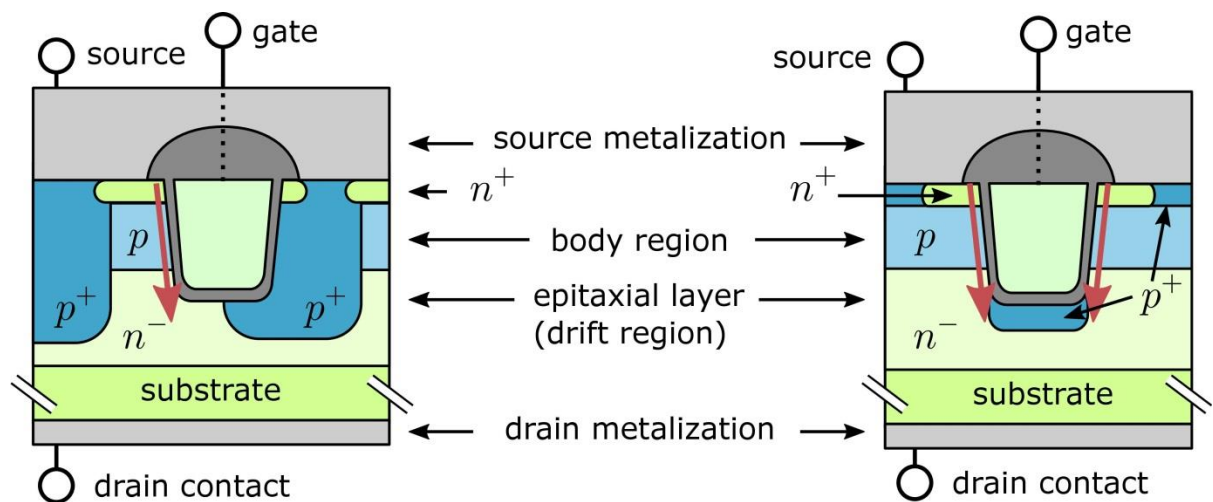


Рисунок 2.1 – Структура вертикального SiC MOSFET

У закритому стані напруга на затворі відсутня, інверсійний канал не формується, а струм між витком та стоком практично не протікає. Завдяки широкій забороненій зоні карбіду кремнію струми витoku залишаються дуже малими навіть при високих температурах.

Однією з найважливіших переваг SiC MOSFET є відсутність накопичення неосновних носіїв заряду, характерного для IGBT-транзисторів. Саме тому процеси ввімкнення та вимкнення відбуваються значно швидше, а втрати на комутацію суттєво зменшуються.

Принцип роботи SiC MOSFET можна пояснити за допомогою вихідних характеристик транзистора. При збільшенні напруги затвора збільшується провідність каналу, що призводить до зростання струму стоку. Робочий режим визначається величиною напруги затвор-витік U_{GS} та напругою стік-витік U_{DS} .

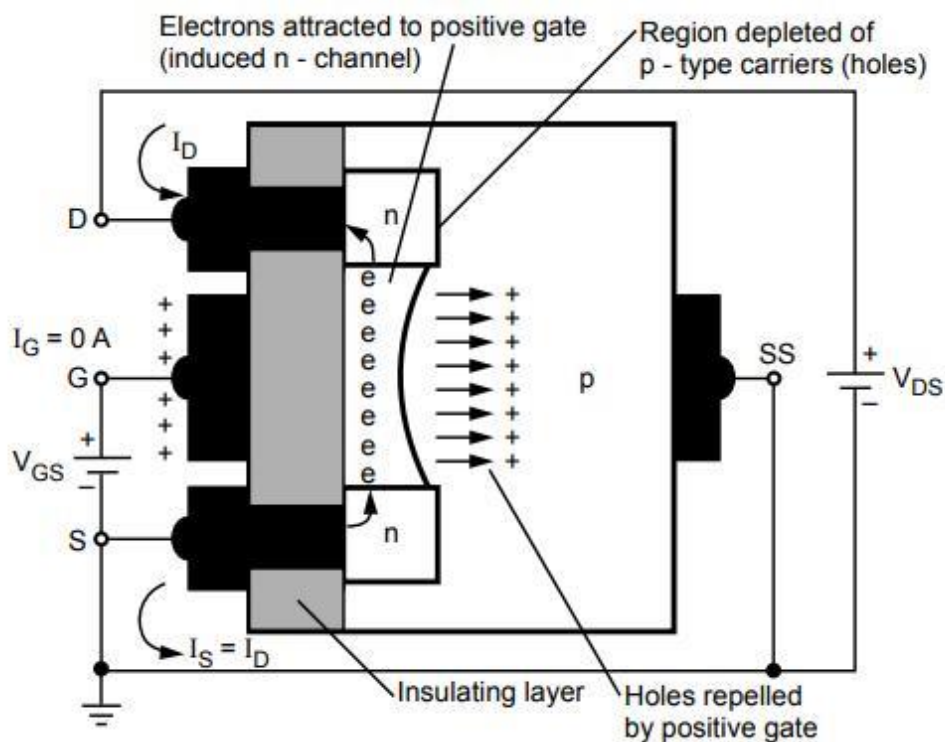


Рисунок 2.2 – Принцип роботи та рух носіїв заряду в SiC MOSFET

У силових перетворювачах електротранспорту SiC MOSFET працюють переважно в ключовому режимі. У такому режимі транзистор перебуває або у повністю відкритому, або у повністю закритому стані. Це дозволяє мінімізувати втрати потужності та підвищити коефіцієнт корисної дії силового перетворювача.

Завдяки високій швидкості перемикання SiC MOSFET можуть працювати на частотах у декілька разів вищих за кремнієві IGBT. Якщо для більшості IGBT робоча частота обмежується 10–20 кГц, то для SiC MOSFET вона може досягати 100–300 кГц і більше залежно від потужності пристрою.[7]

Ще однією важливою особливістю є значно менший опір відкритого каналу $R_{DS(on)}$. Це дозволяє зменшити втрати провідності та підвищити ефективність роботи силових модулів. Для сучасних тягових інверторів електромобілів використання SiC MOSFET забезпечує підвищення ККД на 1–3 % порівняно з аналогічними системами на основі кремнієвих IGBT.

Порівняння процесів перемикання кремнієвих IGBT та карбід-кремнієвих MOSFET наведено на рисунку 2.3.

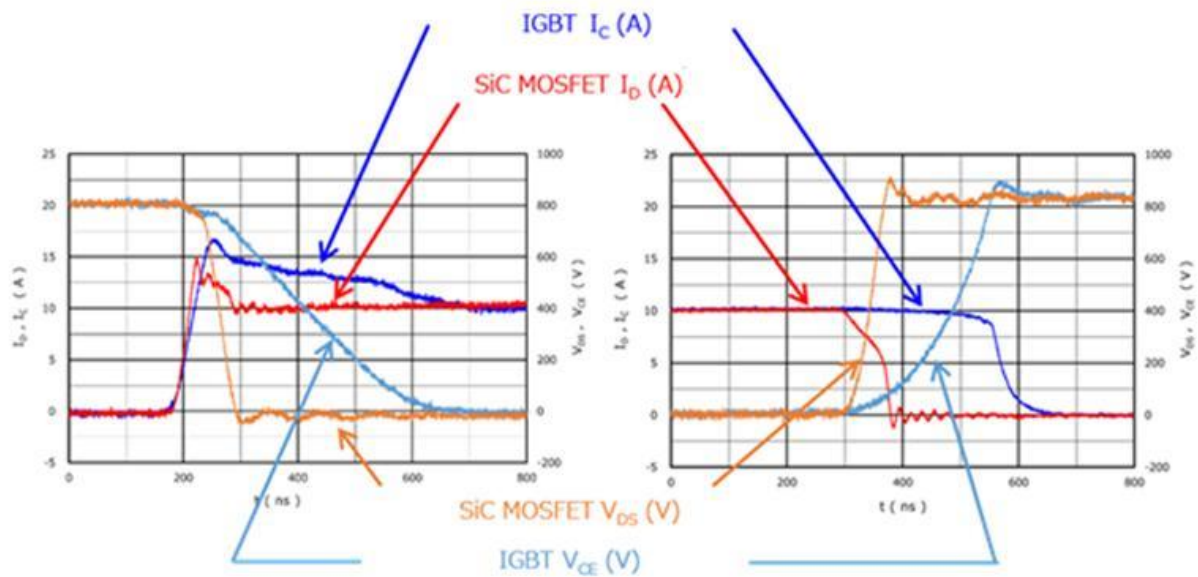


Рисунок 2.3 – Порівняння комутаційних процесів IGBT та SiC MOSFET

Умовне позначення та еквівалентна схема заміщення SiC MOSFET зображено на рисунку 2.4.

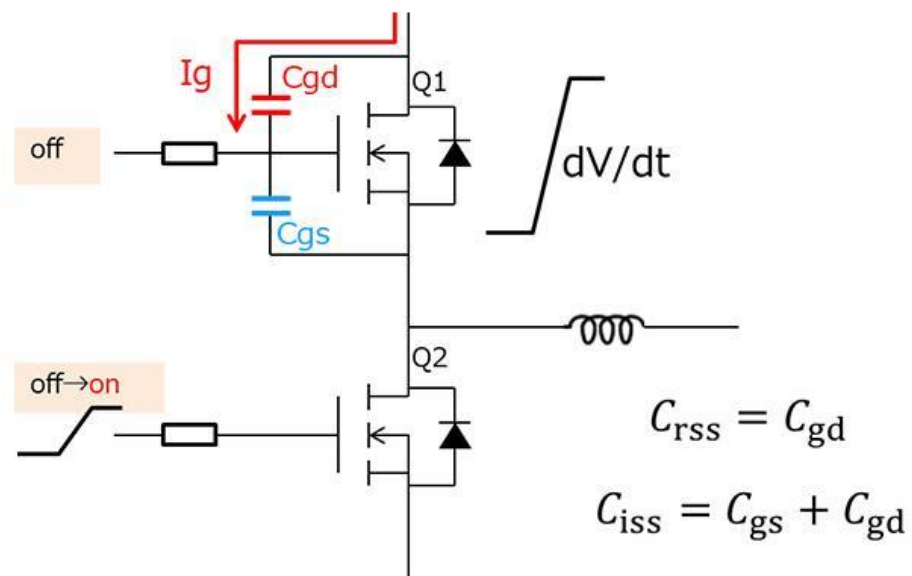


Рисунок 2.4 – Умовне позначення та еквівалентна схема заміщення SiC MOSFET

2.2 Використання SiC MOSFET у тягових інверторах

Тяговий інвертор є одним із найважливіших елементів електрифікованого транспортного засобу. Його основним призначенням є перетворення постійної напруги акумуляторної батареї у трифазну змінну напругу, необхідну для живлення тягового електродвигуна. Від характеристик силових ключів, що використовуються в інверторі, значною мірою залежать енергоефективність транспортного засобу, запас ходу, динамічні характеристики та надійність роботи електроприводу.

Традиційно в тягових інверторах електромобілів використовувалися кремнієві IGBT-модулі. Проте розвиток технологій широкозонних напівпровідників сприяв активному впровадженню SiC MOSFET-транзисторів, які забезпечують суттєве покращення характеристик силових перетворювачів.

Типова структура електроприводу електромобіля із застосуванням тягового інвертора наведена на рисунку 2.5.

