

**Міністерство освіти і науки України**

**Криворізький національний університет**

**Електротехнічний факультет**

# **Пояснювальна записка**

**до кваліфікаційної роботи бакалавра  
за спеціальністю 141 - Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка**

## **ТЕМА РОБОТИ:**

**Вибір структури багаторівневого перетворювача напруги живлення для  
системи частотного регулювання асинхронним електроприводом**

**Виконав: студент групи ЕЕМ-21-1**

**Дмитро ГРИНЬКО**

**Керівник випускної роботи \_\_\_\_\_**

**к.т.н., доц. Ігор СІНЧУК**

**Нормо контролер \_\_\_\_\_**

**к.т.н., доц. Ігор СІНЧУК**

**Декан ЕТФ \_\_\_\_\_**

**к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ**

**Гарант освітньої програми \_\_\_\_\_**

**к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО**

**Кривий Рір 2025 р.**

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

---

ГРИНЬКО Дмитро Костянтинович

---

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Вибір структури багаторівневого перетворювача напруги  
живлення для системи частотного регулювання асинхронним  
електроприводом

1. Термін подання студентом роботи: 16 червня 2025 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є модернізація  
структури багаторівневого перетворювача напруги живлення для системи  
частотного регулювання асинхронним електроприводом.
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I.  
Перетворювачі частоти для асинхронного електроприводу; II. Структура  
багаторівневого перетворювача; III. Моделювання роботи багаторівневого  
перетворювача.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових  
креслень) I. Структура перетворювача; II. Силова частина перетворювача;  
III. Інвертори напруги; IV. Багаторівневі перетворювачі; V. Структура  
моделі багаторівневого перетворювача; VI. Графіки перехідних процесів у  
багаторівневому перетворювачі.

5. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Ім'я, прізвище консультанта | Дата, підпис   |                  |
|--------|-----------------------------|----------------|------------------|
|        |                             | Завдання видав | Завдання прийняв |
| I      | Ігор СІНЧУК                 |                |                  |
| II     | Ігор СІНЧУК                 |                |                  |
| III    | Ігор СІНЧУК                 |                |                  |

6. Календарний план

| № | Етапи роботи                                                | Термін   |
|---|-------------------------------------------------------------|----------|
| 1 | Загальні відомості про перетворювачі частоти                | 15.05.25 |
| 2 | Конструктивні особливості перетворювачів                    | 19.05.25 |
| 3 | Силова частина перетворювача                                | 24.05.25 |
| 4 | Розробка структури багаторівневого перетворювача            | 31.05.25 |
| 5 | Структура системи керування багаторівневим перетворювачем   | 04.05.25 |
| 6 | Структура моделі багаторівневого перетворювача              | 10.06.25 |
| 7 | Графіки перехідних процесів у багаторівневому перетворювачі | 14.06.25 |
|   |                                                             |          |
|   |                                                             |          |
|   |                                                             |          |
|   |                                                             |          |
|   |                                                             |          |
|   |                                                             |          |

Дата видання завдання 12.05.2025 р.

Здобувач вищої освіти \_\_\_\_\_  
(підпис)

Дмитро ГРИНЬКО  
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Ігор СІНЧУК  
(Ім'я, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової атестаційної роботи бакалавра на тему: «Вибір структури багаторівневого перетворювача напруги живлення для системи частотного регулювання асинхронним електроприводом»

44 с., 22 рис., 10 літературних джерел

У першому розділі було виконано порівняння структури перетворювача частоти у різній номенклатурній базі. Також було визначено переваги різних схемних рішень структури перетворювача частоти та визначено недоліки таких структур. Також були розглянуті принципи роботи перетворювача частоти для різних його типів.

У другому розділі була розроблена програма модельного дослідження багаторівневого перетворювача. Також були визначені принципові відмінності зазначеної структури та її складових від інших типів перетворювачів. Також було налаштовано параметри структурних складових модельного дослідження.

Модельні дослідження проводились для обраного асинхронного двигуна із заздалегідь підібраними параметрами та характеристиками.

У третьому розділі було досліджено перехідні процеси у структурі багаторівневого перетворювача. Було отримано графіки перехідних процесів за струмом та напругою асинхронного двигуна. Також були отримані графіки напруги живлення перетворювача частоти та проведено порівняльний аналіз з графіками напруги живлення асинхронної машини.

Завдяки порівняльному аналізу графіків напруги живлення перетворювача частоти та графіків напруги живлення асинхронної машини

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248-03 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 4    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

були зроблені висновки щодо впливу роботи перетворювача частоти на показники якості мережі живлення.

БАГАТОРІВНЕВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН,  
МОДЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ, ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248-03 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 5    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

## Зміст

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| Вступ.....                                                             | 7  |
| Розділ 1. Перетворювачі частоти для асинхронного електроприводу .....  | 10 |
| 1.1. Загальні відомості про перетворювачі частоти.....                 | 10 |
| 1.2. Конструктивні особливості перетворювачів.....                     | 13 |
| 1.3. Силова частина перетворювача .....                                | 17 |
| Розділ 2. Структура багаторівневого перетворювача.....                 | 33 |
| 2.1. Розробка структури багаторівневого перетворювача .....            | 33 |
| 2.2. Структура системи керування багаторівневим перетворювачем .....   | 36 |
| Розділ 3. Моделювання роботи багаторівневого перетворювача .....       | 37 |
| 3.1. Структура моделі багаторівневого перетворювача .....              | 37 |
| 3.2. Графіки перехідних процесів у багаторівневому перетворювачі ..... | 39 |
| Висновки .....                                                         | 41 |

## Вступ

Технологічний розвиток підприємств направлений на впровадження програм енергозбереження у структуру виробничих комплексів. Впровадження програм енергозбереження є одним з найперспективніших напрямків розвитку технологій виробництва.

Державні програми енергозбереження спрямовані на зниження витрат електричної енергії на забезпечення виробничих процесів. Багато у чому тенденції розвитку таких програм відповідає впровадження систем регульованого електроприводу у технологічне обладнання.

Оскільки сучасні системи електроприводу у переважній своїй більшості розбудовані на основі використання асинхронних короткозамкнених двигунів то перспективним напрямком на шляху розвитку та впровадження програми енергозбереження на технологічних лініях є модернізація асинхронного електроприводу на базі впровадження до структури його складу перетворювачів частоти.

Слід зазначити що такий напрямок набув широкого розвитку у останню десятиліття. Але переважна більшість таких впроваджень стосується систем живлення низьковольтних асинхронних машин. При вирішенні завдань енергозбереження для електроприводу що містить високовольтні асинхронні двигуни виникає ряд ускладнень. Тому впровадження перетворювальних пристроїв для живлення високовольтних асинхронних двигунів виглядає цікавим практичним завданням.

Розглянемо автоматизований електропривод насосних установок. Так для електроприводу проміжних насосних станцій потужність якого складає 100 кВт доволі широко застосовується перетворювачі частоти. Але слід зазначити що для електроприводу магістральних трубопроводів потужність якого складає 1-2 МВт впровадження систем регульованого електроприводу

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248-03 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 7    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

не набуло великого поширення хоча може призвести до суттєвої економії ресурсів. Це пов'язано що при необхідності забезпечити живлення високовольтні агрегати виникає необхідність у встановленні більшої кількості перетворювальних елементів.

Такий підхід потребуємо доволі суттєвих витрат на встановлення та налагодження перетворювальних систем. Для зменшення показника витрат на встановлення перетворювальних систем слід суттєво зменшити маса габаритні показники перетворювальних пристроїв. Останнє може бути досягнуто шляхом впровадження новітніх розробок перетворювальної техніки. Річ йде про новітні розробки у виробництві напівпровідникових елементів високої напруги.

Такі перетворювальні ланки що складають структуру перетворювача частоти дозволяють виконувати зміну амплітуди напруги та частоти живлення асинхронного двигуна не застосовуючи силові трансформатори. Однак слід зазначити що такий підхід не прибирає необхідності встановлення фільтро-компенсуючих пристроїв для подавлення вищих гармонік у мережі живлення. Це дещо підвищує масогабаритні показники перетворювальних пристроїв але все ж вони залишаються на порядок нижчими за трансформаторні системи.

Високовольтні перетворювальні пристрої дозволяють поліпшити експлуатаційні показники електромеханічного обладнання великої потужності. Також вони відрізняються хорошими динамічними характеристиками.

Так у асинхронних та синхронних електричних приводах з'являється можливість виконувати опосередкований пуск електричних машин з напругою живлення 6 та 10 кВ. Таке застосування дозволяє суттєво знизити пускові струми та виконати плавний розгін електричної машини.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248-03 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 8    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

При вдалому виборі параметрів системи керування це також дає змогу суттєво зменшити навантаження на мережу живлення та знизити вплив запуску споживачів великої потужності на роботу інших електричних приймачів. Такий підхід забезпечує стійкість при роботі енергетичної системи.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248-03 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 9    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

# Розділ 1. Перетворювачі частоти для асинхронного електроприводу

## 1.1. Загальні відомості про перетворювачі частоти

Розглянемо загальну структуру перетворювача частоти.

Перетворювач частоти можна використовувати для керування частотою обертання та моментом асинхронного двигуна.

Система керування налаштовується таким чином щоб змінювати частоту напруги живлення асинхронної машини.

Окремих випадках частотні перетворювачі також використовуються для керування частотою обертання та моментом синхронної машини.

Але таке застосування потребує додаткових налаштувань системи керування та наявності додаткового обладнання.

|           |                 |          |        |      |                          |                 |      |        |
|-----------|-----------------|----------|--------|------|--------------------------|-----------------|------|--------|
|           |                 |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248-03 |                 |      |        |
| Зм.       | Лист            | № докум. | Підпис | Дата | Розділ 1                 | Лім.            | Лист | Листів |
| Розробив  | Гринько Д.К.    |          |        |      |                          |                 | 10   | 23     |
| Перевішив | Сінчук І.О.     |          |        |      |                          | КНУ<br>ЕЕМ-21-1 |      |        |
| Реценз.   |                 |          |        |      |                          |                 |      |        |
| Н. Контр. | Сінчук І.О.     |          |        |      |                          |                 |      |        |
| Затвердив | Пересунько І.І. |          |        |      |                          |                 |      |        |



Рис. 1.1. Загальний вигляд перетворювача

Розглянемо загальну структуру перетворювача частоти. Перетворювач частоти можна використовувати для керування частотою обертання та моментом асинхронного двигуна. Система керування налаштовується таким чином щоб змінювати частоту напруги живлення асинхронної машини. Окремих випадках частотні перетворювачі також використовуються для керування частотою обертання та моментом синхронної машини. Але таке застосування потребує додаткових налаштувань системи керування та наявності додаткового обладнання.



Рис. 1.2. Загальний вигляд обладнання перетворювача

У структурі перетворювача частоти можна виділити інверторну групу як важливий елемент функціонування перетворювача. За своїм призначенням інверторна група формує вихідний сигнал у вигляді напруги певної амплітуди та частоти яка спрямовується на обмотку статора електричної машини. Інверторні групи складаються з напівпровідникових елементів керування якими спрямовано на формування вихідного сигналу у вигляді напруги певної амплітуди та частоти що буде живити обмотку статора електричного двигуна.