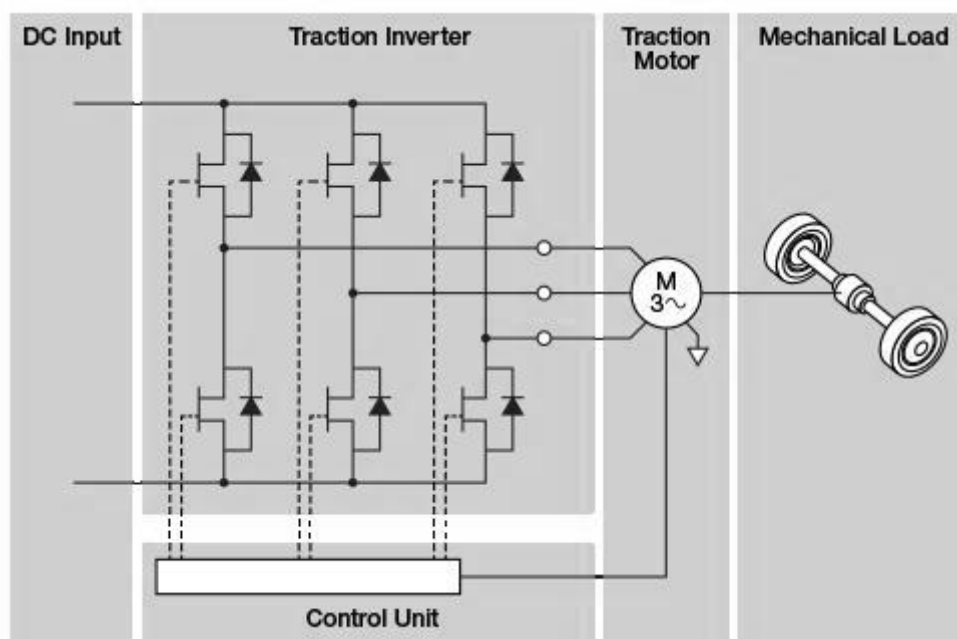


Рисунок 2.5 – Структурна схема електроприводу електромобіля з тяговим інвертором

У сучасних електромобілях акумуляторна батарея формує високовольтну шину постійного струму напругою від 400 до 800 В. Тяговий інвертор на базі SiC MOSFET здійснює формування трифазної системи напруг для живлення синхронного або асинхронного тягового двигуна. Керування транзисторами виконується за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), що дозволяє плавно регулювати частоту та амплітуду вихідної напруги.

Основною перевагою SiC MOSFET є значне зменшення комутаційних втрат. При кожному перемиканні силового ключа відбувається короткочасне перекриття струму та напруги, що супроводжується виділенням енергії у вигляді тепла. Завдяки високій швидкості перемикання SiC MOSFET тривалість перехідних процесів значно менша порівняно з кремнієвими IGBT, що забезпечує суттєве зниження втрат потужності.

Приклад силового модуля на базі SiC MOSFET наведено на рисунку 2.6.



Рисунок 2.6 – Модуль SiC MOSFET

Важливою особливістю SiC MOSFET є відсутність ефекту накопичення неосновних носіїв заряду, характерного для IGBT. Завдяки цьому практично відсутній так званий «струмовий хвіст» під час вимкнення транзистора. Це дозволяє працювати на значно вищих частотах комутації, що особливо важливо для тягових інверторів електромобілів.[9]

У сучасних системах електроприводу робоча частота IGBT-інверторів зазвичай становить 8–20 кГц. Для SiC MOSFET цей показник може досягати 50–100 кГц і більше. Підвищення частоти комутації дозволяє суттєво зменшити масу та габарити пасивних компонентів, таких як фільтри та дроселі.

Ще однією важливою перевагою є можливість роботи при підвищених температурах. Якщо максимальна температура переходу кремнієвих IGBT зазвичай не перевищує 150–175 °C, то для SiC MOSFET вона може становити 200–250 °C. Це дозволяє спростити систему охолодження та підвищити надійність роботи силових модулів.

На рисунку 2.7 показано приклад елемента трифазного тягового інвертора на базі SiC MOSFET.

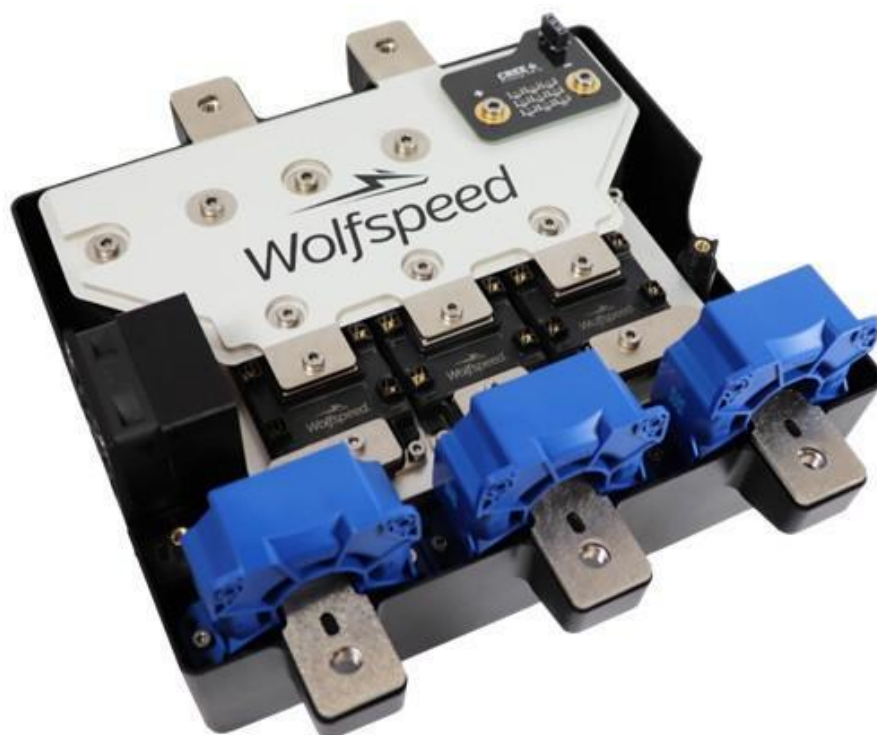


Рисунок 2.7 – Трифазний тяговий інвертор на базі SiC MOSFET

Застосування SiC MOSFET особливо ефективно в електромобілях із високовольтною архітектурою 800 В. При збільшенні напруги батареї для передачі тієї самої потужності необхідний менший струм, що дозволяє знизити втрати у кабелях та силових елементах. Саме тому багато сучасних виробників електромобілів переходять на використання високовольтних систем у поєднанні з карбід-кремнієвими силовими модулями.

Серед найбільш відомих прикладів використання SiC MOSFET можна виділити електромобілі компанії Tesla, де карбід-кремнієві транзистори використовуються у тягових інверторах моделей серії Model 3 та Model Y. Аналогічні рішення застосовуються в електромобілях компаній Hyundai Motor Company, Kia Corporation, Lucid Motors та інших виробників.

Порівняльний аналіз показує, що використання SiC MOSFET дозволяє підвищити ККД тягового інвертора до 98–99 %, знизити тепловиділення, зменшити масу системи охолодження та збільшити запас ходу електромобіля на 3–10 % залежно від режимів експлуатації.

На рисунку 2.8 наведено порівняння втрат потужності в тягових інверторах на базі IGBT та SiC MOSFET.

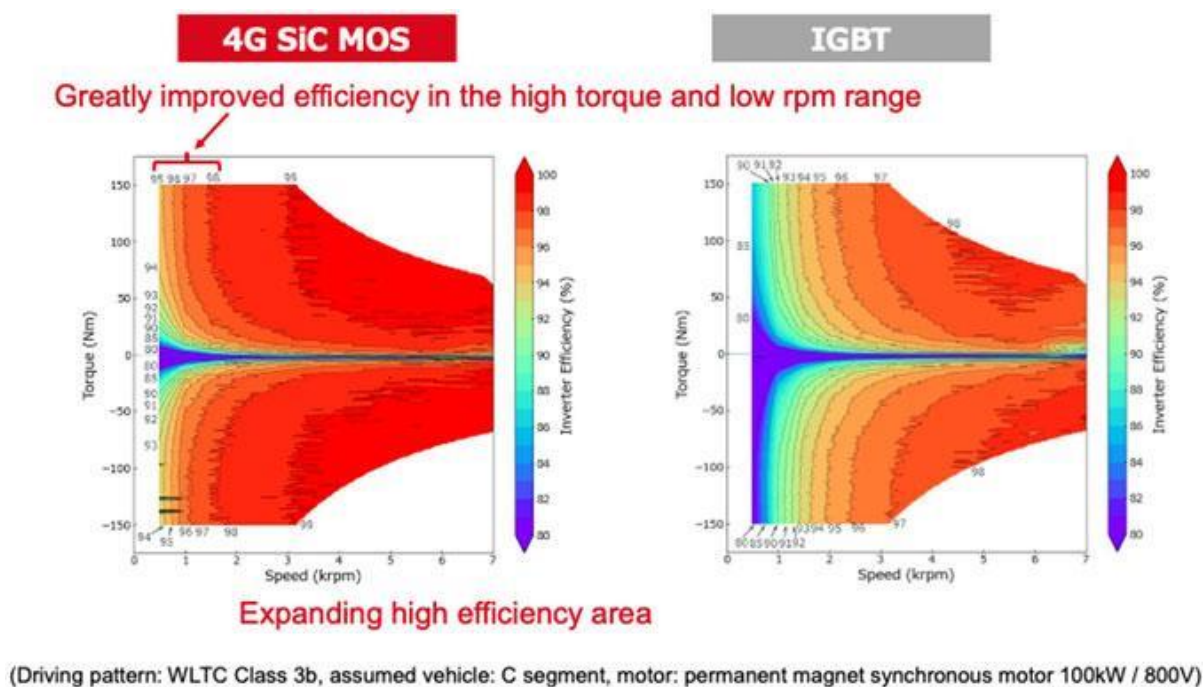


Рисунок 2.8 – Порівняння втрат потужності в тягових інверторах на базі IGBT та SiC MOSFET

Таким чином, використання SiC MOSFET у тягових інверторах є одним із найбільш перспективних напрямків розвитку електрифікованого транспорту. Поєднання високої швидкості перемикання, низьких втрат потужності, високої робочої температури та можливості роботи у високовольтних системах забезпечує значне підвищення ефективності електромобілів та сприяє подальшому розвитку електротранспортної галузі.

2.3 Перспективи застосування SiC MOSFET в електрифікованому транспорті

Застосування MOSFET-транзисторів на основі карбіду кремнію є одним із найперспективніших напрямків розвитку силової електроніки для електрифікованого транспорту. Високі електричні та теплові характеристики SiC дозволяють створювати більш ефективні, компактні та надійні системи перетворення електричної енергії порівняно з традиційними кремнієвими приладами.

Основними напрямками використання SiC MOSFET в електрифікованому транспорті є тягові інвертори, DC/DC-перетворювачі, бортові зарядні пристрої (OBC) та системи швидкісного заряджання. Саме ці вузли визначають енергоефективність електромобіля та значною мірою впливають на його запас ходу.

Однією з головних переваг SiC MOSFET є можливість роботи при високих напругах до 1200 В і більше. Це робить їх особливо актуальними для сучасних платформ електромобілів з напругою акумуляторної батареї 800 В. Перехід до високовольтних систем дозволяє зменшити струм у силових колах, знизити втрати енергії та зменшити переріз силових кабелів. Основні сфери застосування SiC MOSFET в електромобілі наведено на риунку 2.5.