## 1.2. Конструктивні особливості перетворювачів

Розглянемо конструктивні особливості структури перетворювача частоти. Основними елементами будь-якого перетворювача частоти є силові напівпровідникові ключі. Завдяки силовим напівпровідниковим ключем відбувається керування процесом перетворення електричної енергії у структурі перетворювального пристрою. Напівпровідникові ключі формують силові модулі які складають структуру сучасних перетворювачів частоти. Силові напівпровідникові модулі окрім силових каналів мають канали вводу та виводу інформації.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248-03 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 13   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

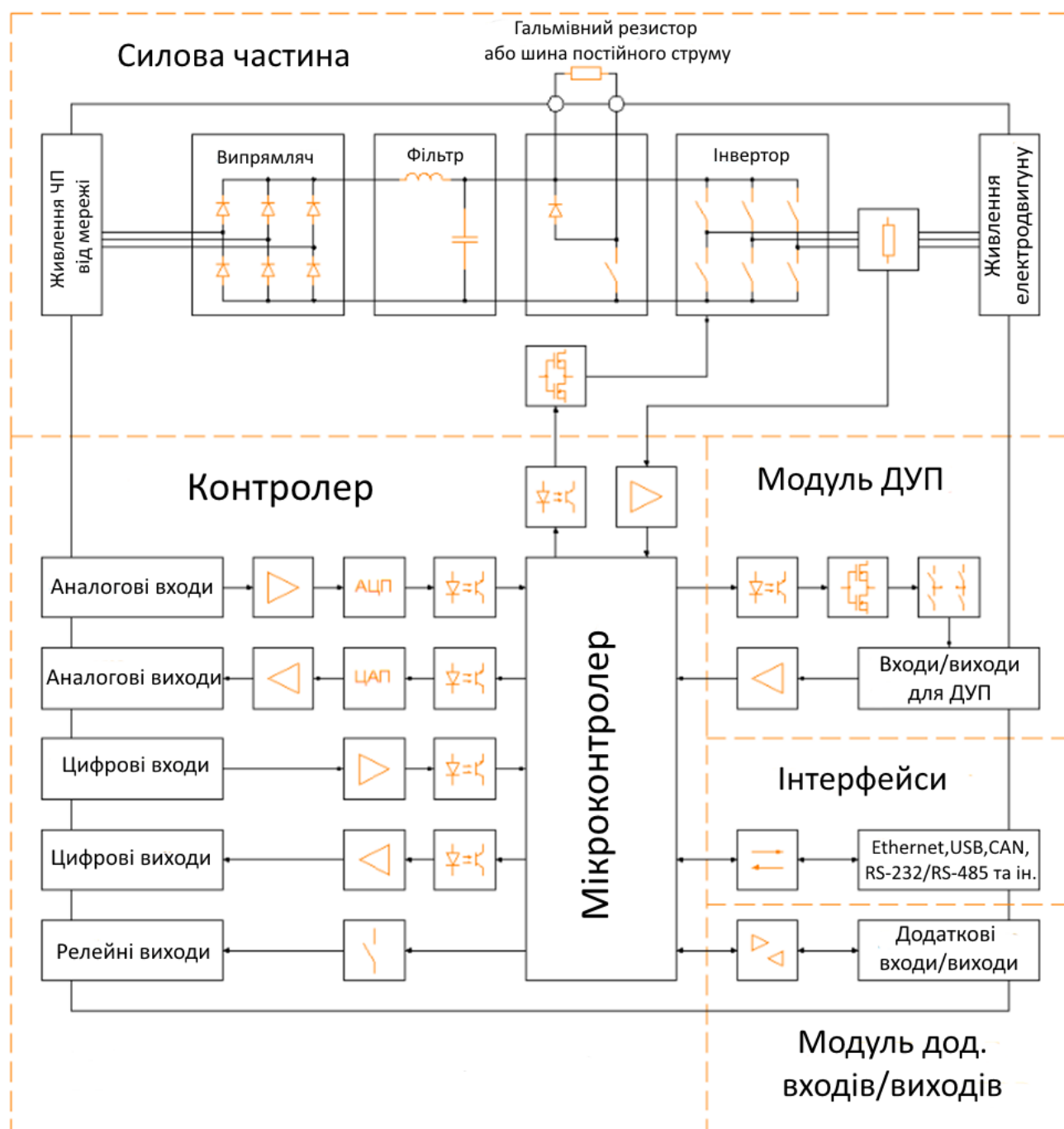


Рис. 1.3. Структура перетворювача

## Позначення



- підсилювачі



- інвертор



- розв'язка та узгодження сигналів



- реле



- розв'язка сигналів



- контролер інтерфейсу



- датчики струму



- аналого-цифровий перетворювач



- драйвери



- цифро-аналоговий перетворювач

Розглянемо сучасні підходи щодо розв'язку методів керування перетворювальними пристроями. Сучасна структура перетворювальних пристроїв базується на використанні мікропроцесорних систем. До програмного забезпечення мікропроцесорної системи заносяться основні характеристики електричного двигуна а також формується алгоритм регулювання його параметрів. Можна розглянути наступні варіанти системи керування електроприводом змінного струму:

- системи керування без зворотного зв'язку;
- системи керування зі зворотним зв'язком;
- статичні системи регулювання.

Для керування напівпровідниковими силовими модулями використовуються різні методи формування напруги. Завданням таких методів є формування модельованого сигналу для здійснення відкриття або закриття силових напівпровідникових модулів. Від методів модуляції сигналу керування безпосередньо залежить ефективність процесу перетворення електричної енергії у структурі напівпровідникового перетворювача.

Розглянемо основні методи створення модельованого сигналу керування напівпровідниковими перетворювачами. До найбільш поширеного можна віднести метод широтно-імпульсної модуляції який дозволяє за доволі простим алгоритмом здійснювати ефективне керування силовими напівпровідниковими модулями. Також доволі широко використовується просторово-векторна модуляція сигналів керування. Слід зазначити що цей метод є дещо складнішим у своїй реалізації тому потребує чіткого визначення алгоритмів регулювання перетворювальним пристроєм. Метод амплітудо-частотної модуляції не набув широкого розповсюдження але також використовується для формування сигналів керування елементами напівпровідникового перетворювача.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248-03 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 16   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

### 1.3. Силова частина перетворювача

Розглянемо найбільш поширені структури силової частини перетворювальних пристроїв. На різноманіття структур напівпровідникових перетворювальних пристроїв впливає розвиток сучасної науки та техніки. Так можна спостерігати щось зі зміною структури напівпровідникових ключів поступово з'являються можливість розвитку підходів щодо можливостей виконувати завдання підвищеною складністю. За останні десятиліття суттєво змінилась елементна база напівпровідникових перетворювальних пристроїв, яка відрізняється підвищеною стійкістю до проявів перенапруги та перевантаження при роботі напівпровідникових перетворювачів. Також суттєво збільшились пропускна здатність та діапазон зміни параметрів напівпровідникових елементів. Розвиток високовольних напівпровідникових елементів відкриває нові можливості для поліпшення структури напівпровідникових перетворювачів.

Розглянемо інверторні групи які складають основу структури напівпровідникового перетворювача. Серед інверторних груп найбільш поширеніші структури дворівневих перетворювачів. У структурі дворівневого перетворювача інверторна група виступає вихідною ланкою у структурі перетворення параметрів електричної енергії. Зазвичай окрім напівпровідникових силових модулів інверторні групи містять також конденсатори. Конденсатори допомагають формувати два рівні керуючого сигналу для верхньої та нижньої групи силових напівпровідникових модулів.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248-03 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 17   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

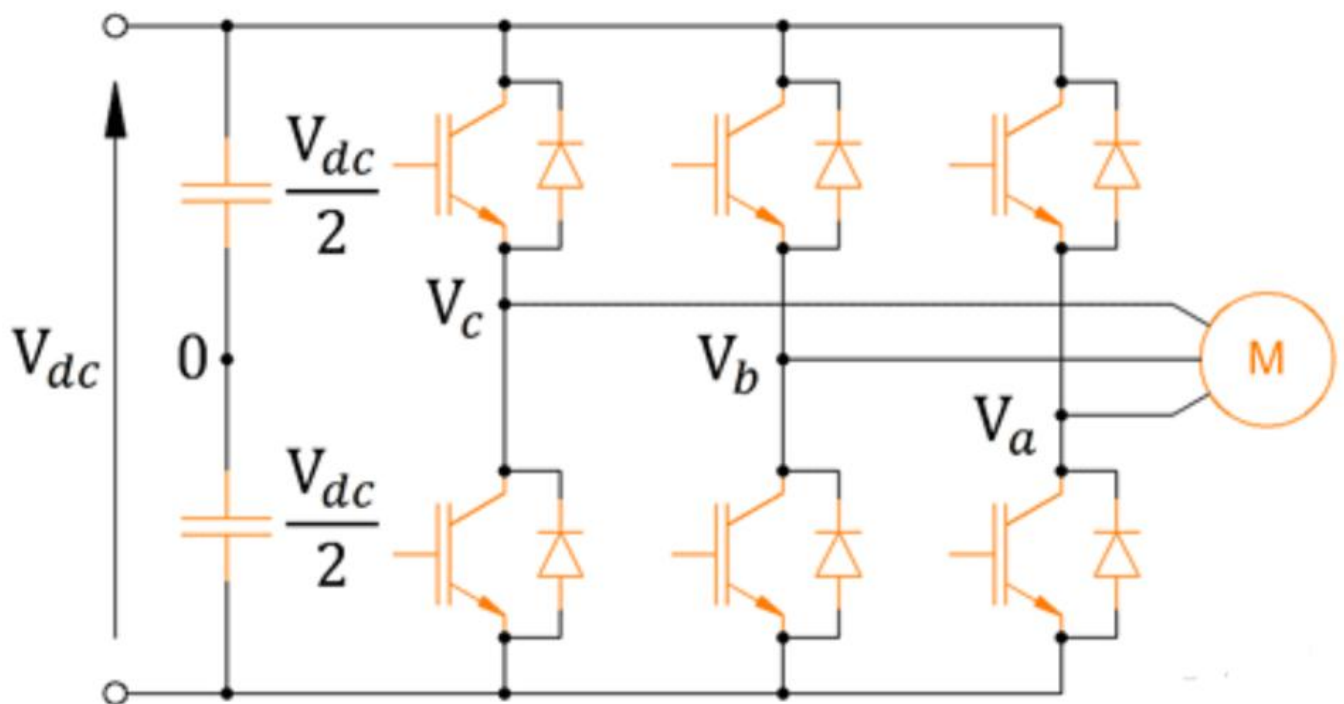


Рис. 1.4. Схема інвертору напруги

При використанні методу широт на імпульсній модуляції на виході інверторної групи можна сформувати необхідний сигнал вихідної напруги імпульсної форми. Для формування вихідного сигналу у синусоїдальній формі виконують його фільтрування. Недоліком таких перетворювачів є те що амплітудне значення вихідної напруги буде обмеженим значенням напруги у ланці постійного струму. На жаль на практиці ця напруга обмежена значенням 690 В. Тому для потреб високовольтного електроприводу така структура перетворювального пристрою не застосовується адже на практиці потребує встановлення значної кількості додаткових елементів.