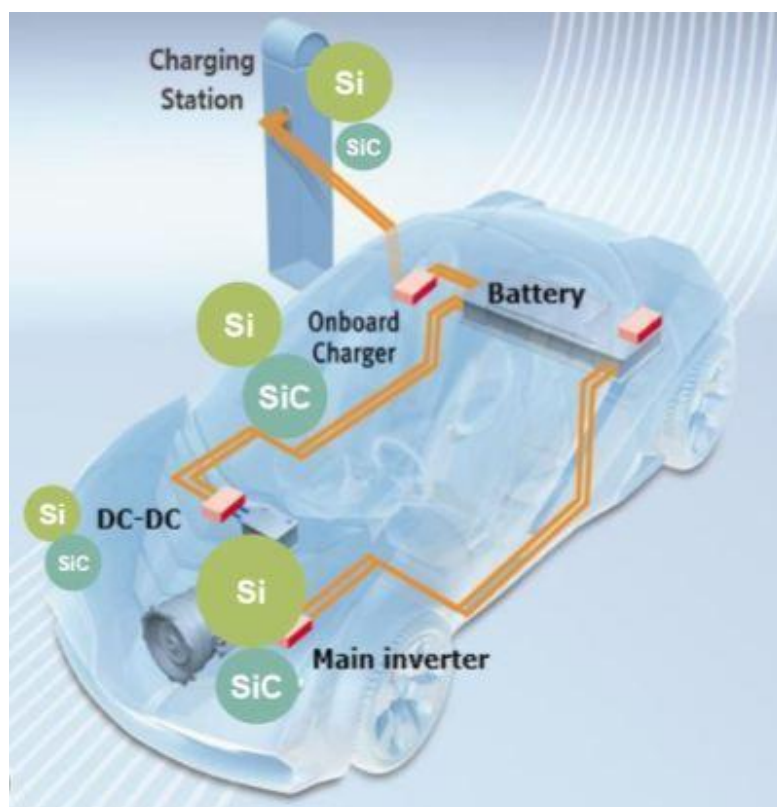


Рисунок 2.5 – Основні сфери застосування SiC MOSFET в електромобілі

Використання SiC MOSFET у тягових інверторах дозволяє підвищити ККД електропривода до 98–99 %, зменшити втрати енергії та покращити динамічні характеристики електромобіля. Завдяки високій швидкості комутації зменшуються габарити пасивних елементів, що сприяє підвищенню питомої потужності силових модулів.

Важливим напрямком розвитку є інтеграція SiC MOSFET у системи швидкісного заряджання постійним струмом. Використання карбід-кремнієвих приладів дозволяє створювати зарядні станції потужністю понад 350 кВт із високим коефіцієнтом корисної дії та зниженими експлуатаційними витратами.

Перспективним також є застосування SiC MOSFET у вантажному електротранспорті, електробусах, гібридних автомобілях та спеціалізованій техніці. Для таких транспортних засобів особливого значення набуває зменшення втрат енергії та підвищення надійності силових систем.

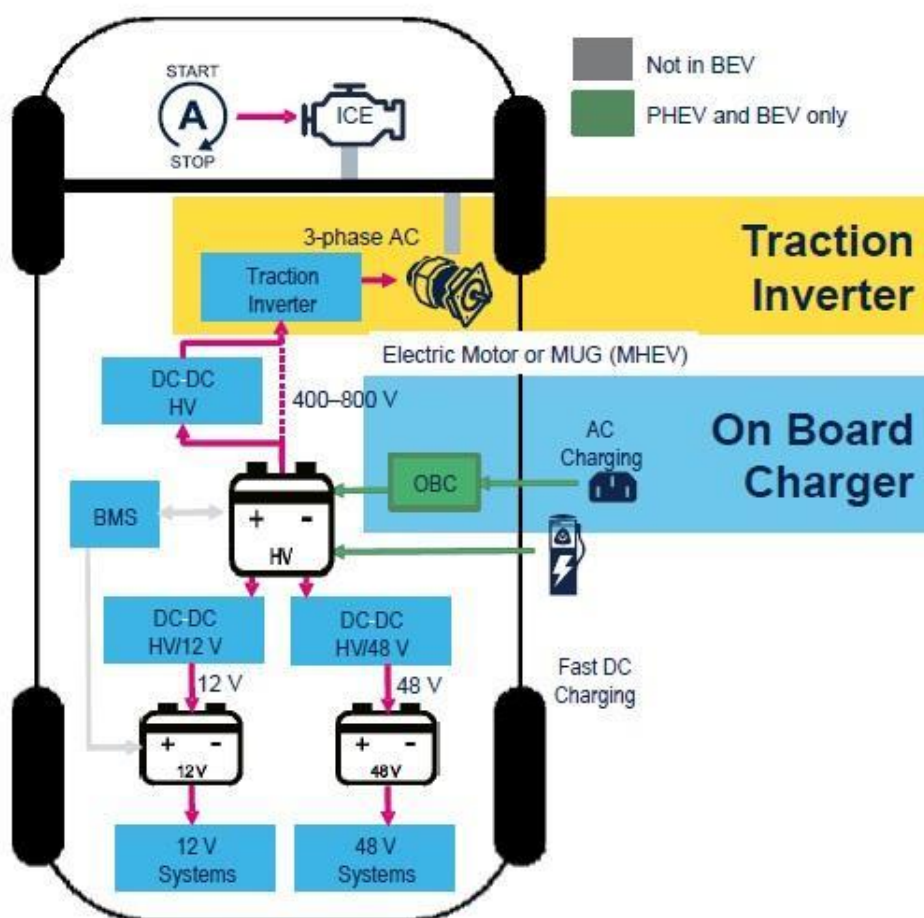


Рисунок 2.6 – Тяговий інвертор електромобіля на базі SiC MOSFET

Очікується, що в найближчі роки частка SiC MOSFET у транспортних застосуваннях буде постійно зростати. Основними факторами такого зростання є збільшення виробництва електромобілів, перехід на високовольтні архітектури та необхідність підвищення енергоефективності електротранспортних систем.[12]

Таким чином, SiC MOSFET можна розглядати як одну з ключових технологій розвитку сучасного електрифікованого транспорту, яка забезпечує підвищення енергоефективності, зменшення масогабаритних показників силових систем та збільшення запасу ходу електромобілів.

2.4 Економічна ефективність впровадження SiC-технологій

Незважаючи на те, що вартість SiC MOSFET залишається вищою порівняно з традиційними кремнієвими IGBT та MOSFET, використання карбід-кремнієвих технологій забезпечує суттєві економічні переваги протягом усього життєвого циклу транспортного засобу.

Основним джерелом економічного ефекту є зменшення втрат електроенергії в силових перетворювачах. Вищий коефіцієнт корисної дії тягового інвертора дозволяє ефективніше використовувати енергію акумуляторної батареї та збільшити запас ходу без зміни її ємності. Порівняння втрат потужності в IGBT та SiC MOSFET наведено на рисунку 2.7.

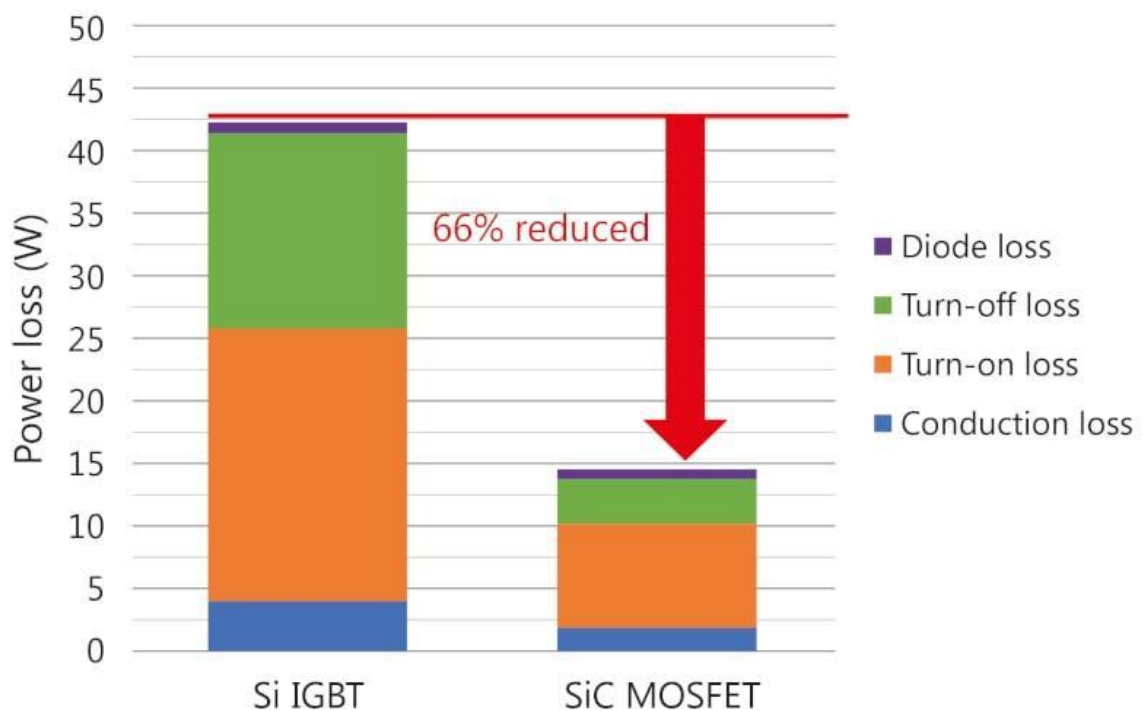


Рисунок 2.7 – Порівняння втрат потужності в IGBT та SiC MOSFET

Використання SiC MOSFET також дозволяє зменшити масу систем охолодження, дроселів, трансформаторів та силових кабелів. Це знижує

матеріаломісткість конструкції та спрощує компонування силових модулів (рисунок 2.8).

Додатковий економічний ефект досягається завдяки підвищенню надійності обладнання. Менші теплові втрати сприяють збільшенню терміну служби силових модулів і зниженню витрат на технічне обслуговування та ремонт.

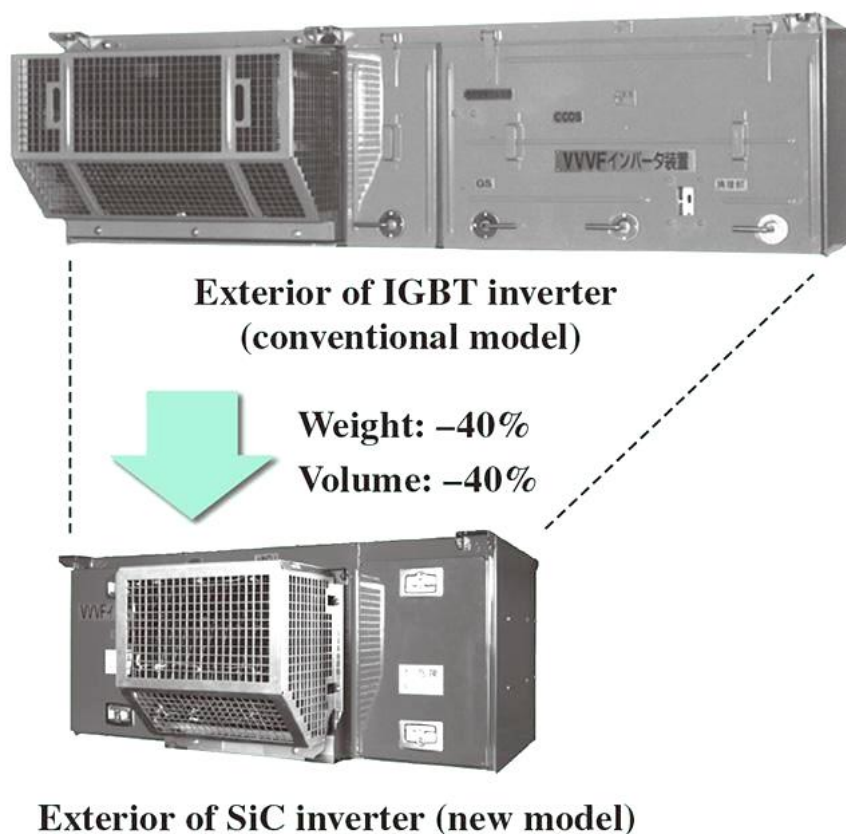


Рисунок 2.8 – Зменшення габаритів та маси силових систем при використанні SiC MOSFET

За оцінками провідних виробників електронних компонентів, застосування SiC MOSFET у тягових інверторах дозволяє знизити втрати енергії на 20–35 % та підвищити щільність потужності силових модулів у 1,5–2 рази. Це створює передумови для зменшення вартості експлуатації електромобілів та підвищення їх конкурентоспроможності.