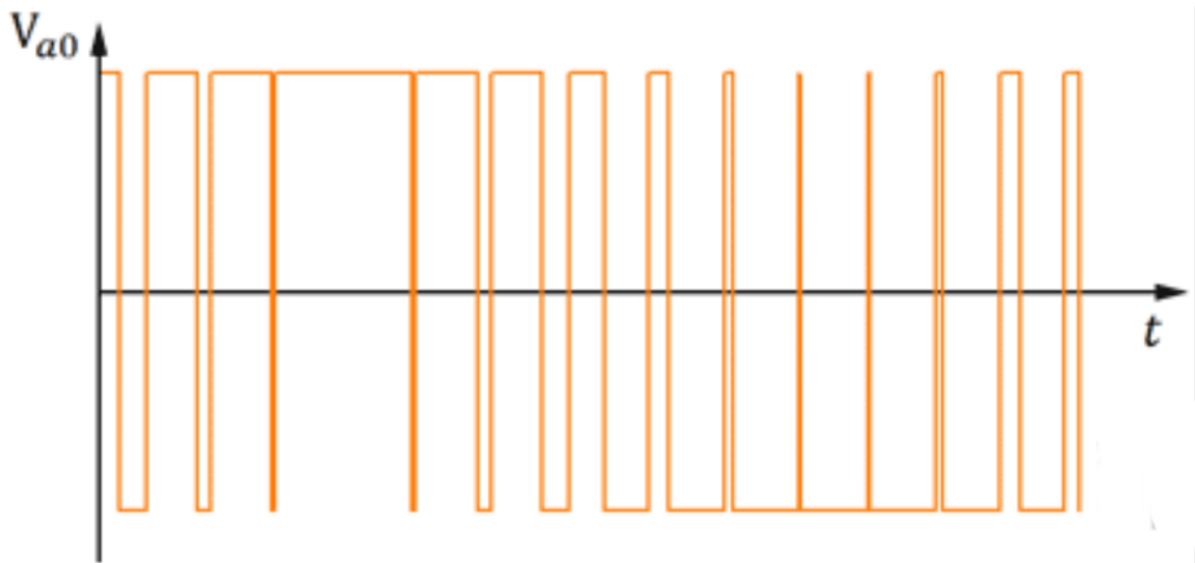


Рис. 1.5. Напруга на виході інвертору напруги

Розглянемо структуру багаторівневого перетворювального пристрою. Для більш легкого сприйняття скористаємося структурою трирівневого перетворювача. У такій структурі теж використовуються конденсатори, але напівпровідникові силові модулі з'єднані таким чином що за допомогою двох конденсаторів можна відтворити східчасту модель формування вихідного сигналу. Для покращення якості перетворення електричної енергії на кожному з рівнів напівпровідникового перетворювача необхідно використовувати високовольтні силові напівпровідникові модулі. Але наявність конденсаторів у такій структурі створює асиметрію напруги між рівнями перетворювачем, що є суттєвим недоліком для реалізації ефективних алгоритмів керування. На практиці цю проблему можна вирішити шляхом заміни методу модуляції керуючого сигналу.

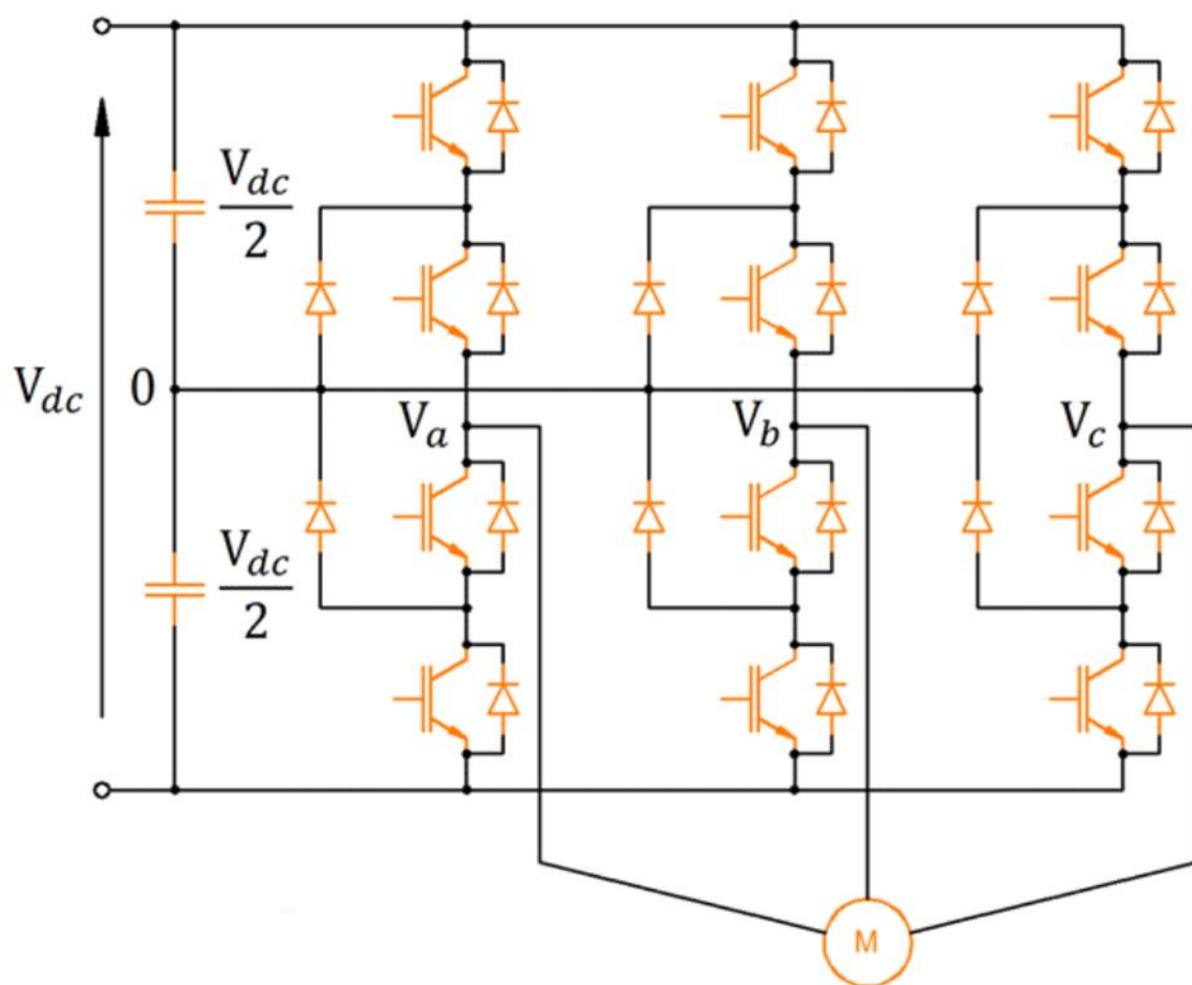


Рис. 1.6. Структура багаторівневого перетворювача

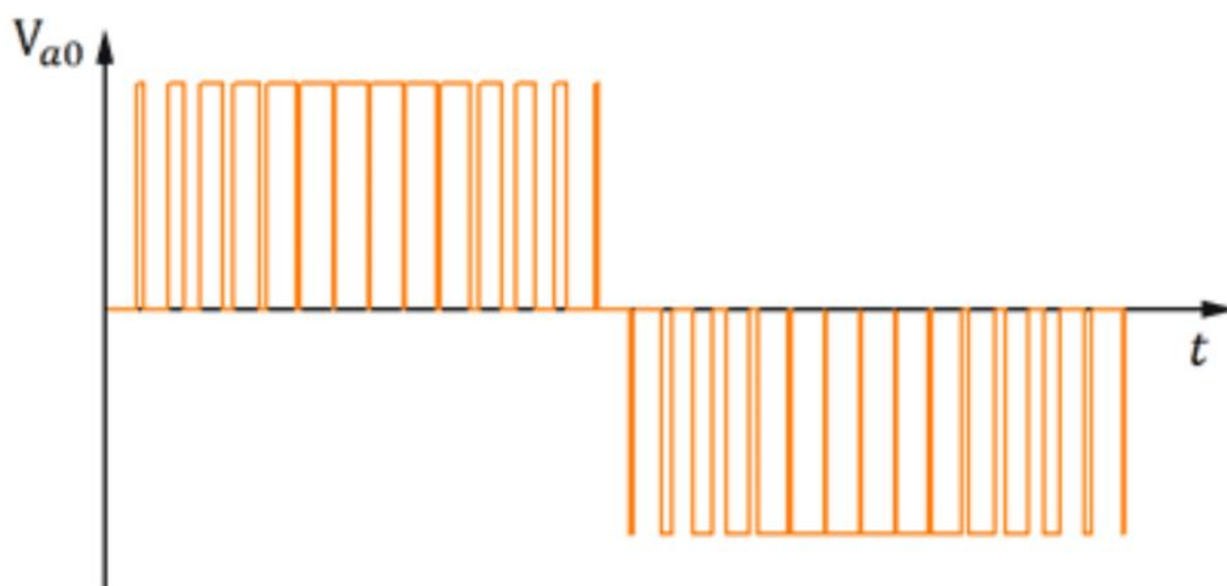


Рис. 1.7. Напряга на виході багаторівневого перетворювача

Розглянемо структуру активного перетворювача. У цієї структурі зворотні діоди у каналі керування замінюються керованими напівпровідниковими ключами. Таким чином можна обирати керовану комбінацію ввімкнення силових напівпровідникових модулів завдяки чому можна забезпечити зменшення та рівномірний розподіл електромагнітних втрат.

На основі структури трирівневого перетворювача можна формувати структури з більшою кількістю рівнів перетворення електричної енергії. Найпростіший метод досягнення цього це застосування більшої кількості конденсаторів у структурі напівпровідникового перетворювача.

Такий підхід дозволяє суттєво збільшити потужність багаторівневого перетворювача та суттєво підвищити показники якості перетворення електричної енергії. Багаторівневі перетворювачі володіють якостями високої швидкості наростанням сигналів напруги та струму, але при збільшенні рівнів регулювання напруги з'являється складність при формуванні сигналів

завдання оскільки із зростанням рівнів перетворення електричної енергії зростає й порядок диференційних рівнянь що складають контури регулювання напівпровідниковим перетворювачем.

Також серед класифікації багаторівневих перетворювачів слід відзначити каскадні схеми, які застосовують комбінацію силових напівпровідникових модулів у вигляді мостових схем. Такий підхід забезпечує більшу кількість рівнів вихідної напруги.

Каскадний перетворювач можна розглядати як перетворювач який складається з модельованої структури більш простих за конструкцією інверторів напруги. Недоліком такої схеми є що кожен з інверторів напруги складається з низьковольтних напівпровідникових силових модулів. Це значно здешевшує ціну напівпровідникового перетворювального пристрою але у випадку відмови одного з елементів перетворювач припиняє своє функціонування.

Рівень потужності яким буде керувати перетворювальний пристрій побудований на зазначеному підході буде залежати від кількості елементарних напівпровідникових силових інверторів.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248-03 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 22   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