Хоча початкові витрати на використання карбід-кремнієвих компонентів є вищими, економічний ефект від зменшення енергоспоживання, підвищення надійності та зниження експлуатаційних витрат компенсує додаткові капітальні вкладення. Тому впровадження SiC-технологій є економічно доцільним для сучасних систем електрифікованого транспорту.

Отже, застосування SiC MOSFET забезпечує не лише технічні переваги, але й значний економічний ефект, що робить їх одним із найбільш перспективних рішень для майбутніх поколінь електромобілів.

3 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

3.1 Розрахунок втрат потужності та коефіцієнта корисної дії тягового інвертора на базі SiC MOSFET

Одним із основних показників ефективності тягового інвертора електрифікованого транспортного засобу є величина втрат потужності у силових напівпровідникових ключах. Саме втрати в транзисторах визначають тепловий режим роботи силового модуля, вимоги до системи охолодження, загальний коефіцієнт корисної дії електропривода та запас ходу транспортного засобу.

У тягових інверторах електромобілів силові транзистори працюють переважно у ключовому режимі. При цьому основними складовими втрат є:

- втрати провідності у відкритому стані;
- втрати під час комутації;
- додаткові втрати, пов'язані з роботою зворотного діода, паразитними ємностями та перехідними процесами.

У спрощеному інженерному розрахунку основну увагу доцільно приділити двом головним складовим: втратам провідності та комутаційним втратам.

Загальні втрати потужності одного силового транзистора визначаються як сума втрат провідності та втрат на перемикання:

$$P_{\text{тр}} = P_{\text{пров}} + P_{\text{комут}}, \quad (3.1)$$

де $P_{\text{тр}}$ – загальні втрати потужності транзистора, Вт;

$P_{\text{пров}}$ – втрати провідності, Вт;

$P_{\text{комут}}$ – втрати на перемикання, Вт.

Втрати провідності визначаються за формулою:

$$P_{\text{пров}} = I_{\text{rms}}^2 \cdot R_{\text{DS(on)}}, \quad (3.2)$$

де I_{rms} – діюче значення струму через транзистор, А;

$R_{DS(on)}$ – опір відкритого каналу транзистора, Ом.

Втрати на перемикання визначаються виразом:

$$P_{комут} = (E_{on} + E_{off}) \cdot f_{sw}, \quad (3.3)$$

де E_{on} – енергія втрат під час ввімкнення транзистора, Дж;

E_{off} – енергія втрат під час вимкнення транзистора, Дж;

f_{sw} – частота комутації, Гц.

Сумарні втрати потужності трифазного інвертора:

$$P_{інв} = 6 \cdot P_{тр}, \quad (3.4)$$

де $P_{інв}$ – сумарні втрати потужності інвертора, Вт;

6 – кількість силових транзисторів у трифазному мостовому інверторі.

Коефіцієнт корисної дії інвертора визначається за формулою:

$$\eta = P_{вих} / (P_{вих} + P_{інв}) \cdot 100 \%, \quad (3.5)$$

де η – коефіцієнт корисної дії інвертора, %;

$P_{вих}$ – вихідна потужність інвертора, Вт;

$P_{інв}$ – сумарні втрати потужності інвертора, Вт.

Для проведення розрахунку приймаються параметри сучасного тягового інвертора, побудованого на базі карбід-кремнієвих MOSFET-транзисторів. Вихідна потужність інвертора становить 100 кВт, напруга шини постійного струму – 400 В, діюче значення струму через транзистор – 150 А. Опір відкритого каналу силового транзистора приймається рівним 15 мОм. Частота комутації

становить 20 кГц, що відповідає типовим режимам роботи сучасних тягових інверторів.

Для розрахунку приймаємо:

$$R_{DS(on)} = 0,015 \text{ Ом};$$

$$E_{on} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ Дж};$$

$$E_{off} = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ Дж};$$

$$f_{sw} = 20000 \text{ Гц};$$

$$I_{rms} = 150 \text{ А}.$$

Втрати провідності одного транзистора:

$$P_{пров} = 150^2 \cdot 0,015 = 337,5 \text{ Вт.} \quad (3.6)$$

Втрати на перемикання:

$$P_{комут} = (1,2 \cdot 10^{-3} + 0,8 \cdot 10^{-3}) \cdot 20000 = 40 \text{ Вт.} \quad (3.7)$$

Отриманий результат свідчить про те, що комутаційні втрати SiC MOSFET є відносно невеликими навіть за високої частоти перемикання.

Загальні втрати одного транзистора:

$$P_{тр} = 337,5 + 40 = 377,5 \text{ Вт.} \quad (3.8)$$

Таким чином, основна частина втрат пов'язана з протіканням струму через відкритий канал транзистора.

Визначимо втрати на перемикання. Для сучасних SiC MOSFET енергія ввімкнення становить приблизно 1,2 мДж, а енергія вимкнення – 0,8 мДж.

Сумарні втрати трифазного інвертора:

$$P_{інв} = 6 \cdot 377,5 = 2265 \text{ Вт} = 2,265 \text{ кВт.} \quad (3.9)$$

Коефіцієнт корисної дії інвертора:

$$\eta = 100000 / (100000 + 2265) \cdot 100 = 97,78 \%. \quad (3.10)$$

Отримане значення ККД підтверджує високу ефективність використання SiC MOSFET у тягових перетворювачах електромобілів.

Для більш повної оцінки переваг карбід-кремнієвої технології виконаємо порівняння з інвертором аналогічної потужності, побудованим на основі кремнієвих IGBT-транзисторів.

Для порівняння приймаємо параметри інвертора на базі IGBT:

$$P_{\text{пров.IGBT}} = 450 \text{ Вт};$$

$$P_{\text{комут.IGBT}} = 120 \text{ Вт}.$$

Тоді втрати одного IGBT:

$$P_{\text{IGBT}} = P_{\text{пров.IGBT}} + P_{\text{комут.IGBT}} = 570 \text{ Вт}. \quad (3.11)$$

Сумарні втрати інвертора:

$$P_{\text{інв.IGBT}} = 6 \cdot 570 = 3420 \text{ Вт}. \quad (3.12)$$

Коефіцієнт корисної дії інвертора на базі IGBT:

$$\eta_{\text{IGBT}} = 100000 / (100000 + 3420) \cdot 100 = 96,69 \%. \quad (3.13)$$

Абсолютне зменшення втрат потужності:

$$\Delta P = P_{\text{інв.IGBT}} - P_{\text{інв.SiC}}, \quad (3.14)$$

$$\Delta P = 3420 - 2265 = 1155 \text{ Вт.} \quad (3.15)$$

Відносне зменшення втрат:

$$\Delta P\% = (P_{\text{інв.IGBT}} - P_{\text{інв.SiC}}) / P_{\text{інв.IGBT}} \cdot 100 \%, \quad (3.16)$$

$$\Delta P\% = (3420 - 2265) / 3420 \cdot 100 = 33,8 \%. \quad (3.17)$$

Порівняльні результати наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Порівняння характеристик тягових інверторів

Параметр	SiC MOSFET	IGBT
Втрати провідності одного ключа, Вт	337,5	450
Комутаційні втрати одного ключа, Вт	40	120
Загальні втрати одного ключа, Вт	377,5	570
Кількість силових ключів	6	6
Сумарні втрати інвертора, кВт	2,265	3,420
Коефіцієнт корисної дії інвертора, %	97,78	96,69
Абсолютне зменшення втрат, кВт	1,155	—
Відносне зменшення втрат, %	33,8	—
Максимальна робоча частота комутації, кГц	50–100	10–20
Максимальна температура переходу, °C	200–250	150–175
Вимоги до системи охолодження	Знижені	Підвищені
Щільність потужності інвертора	Висока	Середня

Дані таблиці 3.1 свідчать, що використання SiC MOSFET дозволяє суттєво зменшити як втрати провідності, так і комутаційні втрати в силових ключах тягового інвертора. У результаті сумарні втрати потужності інвертора

знижуються з 3,42 кВт до 2,265 кВт, а коефіцієнт корисної дії зростає з 96,69 % до 97,78 %. Крім того, SiC MOSFET забезпечують можливість роботи на значно вищих частотах комутації та при підвищених температурах, що дозволяє зменшити масогабаритні показники силового перетворювача та підвищити його питому потужність. Отримані результати підтверджують доцільність використання карбід-кремнієвих транзисторів у сучасних тягових інверторах електрифікованого транспорту.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Завдання в галузі охорони праці

Охорона праці є важливою складовою забезпечення безпечної професійної діяльності та спрямована на збереження життя, здоров'я і працездатності працівників у процесі виконання виробничих обов'язків. В умовах розвитку сучасного електрифікованого транспорту та широкого впровадження силової електроніки особливого значення набувають питання безпечної розробки, дослідження та експлуатації електротехнічного обладнання, побудованого на основі напівпровідникових приладів нового покоління, зокрема MOSFET-транзисторів на основі карбіду кремнію (SiC MOSFET).

Правові та організаційні засади охорони праці в Україні визначаються Конституцією України, Законом України «Про охорону праці», Кодексом законів про працю України та іншими нормативно-правовими актами. Відповідно до Закону України «Про охорону праці» охорона праці являє собою систему правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та лікувально-профілактичних заходів і засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я та працездатності людини у процесі трудової діяльності.[16-18]

Основним принципом державної політики у сфері охорони праці є пріоритет життя та здоров'я працівника над результатами виробничої діяльності. Роботодавець зобов'язаний створювати безпечні умови праці, забезпечувати функціонування системи управління охороною праці, організовувати навчання та перевірку знань працівників з питань безпеки праці, а також забезпечувати працівників необхідними засобами колективного та індивідуального захисту.

Тематика даної бакалаврської кваліфікаційної роботи пов'язана із застосуванням MOSFET-транзисторів на основі карбіду кремнію в електрифікованому транспорті. Такі напівпровідникові прилади широко використовуються у складі тягових інверторів, DC/DC-перетворювачів, бортових зарядних пристроїв та систем швидкісного заряджання електромобілів. У процесі

дослідження, проектування та експлуатації зазначеного обладнання персонал може зазнавати впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів.

До основних небезпечних факторів належать:

- ураження електричним струмом при роботі з високовольтними колами постійного та змінного струму;
- виникнення коротких замикань та аварійних режимів роботи;
- вплив нагрітих поверхонь силових напівпровідникових модулів та радіаторів охолодження;
- небезпека виникнення пожежі внаслідок перегріву силових елементів або пошкодження ізоляції;
- механічні травми під час монтажу та налагодження електротехнічного обладнання.