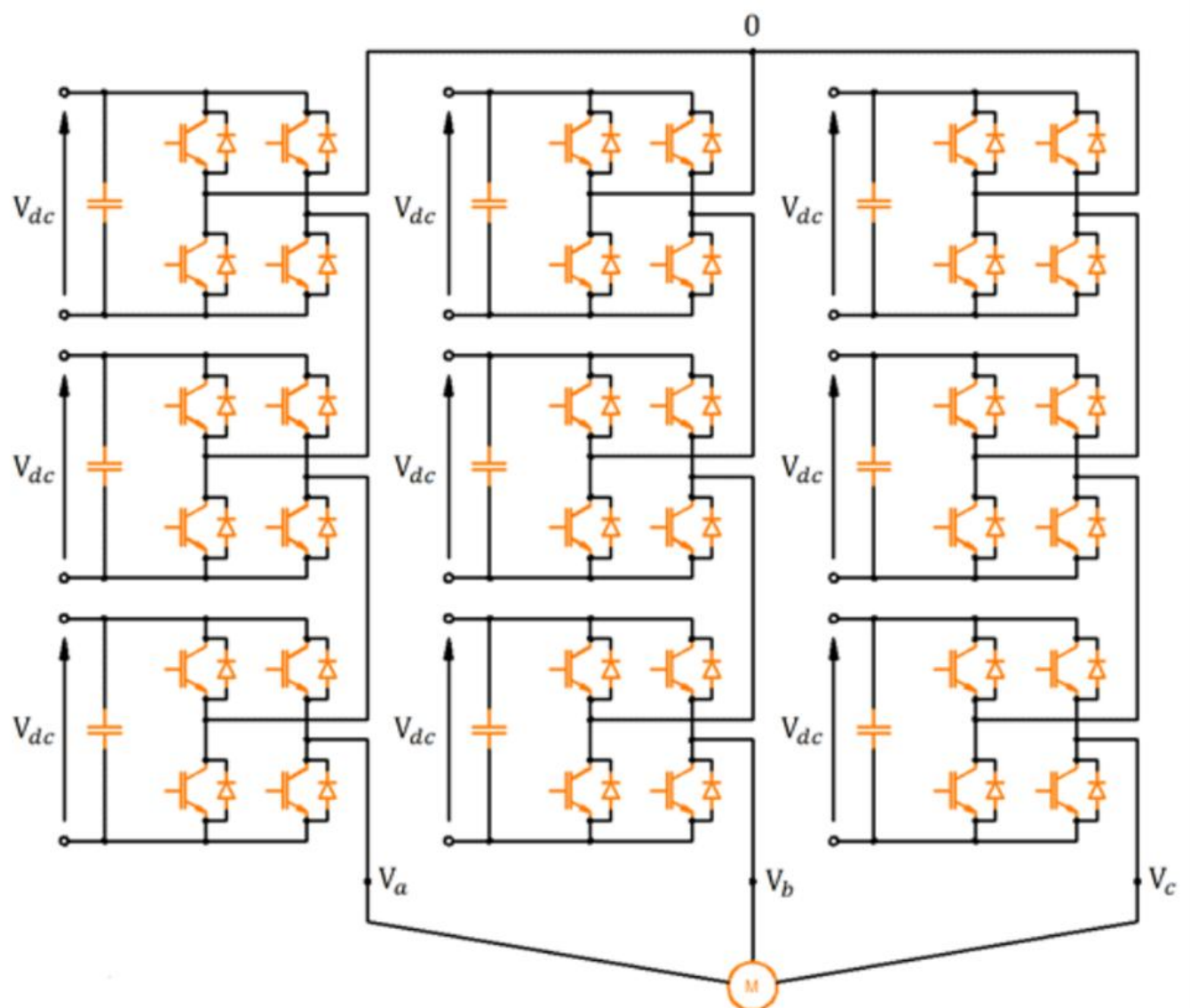


Рис. 1.8. Структура каскадного перетворювача

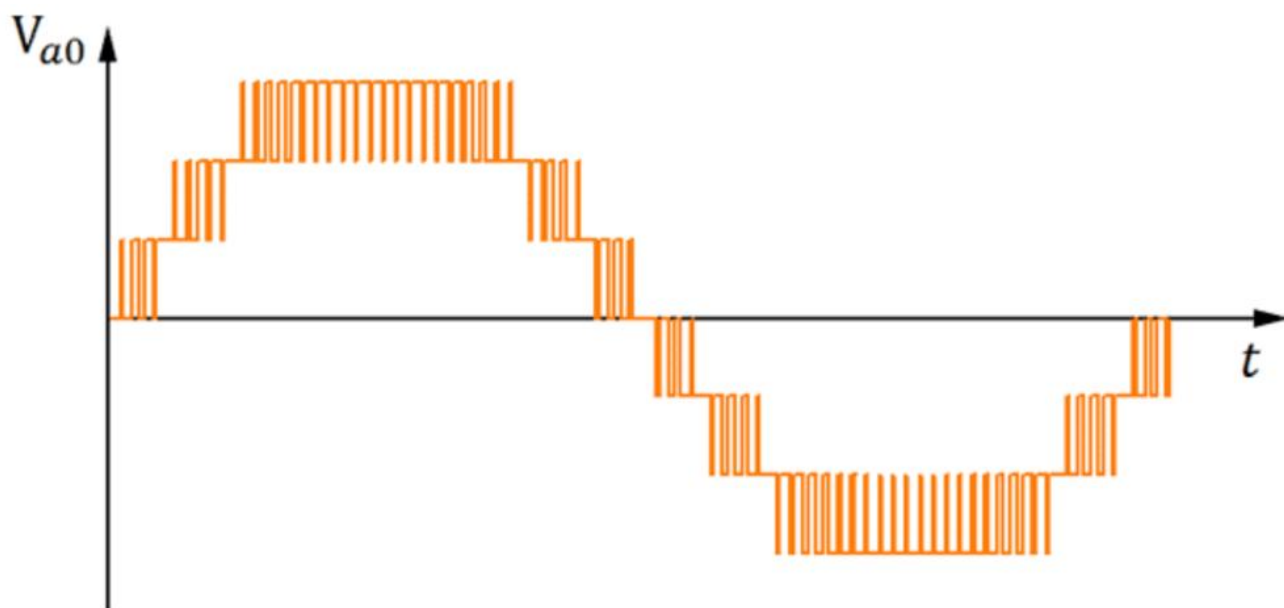


Рис. 1.9. Напряга на виході каскадного перетворювача

Розглянемо структуру перетворювача з плаваючими конденсаторними елементами. Структура подібного перетворювача дозволяє формувати вихідну напругу із такою ж кількістю рівнів скільки міститься конденсаторних елементів. У перетворювачі відбувається пряме сполучення вихідної напруги живлення із зазначеним конденсаторним елементом.

До недоліків перетворювача з плаваючими конденсаторними елементами можна віднести модульну структуру що потребує додаткової кількості силових напівпровідникових елементів. До гідностей схеми слід віднести низький показник наявності гармонійних сигналів у вихідній напрузі.

Слід зазначити щодо гідностей усіх перетворювачів з конденсаторними елементами слід віднести той факт що такі системи не потребують вхідних трансформаторів а живлення конденсаторних елементів відбувається безпосередньо від мережі.

До недоліків усіх перетворювачів з конденсаторними елементами слід віднести той факт що такі системи потребують застосування ускладнених

алгоритмів керування для можливості регулювання напруги на конденсаторних елементах.