До шкідливих виробничих факторів належать:

- електромагнітні поля, що виникають під час роботи високочастотних силових перетворювачів;
- підвищена температура повітря робочої зони;
- недостатня або надмірна освітленість робочого місця;
- психофізіологічні навантаження, пов'язані з виконанням проєктних та дослідницьких робіт.

Особливістю сучасних систем електрифікованого транспорту є використання високовольтних акумуляторних батарей з робочою напругою від 400 до 800 В, а в окремих випадках понад 1000 В. Робота з такими рівнями напруги потребує суворого дотримання вимог електробезпеки, застосування засобів захисту та використання відповідного вимірювального обладнання.

При проведенні досліджень та випробувань силових перетворювачів на базі SiC MOSFET необхідно керуватися вимогами чинних нормативних документів України, серед яких:

- Закон України «Про охорону праці»;
- Кодекс законів про працю України;

- НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів»;
- НПАОП 40.1-1.32-01 «Правила улаштування електроустановок (ПУЕ)»;
- ДСТУ EN 50110-1:2014 «Експлуатація електроустановок»;
- ДСН 3.3.6.042-99 «Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень»;
- ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення»;
- ДСТУ 12.0.003:2015 «Небезпечні та шкідливі виробничі фактори. Класифікація»;
- Кодекс цивільного захисту України;
- НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні».

Під час роботи з електронним обладнанням необхідно забезпечити справність електроустановок, наявність захисного заземлення, використання автоматичних вимикачів, пристроїв захисного відключення та інших технічних засобів захисту від аварійних режимів роботи. Особлива увага повинна приділятися контролю температурного режиму силових модулів та ефективності роботи систем охолодження, оскільки перегрів напівпровідникових приладів може призвести до виходу обладнання з ладу та виникнення пожежонебезпечних ситуацій.

Основним завданням даного розділу є аналіз умов праці під час виконання досліджень, пов'язаних із застосуванням SiC MOSFET у системах електрифікованого транспорту, а також розробка комплексу організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпечних умов праці, зниження рівня професійних ризиків та попередження нещасних випадків.

4.2 Аналіз умов праці при розробці та дослідженні силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів. Виявлення небезпечних і шкідливих виробничих факторів

Дослідження та проектування силових перетворювачів на базі MOSFET-транзисторів з карбіду кремнію виконуються в умовах лабораторії кафедри

альтернативної енергетики та електротехніки. Робоче місце дослідника обладнане персональним комп'ютером, вимірювальними приладами, джерелами живлення, макетами силових перетворювачів та випробувальним обладнанням.[19]

Під час виконання досліджень основними роботами є моделювання режимів роботи силових перетворювачів, аналіз характеристик SiC MOSFET, налагодження експериментальних установок та проведення електротехнічних вимірювань. При виконанні зазначених робіт на працівника можуть впливати небезпечні та шкідливі виробничі фактори відповідно до ДСТУ 12.0.003:2015.

До небезпечних виробничих факторів належать:

- можливість ураження електричним струмом під час роботи з силовими колами постійного струму напругою до 800 В;
- небезпека короткого замикання та виникнення електричної дуги при помилках монтажу;
- контакт із нагрітими поверхнями силових модулів, радіаторів та резистивних елементів;
- можливість механічного травмування під час складання та налагодження експериментальних стендів.

Основним небезпечним фактором при роботі із силовими перетворювачами є електричний струм. Навіть короточасний дотик до струмоведучих частин високовольтних кіл може призвести до тяжких наслідків для здоров'я працівника.

До шкідливих виробничих факторів належать:

- електромагнітні поля, що виникають під час роботи високочастотних інверторів та DC/DC-перетворювачів;
- підвищена температура повітря поблизу працюючих силових модулів;
- напруження зору під час роботи за комп'ютером та аналізу електронних схем;
- статичне навантаження на опорно-руховий апарат при тривалому перебуванні в сидячому положенні.

Оскільки основна частина роботи виконується за персональним комп'ютером, дослідження належать до категорії легких робіт Іа згідно з ДСН

3.3.6.042-99. Для таких умов праці необхідно забезпечити нормативні параметри мікроклімату, освітлення та організації робочого місця.

Результати аналізу небезпечних та шкідливих виробничих факторів наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Небезпечні та шкідливі виробничі фактори при дослідженні SiC MOSFET

Фактор	Джерело виникнення	Заходи захисту
Електричний струм	Високовольтні кола інверторів та DC/DC-перетворювачів	Ізоляція, захисне заземлення, автоматичний захист
Коротке замикання	Пошкодження ізоляції, помилки монтажу	Автоматичні вимикачі, запобіжники
Нагріті поверхні	SiC MOSFET, радіатори охолодження	Контроль температури, захисні екрани
Електромагнітні поля	Високочастотні силові перетворювачі	Екранування обладнання
Недостатнє освітлення	Робоче місце дослідника	Нормоване штучне освітлення
Підвищена температура	Робота силових модулів та ПК	Вентиляція, кондиціонування
Робота за ПК	Моделювання та аналіз даних	Регламентовані перерви, ергономічне робоче місце
Пожежна безпека	Перегрів обладнання, короткі замикання	Вогнегасники, засоби пожежогасіння

Аналіз даних таблиці 4.1 показує, що основними небезпечними факторами під час дослідження та застосування SiC MOSFET у системах електрифікованого транспорту є електричний струм, можливість виникнення коротких замикань та нагрівання силових елементів. До найбільш значущих шкідливих факторів належать електромагнітні поля, підвищена температура повітря робочої зони та тривала робота за персональним комп'ютером. Для забезпечення безпечних умов праці необхідно передбачити комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на мінімізацію впливу зазначених факторів на працівника.

4.2.1. Фізичні небезпечні та шкідливі виробничі фактори

До фізичних факторів, характерних для дослідження та застосування MOSFET-транзисторів на основі карбіду кремнію в системах електрифікованого транспорту, належать [16]:

- підвищена напруга в електричних колах тягових інверторів, DC/DC-перетворювачів та бортових зарядних пристроїв. Під час налагодження та випробування силових модулів можливий контакт з колами постійного струму напругою 400–800 В, що створює небезпеку ураження електричним струмом;
- підвищена температура поверхонь SiC MOSFET-модулів, радіаторів охолодження, дроселів та інших силових компонентів. У процесі роботи температура окремих елементів може перевищувати 80 °С, що створює ризик отримання термічних опіків;
- електромагнітні поля, які виникають під час роботи високочастотних силових перетворювачів. Джерелами електромагнітного випромінювання є тягові інвертори, DC/DC-перетворювачі та імпульсні джерела живлення, що працюють на частотах від десятків до сотень кілогерц;
- недостатня освітленість робочого місця під час монтажу, налагодження та проведення вимірювань електронних схем, що може призводити до підвищеної втомлюваності та зниження точності виконання робіт;
- підвищений рівень шуму, створюваний вентиляторами систем охолодження, випробувальними стендами та допоміжним електротехнічним обладнанням;
- відхилення параметрів мікроклімату від нормативних значень унаслідок тепловиділення силових модулів та комп'ютерної техніки, що може негативно впливати на самопочуття та працездатність працівників електронного обладнання або недостатньої ефективності систем вентиляції.

4.2.2 Психофізіологічні небезпечні та шкідливі виробничі фактори

Дослідження та аналіз роботи силових перетворювачів на основі SiC MOSFET-транзисторів вимагають значної розумової діяльності, уважності та відповідальності під час виконання розрахунків, моделювання й обробки результатів експериментів. Більшість робіт виконується із застосуванням персонального комп'ютера та спеціалізованого програмного забезпечення для аналізу режимів роботи електронних систем електрифікованого транспорту.

До основних психофізіологічних факторів належать:

- значне інтелектуальне навантаження під час дослідження характеристик SiC MOSFET, аналізу електричних схем тягових інверторів та DC/DC-перетворювачів, а також виконання інженерних розрахунків;
- тривала робота за комп'ютером під час моделювання електронних систем, що може викликати втому органів зору та зниження працездатності;
- нервово-емоційне напруження, пов'язане з необхідністю аналізу великого обсягу технічної інформації та прийняття інженерних рішень;
- статичне навантаження на опорно-руховий апарат унаслідок тривалого перебування в сидячому положенні під час виконання розрахунків і підготовки технічної документації;
- необхідність одночасного контролю значної кількості параметрів силових електронних систем під час проведення досліджень та обробки результатів вимірювань.

Проведений аналіз умов праці показав, що найбільшу небезпеку під час дослідження та застосування SiC MOSFET у системах електрифікованого транспорту становлять можливість ураження електричним струмом, вплив нагрітих поверхонь силових модулів, електромагнітних полів та несприятливих факторів виробничого середовища. У зв'язку з цим подальші заходи з охорони праці повинні бути спрямовані на забезпечення електробезпеки, дотримання нормативних параметрів мікроклімату та освітлення, організацію раціонального режиму праці й відпочинку, а також створення безпечних та комфортних умов

праці під час виконання досліджень у галузі сучасної силової електроніки.

4.3 Розробка організаційних та технічних заходів з охорони праці під час дослідження та застосування SiC MOSFET у системах електрифікованого транспорту

На підставі проведеного аналізу умов праці необхідно передбачити комплекс заходів, спрямованих на зниження впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів під час дослідження, моделювання та випробування силових електронних систем на основі SiC MOSFET-транзисторів.

Особливістю досліджуваного обладнання є використання високовольтних кіл, силових напівпровідникових модулів та високочастотних перетворювачів, робота яких супроводжується підвищеними електричними, тепловими та електромагнітними навантаженнями. Тому безпечне виконання робіт забезпечується поєднанням організаційних та технічних заходів.

До організаційних заходів належать проведення інструктажів з охорони праці, навчання правилам електробезпеки, перевірка знань персоналу та контроль дотримання вимог нормативної документації. До виконання робіт допускаються лише особи, які пройшли відповідну підготовку та ознайомлені з правилами експлуатації електротехнічного обладнання.

Технічні заходи передбачають застосування захисного заземлення, автоматичних вимикачів, запобіжників, пристроїв захисного відключення та контроль стану ізоляції силових кіл. Під час проведення експериментів необхідно використовувати справні вимірювальні прилади та ізольований інструмент.

Особливу увагу слід приділяти контролю температурного режиму SiC MOSFET-модулів та ефективності системи охолодження, оскільки перегрів силових елементів може призвести до виходу обладнання з ладу. Для забезпечення комфортних умов праці необхідно також підтримувати нормативні параметри мікроклімату, освітлення та організовувати раціональний режим праці й відпочинку.

Результати аналізу основних небезпечних і шкідливих виробничих факторів та відповідних заходів захисту наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Заходи щодо зниження впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Небезпечний або шкідливий фактор	Заходи захисту
Ураження електричним струмом	Захисне заземлення, ізоляція струмоведучих частин, автоматичний захист
Короткі замикання та перевантаження	Автоматичні вимикачі, запобіжники, контроль справності обладнання
Нагрівання SiC MOSFET-модулів	Система охолодження, контроль температури
Електромагнітні поля	Екранування обладнання, дотримання безпечних відстаней
Недостатня освітленість	Нормоване штучне освітлення робочого місця
Підвищена температура повітря	Вентиляція та кондиціонування приміщення
Тривала робота за ПК	Регламентовані перерви, ергономічне робоче місце
Пожежна безпека	Первинні засоби пожежогасіння, контроль стану електрообладнання

4.3.1 Забезпечення нормативних параметрів мікроклімату під час дослідження та застосування SiC MOSFET у системах електрифікованого транспорту

Дослідження характеристик SiC MOSFET-транзисторів, моделювання роботи тягових інверторів та DC/DC-перетворювачів, а також обробка результатів

експериментів виконуються в умовах навчально-дослідної лабораторії. Основна частина робочого часу пов'язана з роботою за персональним комп'ютером та проведенням електротехнічних досліджень.

Відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 зазначені роботи належать до категорії легких робіт Іа, які виконуються переважно в сидячому положенні та характеризуються енерговитратами до 120 ккал/год (139 Вт).

Важливою умовою забезпечення безпечної та продуктивної праці є підтримання нормативних параметрів мікроклімату. До основних показників мікроклімату належать температура повітря, відносна вологість та швидкість руху повітря. Відхилення цих параметрів від нормативних значень може призводити до зниження працездатності, підвищення втомлюваності та погіршення концентрації уваги.

Особливістю лабораторій силової електроніки є наявність додаткових джерел тепловиділення, до яких належать персональні комп'ютери, джерела живлення, вимірювальне обладнання та експериментальні стенди з SiC MOSFET-модулями. Під час проведення випробувань це обладнання виділяє тепло, що може впливати на температурний режим приміщення.

Для забезпечення комфортних та безпечних умов праці параметри мікроклімату повинні відповідати вимогам ДСН 3.3.6.042-99. Нормативні значення для категорії робіт Іа наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 Значення оптимальних і допустимих параметрів мікроклімата для приміщення конструкторського бюро НВДЕ (фізичні роботи категорії 1-а)

Параметр	Період року			
	Холодний		Теплий	
	Оптимальний	Допустимий	Оптимальний	Допустимий
Температура, °C	23 – 25	22 – 26	24 – 26	23 – 29
Відносна вологість, %	45 – 65	80	45 – 65	57 (при 29 °C)
Швидкість руху повітря, м/с	Не більше 0.15	Не більше 0.15	Не більше 0.15	0.1 – 0.25

4.3.2 Забезпечення нормативного санітарно-гігієнічного складу повітря робочої зони під час дослідження та налагодження SiC MOSFET-модулів. Проектування місцевої витяжної вентиляції

Під час дослідження, складання та налагодження силових перетворювачів на базі SiC MOSFET виконуються монтажні та паяльні роботи, що супроводжуються виділенням продуктів термічного розкладання флюсів, каніфолі та припоїв. Дані речовини можуть негативно впливати на органи дихання та слизові оболонки працівника, тому необхідно забезпечити нормативний санітарно-гігієнічний стан повітря робочої зони.

Відповідно до вимог ДСН 3.3.6.042-99 концентрація шкідливих речовин у повітрі робочої зони не повинна перевищувати встановлених гранично допустимих значень. Для цього на робочому місці передбачається застосування місцевої витяжної вентиляції.

Найбільш ефективним рішенням є використання витяжного пристрою локальної дії у вигляді витяжного рукава або витяжного ковпака, розташованого безпосередньо над місцем пайки. Відстань від повітрозабірника до робочої зони приймається в межах 0,2–0,3 м, що забезпечує своєчасне видалення шкідливих виділень до їх поширення в приміщенні.

До складу системи місцевої витяжної вентиляції входять витяжний пристрій, повітропровід, вентилятор та фільтр для очищення повітря. Для уловлювання дрібнодисперсних частинок і парів флюсу доцільно використовувати комбіновані фільтри механічного та сорбційного очищення.

Для підвищення ефективності повітрообміну місцева витяжна вентиляція повинна працювати спільно із загальнообмінною припливно-витяжною вентиляцією лабораторії. Це дозволяє підтримувати нормативний склад повітря, покращити умови праці та знизити ризик виникнення професійних захворювань під час виконання робіт із силовою електронікою.

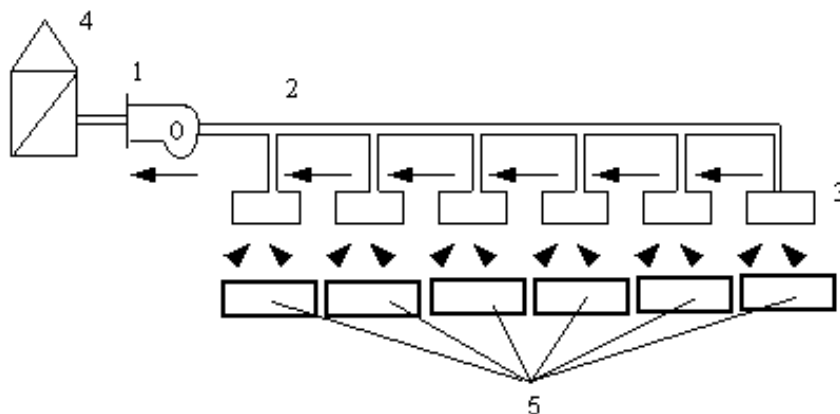


Рисунок 4.1 - Схема місцевої витяжної вентиляції: 1 – вентилятор; 2 – повітряно-провід; 3 – місцевий відсос; 4 – випускна труба; 5 – робочі місця

Для оцінки ефективності місцевої витяжної вентиляції необхідно визначити витрату повітря, яка забезпечує своєчасне видалення шкідливих виділень із зони виконання паяльних робіт. Розрахункова витрата повітря, що видаляється місцевим відсмоктувачем протягом години, визначається за формулою:

$$L = 3600 \cdot v \cdot F_{\text{п}}, \quad (4.1)$$

де v - середня швидкість усмоктування повітря у відкритий проріз шафи (парасоля), м/с;

F_{Π} - площа відкритого прорізу, м².

Для забезпечення нормативного складу повітря робочої зони під час складання та налагодження силових електронних модулів на базі SiC MOSFET передбачається використання місцевої витяжної вентиляції. У процесі виконання паяльних робіт у повітря виділяються пари флюсів та дрібнодисперсні аерозолі, які можуть негативно впливати на органи дихання працівника.

Для їх ефективного видалення робоче місце обладнується локальним витяжним пристроєм. Необхідна продуктивність вентиляції визначається залежно від інтенсивності виділення шкідливих речовин та вимог санітарно-гігієнічних норм щодо якості повітря робочої зони.

$$K_c = p \cdot r \cdot R \cdot N, \quad (4.2)$$

де p - відносна кількість вмісту свинцю в припої;

r - відносна кількість свинцю, що випаровується в повітря робочої зони при одній пайці;

R - витрата припою на одну пайку;

N - кількість пайок у годину.

Під час складання та налагодження експериментальних зразків силових перетворювачів на базі SiC MOSFET виконуються паяльні роботи із застосуванням припою ПОС-50. Масова частка свинцю в даному припої становить 50 %, тобто ($p = 0,5$).

У процесі пайки частина свинцю потрапляє в повітря робочої зони у вигляді аерозолів. Залежно від температури паяння та умов виконання робіт кількість

свинцю, що виділяється в повітря, становить приблизно 2–5 % від його загальної маси, тобто ($r = 0,02 \div 0,05$).

Середня витрата припою на одне паяне з'єднання становить близько 0,1 г, а кількість паяних з'єднань під час монтажу електронних модулів може досягати 50–60 за годину. За таких умов у повітря робочої зони надходить певна кількість шкідливих речовин, яку необхідно враховувати під час розрахунку місцевої витяжної вентиляції.

Застосування локального витяжного пристрою дозволяє видаляти шкідливі виділення безпосередньо в місці їх утворення та підтримувати концентрацію аерозолів свинцю в межах допустимих санітарно-гігієнічних норм.

Підставивши вихідні дані у формулу розрахунку, отримаємо:

$$K_c = 0,5 \cdot 0,03 \cdot 0,1 \cdot 50 = 0,075 \text{ г.}$$

Визначаємо кількість повітря, яке необхідно видалити з робочої зони:

$$L = K_c / \text{ГДК}_c, \quad (4.3)$$

де $\text{ГДК}_c = \text{ГДК}$ пари свинцю.

ГДК_c становить $0,01 \text{ мг/м}^3$. Розрахуємо L :

$$L = 0,075 / (0,01 \cdot 10)^{-3} = 7541 \text{ м}^3.$$

Визначаємо площу перетину прийомного отвору:

$$F_n = L / (3600 \cdot v). \quad (4.4)$$

Для забезпечення ефективного видалення шкідливих виділень приймаємо швидкість всмоктування повітря витяжним пристроєм рівною $1,2 \text{ м/с}$. На основі

отриманої витрати повітря визначимо необхідну площу поперечного перерізу витяжного отвору.:

$$F_{\pi} = 7541 / (3600 \cdot 1,2) = 1,74 \text{ м}^2.$$

Отже, для ефективного видалення шкідливих виділень під час виконання паяльних робіт та підтримання нормативного санітарно-гігієнічного стану повітря робочої зони площа перерізу витяжного отвору місцевого витяжного пристрою повинна становити 1,74 м².

4.4 Забезпечення електробезпеки під час дослідження та випробування силових перетворювачів на базі SiC MOSFET

Важливою складовою охорони праці під час дослідження та випробування силових електронних систем на базі SiC MOSFET є забезпечення належного рівня електробезпеки. Це пов'язано з використанням високовольтних джерел живлення, тягових інверторів, DC/DC-перетворювачів та випробувального обладнання, які працюють при підвищених рівнях напруги та струму.

Дослідження виконуються в умовах навчально-дослідної лабораторії із застосуванням персональних комп'ютерів, лабораторних джерел живлення, осцилографів та експериментальних зразків силових перетворювачів. Напруга в колах досліджуваних пристроїв може досягати 400–800 В постійного струму, що характерно для сучасних систем електрифікованого транспорту.

Відповідно до вимог ПУЕ та НПАОП 40.1-1.21-98 приміщення лабораторії належить до приміщень з підвищеною небезпекою ураження електричним струмом. Основними причинами є наявність електрообладнання, металевих корпусів приладів та проведення вимірювань на діючих електричних установках.

До основних небезпечних факторів електричного походження належать:

- дотик до струмоведучих частин електрообладнання;

- поява напруги на металевих корпусах при пошкодженні ізоляції;
- виникнення струмів короткого замикання та електричної дуги;
- наявність залишкового заряду в конденсаторах силових перетворювачів після вимкнення живлення.

Для забезпечення електробезпеки необхідно передбачити захисне заземлення обладнання, автоматичне відключення живлення в аварійних режимах, ізоляцію струмоведучих частин, застосування попереджувальних знаків безпеки та проведення регулярного контролю технічного стану електрообладнання.

Зазначені заходи дозволяють знизити ризик ураження електричним струмом та забезпечити безпечні умови праці під час дослідження і застосування SiC MOSFET у системах електрифікованого транспорту.

4.4.1 Організаційно-технічні заходи забезпечення електробезпеки під час дослідження SiC MOSFET у системах електрифікованого транспорту

Під час дослідження та випробування силових електронних систем на базі SiC MOSFET необхідно забезпечити комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на запобігання ураженню електричним струмом та виникненню аварійних режимів роботи.

Організація безпечного виконання робіт здійснюється відповідно до вимог ПУЕ, НПАОП 40.1-1.21-98 та інструкцій з охорони праці. До роботи допускаються особи, які пройшли вступний і первинний інструктаж з охорони праці та ознайомлені з правилами експлуатації електротехнічного обладнання.[20]

Основними технічними заходами електрозахисту є:

- контроль технічного стану електрообладнання та перевірка опору ізоляції;
- застосування захисного заземлення металевих корпусів обладнання;
- використання автоматичних вимикачів для захисту від коротких замикань і перевантажень;

- застосування пристроїв захисного відключення;
- використання обладнання з подвійною ізоляцією;
- огороження струмоведучих частин та встановлення попереджувальних знаків безпеки.

Під час експериментальних досліджень використовуються джерела живлення, вимірювальні прилади та дослідні зразки тягових інверторів і DC/DC-перетворювачів з робочою напругою до 800 В. Тому особлива увага приділяється контролю стану ізоляції та справності засобів захисту.

Додаткову небезпеку становлять конденсатори DC-шини, які можуть зберігати залишковий заряд після відключення живлення. Перед початком робіт необхідно виконувати їх примусове розрядження та перевіряти відсутність напруги.

Робочі місця повинні бути оснащені діелектричними килимками, ізольованим інструментом, попереджувальними плакатами та засобами пожежогасіння для електроустановок.

Застосування наведених заходів дозволяє забезпечити безпечне проведення досліджень SiC MOSFET та знизити ризик виникнення електротравм під час роботи з силовими електронними системами електрифікованого транспорту.

4.6 Висновки до розділу «Охорона праці»

У даному розділі розглянуто питання забезпечення безпечних умов праці під час дослідження, налагодження та випробування силових електронних систем на базі MOSFET-транзисторів з карбіду кремнію, що застосовуються в електрифікованому транспорті.

Проведений аналіз умов праці дозволив визначити основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, серед яких найбільшу небезпеку становлять підвищена електрична напруга, нагріті поверхні силових модулів, електромагнітні поля, а також психофізіологічні навантаження під час виконання розрахунків і комп'ютерного моделювання.

Для зниження впливу зазначених факторів запропоновано комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення електробезпеки, підтримання нормативних параметрів мікроклімату та санітарно-гігієнічного стану повітря робочої зони.

У роботі обґрунтовано застосування місцевої витяжної вентиляції для видалення шкідливих виділень, що утворюються під час паяльних робіт, а також виконано розрахунок основних параметрів вентиляційної системи. Крім того, розглянуто заходи електрозахисту, які включають використання захисного заземлення, автоматичного відключення живлення, контролю стану ізоляції та застосування засобів індивідуального захисту.

Таким чином, реалізація запропонованих заходів дозволяє забезпечити нормативні умови праці, підвищити рівень електробезпеки та знизити вплив небезпечних виробничих факторів під час дослідження і застосування SiC MOSFET у системах електрифікованого транспорту.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі виконано аналіз особливостей застосування MOSFET-транзисторів на основі карбіду кремнію в системах електрифікованого транспорту та досліджено їх вплив на ефективність сучасних силових електронних пристроїв.

У ході роботи розглянуто фізичні властивості карбіду кремнію як напівпровідникового матеріалу та визначено основні переваги SiC MOSFET порівняно з традиційними кремнієвими IGBT і MOSFET-транзисторами. Встановлено, що використання карбіду кремнію забезпечує вищу пробивну напругу, менші втрати провідності та перемикання, підвищену теплопровідність і можливість роботи при високих температурах та частотах комутації.

Проаналізовано конструкцію та принцип роботи SiC MOSFET, а також особливості їх використання у тягових інверторах, DC/DC-перетворювачах і бортових зарядних пристроях електромобілів. Показано, що застосування карбід-кремнієвих транзисторів дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії силових перетворювачів, зменшити їх масогабаритні показники та покращити енергетичні характеристики транспортних засобів.

У розрахунковій частині виконано оцінку втрат потужності та коефіцієнта корисної дії тягового інвертора на базі SiC MOSFET. Результати розрахунків показали, що сумарні втрати потужності інвертора становлять 2,265 кВт, а коефіцієнт корисної дії досягає 97,78 %. Порівняння з аналогічним інвертором на базі IGBT продемонструвало зниження втрат потужності приблизно на 33,8 %, що підтверджує високу ефективність застосування карбід-кремнієвих технологій.

Досліджено перспективи використання SiC MOSFET в електрифікованому транспорті. Встановлено, що подальший розвиток високовольтних платформ електромобілів, систем швидкісного заряджання та високоефективних тягових приводів безпосередньо пов'язаний із широким впровадженням карбід-кремнієвих напівпровідникових приладів.

Виконаний аналіз економічної ефективності показав, що незважаючи на вищу вартість SiC MOSFET порівняно з традиційними кремнієвими приладами, їх використання забезпечує зменшення витрат електроенергії, підвищення надійності силових систем, скорочення витрат на охолодження та збільшення запасу ходу електромобілів. У результаті додаткові витрати на впровадження SiC-технологій компенсуються за рахунок підвищення енергоефективності та зниження експлуатаційних витрат.

У розділі охорони праці проведено аналіз умов праці під час дослідження та випробування силових електронних систем на базі SiC MOSFET. Визначено основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, розроблено заходи щодо забезпечення нормативних параметрів мікроклімату, санітарно-гігієнічного стану повітря робочої зони та електробезпеки. Виконано розрахунок параметрів місцевої витяжної вентиляції та запропоновано комплекс організаційних і технічних заходів для підвищення безпеки праці.

Результати проведених досліджень підтверджують доцільність використання MOSFET-транзисторів на основі карбіду кремнію в системах електрифікованого транспорту та свідчать про значний потенціал їх подальшого впровадження у сучасних силових електронних пристроях електромобілів..

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Chemali E., Preindl M., Malysz P., Emadi A. Electrochemical and electrostatic energy storage and management systems for electric drive vehicles: State-of-the-art review and future trends // *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2016. Vol. 4, No. 3. P. 1117–1134.
2. Reimers J., Dorn-Gomba L., Mak C., Emadi A. Automotive traction inverters: Current status and future trends // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2019. Vol. 68, No. 4. P. 3337–3350.
3. Zhang L., Yuan X., Wu X., Shi C., Zhang J., Zhang Y. Performance evaluation of high-power SiC MOSFET modules in comparison to Si IGBT modules // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2019. Vol. 34, No. 2. P. 1181–1196.
4. Roccaforte F., Fiorenza P., Greco G. et al. Emerging trends in wide bandgap semiconductors (SiC and GaN) technology for power devices // *Microelectronic Engineering*. 2018. Vol. 187–188. P. 66–77.
5. Wang H., Jiang D. Design of high temperature gate driver for SiC MOSFET for EV motor drives // *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC Asia-Pacific)*. 2017.
6. Ding X., Du M., Duan C. et al. Analytical and experimental evaluation of SiC-inverter nonlinearities for traction drives used in electric vehicles // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2018. Vol. 67, No. 1. P. 146–159.
7. Nguyen H.V., Lee D.C., Blaabjerg F. A novel SiC-based multifunctional onboard battery charger for plug-in electric vehicles // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2021. Vol. 36, No. 5. P. 5635–5646.
8. Zhu J., Kim H., Chen H., Erickson R., Maksimovic D. High efficiency SiC traction inverter for electric vehicle applications // *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. 2018.
9. Li Y., Zhang Y., Yuan X. et al. 500 kW forced air-cooled silicon carbide (SiC) three-phase DC/AC converter with efficiency >98.5% // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2021. Vol. 57, No. 5. P. 5013–5027.

10. Allca-Pekarovic A., Kollmeyer P.J., Mahvelatishamsabadi P. et al. Comparison of IGBT and SiC inverter loss for 400 V and 800 V DC bus electric vehicle drivetrains // IEEE ECCE. 2020.
11. Su H., Zhang L., Meng D. et al. Modeling and evaluation of SiC inverters for EV applications // Energies. 2022. Vol. 15. No. 19. Article 7025.
12. Su M., Chen C., Sharma S., Kikuchi J. Performance and cost considerations for SiC-based HEV traction inverter systems // WiPDA. 2015.
13. Liu G., Li K., Wang Y. et al. Recent advances and trend of HEV/EV-oriented power semiconductors – An overview // IET Power Electronics. 2020. Vol. 13. No. 3. P. 394–404.
14. Morya A.K., Gardner M.C., Anvari B. et al. Wide bandgap devices in AC electric drives: Opportunities and challenges // IEEE Transactions on Transportation Electrification. 2019. Vol. 5. No. 1. P. 3–20.
15. Wang W., Song Q., Zhang S. et al. The loss analysis and efficiency optimization of power inverter based on SiC MOSFETs under the high-switching frequency // IEEE Transactions on Industry Applications. 2021. Vol. 57. No. 2. P. 1521–1534.
16. Конституція України.
17. Кодекс законів про працю України.
18. Закон України «Про охорону праці».
19. ДСТУ 12.0.003:2015. Небезпечні та шкідливі виробничі фактори. Класифікація.
20. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачі
21. Сєріков Я. О. Основи охорони праці : навч. посіб. Харків : ІОЦ ХНАМГ, 2007. 227 с.

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА імені О.М. Бекетова**

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної
та транспортної інфраструктури

Кафедра «Альтернативної електроенергетики та електротехніки»

**ІЛЮСТРАЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ ДО
БАКАЛАВРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

на тему:

**“Застосування MOSFET-транзисторів на основі карбіду кремнію в
електрифікованому транспорті”**

Виконав: студент курсу 3, групи НВДЕ 2023-1у; спеціальність 141 –
Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка; освітня програма –
Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії

Студент:



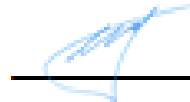
Іulia КУРІННИЙ

Керівник роботи:



Іван КОСТЕНКО

Завідувач кафедри:



Олексій ЄГОРОВ

ПЕРЕЛІК ГРАФІЧНОГО МАТЕРІАЛУ

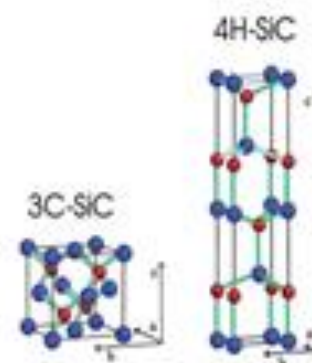
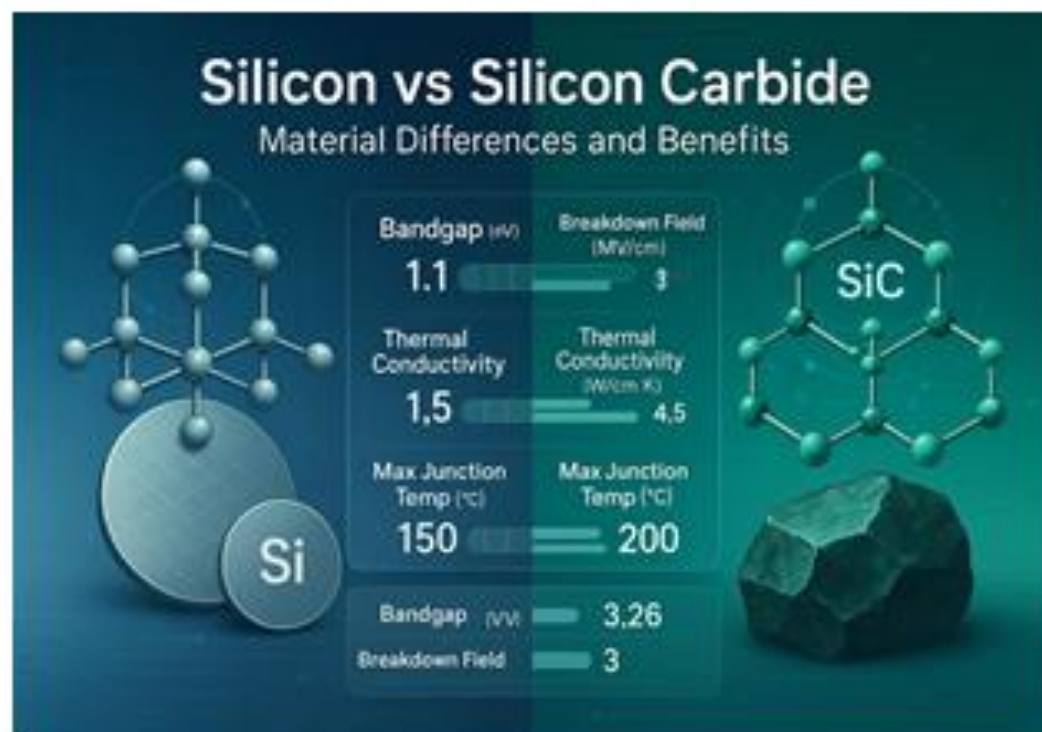
1. Титульний аркуш
2. Перелік графічного матеріалу.
3. Актуальність теми. Мета та завдання роботи
4. Порівняння властивостей кремнію (Si) та карбіду кремнію (SiC)
5. Конструкція та принцип роботи SiC MOSFET
6. Застосування SiC MOSFET у тяговому інверторі електромобіля
7. Результати розрахунку втрат потужності та ККД тягового інвертора на базі SiC MOSFET
8. Висновки

Актуальність теми: обумовлена необхідністю підвищення енергоефективності електрифікованого транспорту шляхом використання сучасних широкозонних напівпровідникових приладів на основі карбіду кремнію.

МЕТА: Дослідити особливості застосування SiC MOSFET у системах електрифікованого транспорту та оцінити їх вплив на енергетичні характеристики силових перетворювачів.

ЗАВДАННЯ:
проаналізувати властивості карбіду кремнію; розглянути конструкцію та принцип роботи SiC MOSFET; дослідити використання SiC MOSFET у тягових інверторах; виконати розрахунок втрат потужності та ККД; оцінити перспективи та економічну ефективність технології.

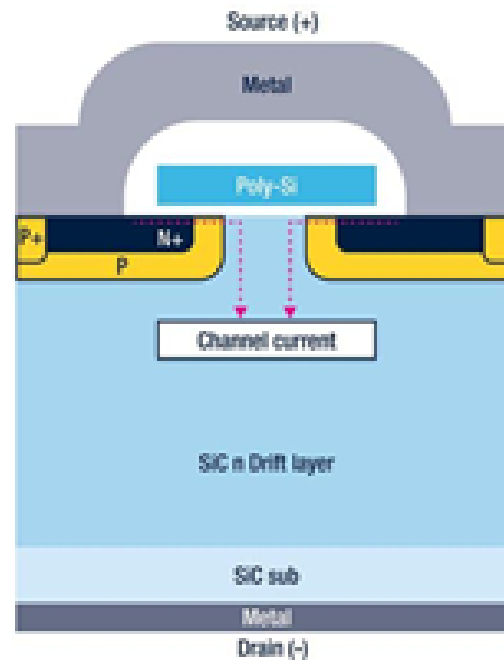
Порівняння властивостей кремнію (Si) та карбіду кремнію (SiC)



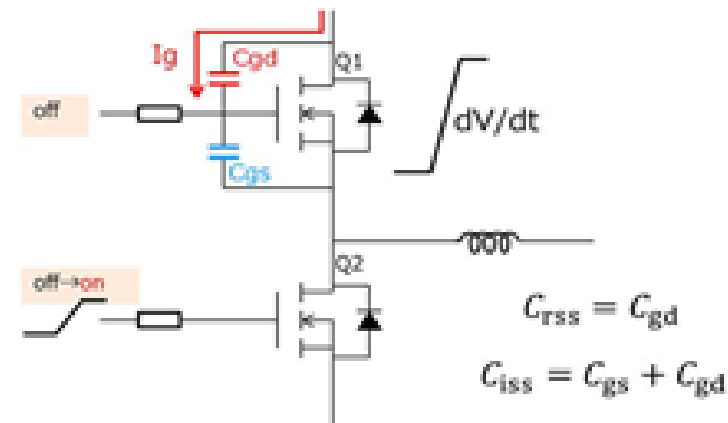
Кристалічна структура політипу 4H-SiC

Карбід кремнію належить до широкозонних напівпровідникових матеріалів третього покоління. Порівняно з традиційним кремнієм він характеризується більшою шириною забороненої зони, вищою теплопровідністю та більшою електричною міцністю.

Конструкція та принцип роботи SiC MOSFET



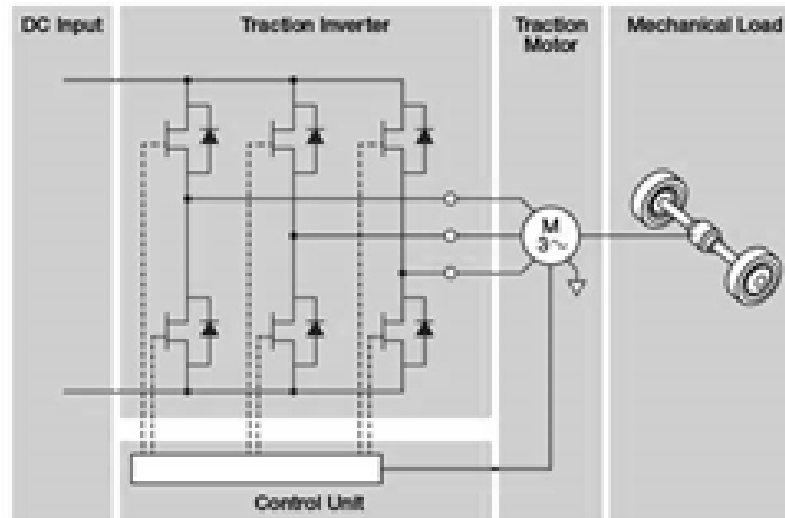
Структура SiC MOSFET



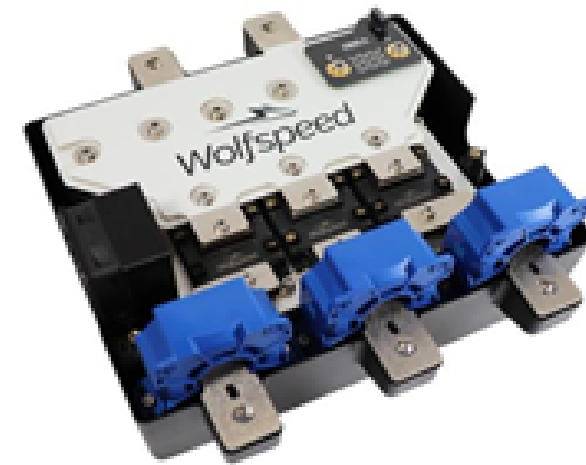
Еквівалентна схема

SiC MOSFET є польовим транзистором з ізольованим затвором, виготовленим на основі карбїду кремнію. Керування транзистором здійснюється напругою на затворі, що дозволяє швидко перемикаати силові кола та мінімізувати втрати енергії. Завдяки низькому опору відкритого каналу та високій швидкодії SiC MOSFET широко використовуються у сучасних тягових інверторах і DC/DC-перетворювачах електромобілів.

Застосування SiC MOSFET у тяговому інверторі



Структурна схема електроприводу електромобіля з тяговим інвертором



Трифазний тяговий інвертор на базі SiC MOSFET

Тяговий інвертор є одним із ключових елементів електромобіля та забезпечує перетворення енергії акумуляторної батареї у трифазну напругу для живлення електродвигуна. Використання SiC MOSFET дозволяє підвищити ККД інвертора до 98–99 %, зменшити тепловиділення та габарити системи охолодження. Крім того, висока швидкість комутації сприяє покращенню динамічних характеристик електропривода.

Результати розрахунку втрат потужності та ККД

Параметр	Кремій (Si)	Карбід кремнію (4H-SiC)
Ширини забороненої зони, E_g , eV	1,12	3,26
Критична напруженість електричного поля, MB/cm	0,3	2,8
Теплопровідність, $W/(cm \cdot K)$	1,5	4,9
Робоча температура переходу, $^{\circ}C$	до 150	понад 200
Швидкість насичення електронів, cm/s	1×10^7	2×10^7
Діелектрична проникність	11,8	9,7
Рухливість електронів, $cm^2/(V \cdot s)$	1400	950
Потомий опір дрейфової області при однаковій пробіговій напрузі	1	приблизно 1/300
Максимальна робоча напруга прилада, В	до 1200	понад 6500
Частота комутації	десятки кГц	сотні кГц – одиниці МГц
Втрати на перемикання	Високі	Низькі
Розміри системи охолодження	Значні	Зменшені
Щільність потужності перетворювачів	Середня	Висока

Параметр	SiC MOSFET	IGBT
Втрати провідності одного ключа, Вт	337,5	450
Комутаційні втрати одного ключа, Вт	40	120
Загальні втрати одного ключа, Вт	377,5	570
Кількість силових ключів	6	6
Сумарні втрати інвертора, кВт	2,265	3,420
Коефіцієнт корисної дії інвертора, %	97,78	96,69
Абсолютне зменшення втрат, кВт	1,155	–
Відносне зменшення втрат, %	33,8	–
Максимальна робоча частота комутації, кГц	50–100	10–20
Максимальна температура переходу, $^{\circ}C$	200–250	150–175
Вимоги до системи охолодження	Значні	Підвищені
Щільність потужності інвертора	Висока	Середня

У розрахунковій частині роботи виконано оцінку втрат потужності тягового інвертора на базі SiC MOSFET. Отримано сумарні втрати потужності 2,265 кВт при вихідній потужності 100 кВт. Розрахований коефіцієнт корисної дії інвертора становить 97,78 %. Порівняння з аналогічною системою на базі IGBT показало зниження втрат приблизно на 34 %, що підтверджує високу ефективність застосування SiC-технологій.

Висновки:

- Проаналізовано фізичні властивості карбіду кремнію та встановлено, що SiC має ширину забороненої зони 3,26 eV, що майже у 3 рази перевищує аналогічний показник кремнію (1,12 eV), а також характеризується підвищеною теплопровідністю та електричною міцністю.
- Розглянуто конструкцію та принцип роботи SiC MOSFET, визначено основні переваги цих приладів: висока швидкість комутації, низькі втрати перемикання та можливість роботи при температурах до 200–300 °C.
- Досліджено застосування SiC MOSFET у тягових інверторах, DC/DC-перетворювачах та бортових зарядних пристроях електромобілів. Показано, що використання SiC-технологій дозволяє підвищити ККД силових перетворювачів до 98–99 %.
- У розрахунковій частині визначено втрати потужності тягового інвертора на базі SiC MOSFET. При вихідній потужності 100 кВт сумарні втрати склали 2,265 кВт, а розрахований коефіцієнт корисної дії досяг 97,78 %.
- Встановлено, що використання SiC MOSFET дозволяє знизити втрати потужності приблизно на 33,8 % порівняно з аналогічним інвертором на базі IGBT-транзисторів.
- Виконано аналіз економічної ефективності впровадження SiC-технологій. Показано, що підвищення ККД, зменшення вимог до систем охолодження та зниження енергетичних втрат компенсують вищу початкову вартість карбід-кремнієвих компонентів.
- Розроблено заходи з охорони праці та виконано розрахунок місцевої витяжної вентиляції, що забезпечує нормативні умови праці під час дослідження та випробування силових електронних систем.
- Отримані результати підтверджують перспективність широкого впровадження SiC MOSFET у сучасних системах електрифікованого транспорту для підвищення енергоефективності та надійності силових перетворювачів.