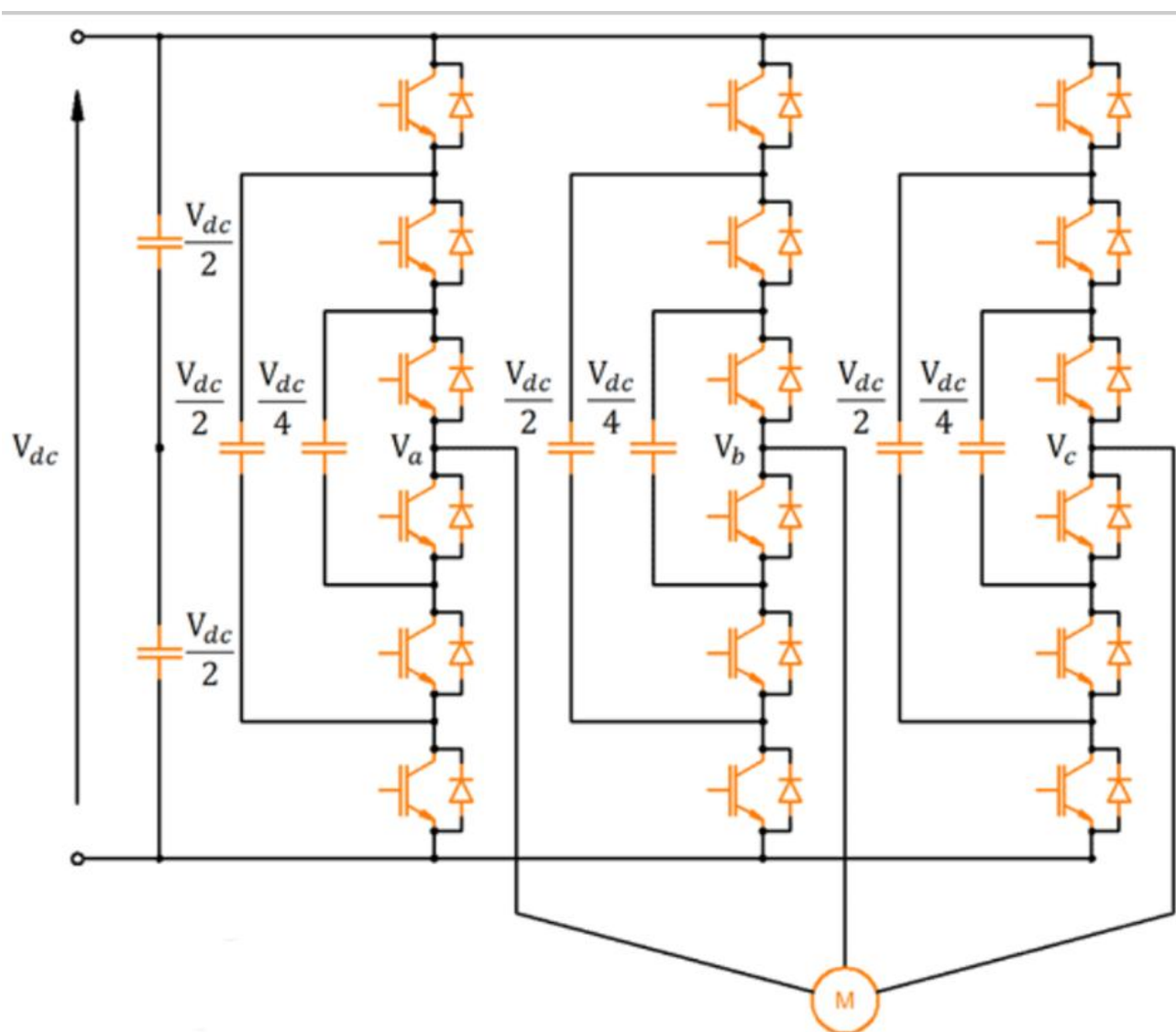


Рис. 1.10. Структура перетворювача з плаваючими конденсаторами

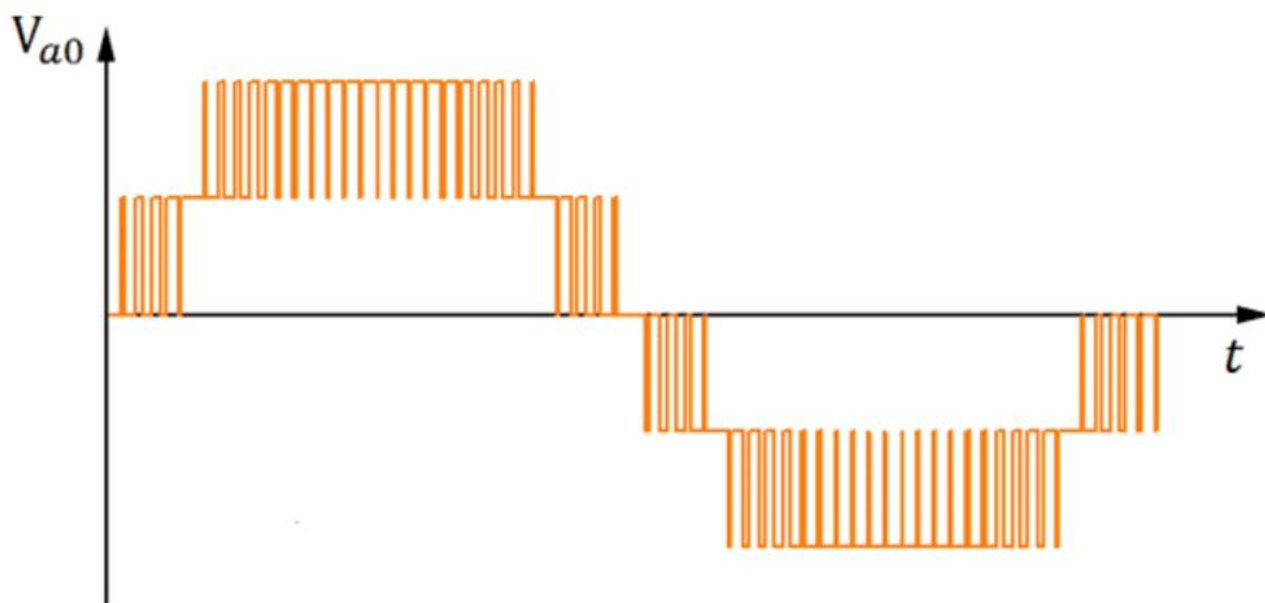


Рис. 1.11. Напруга на виході перетворювача з плаваючими конденсаторами

Розглянемо роботу інверторів струму для формування напруги на виході перетворювального пристрою. У якості вхідного модулю у таких структурах використовується керований випрямляч що формує необхідне значення струму.

Для зменшення завад при зміні навантаження у ланці постійного струму слід застосовувати індуктивний опір. Схемне рішення інвертора струму несуттєво відрізняється від інвертору напруги.

Модуляція сигналів керування зазвичай виконується за допомогою методу широтно-імпульсної модуляції. Для інверторів струму також необхідною складовою є наявність вихідної ємності яка використовується для згладжування вихідних струмів.

До недоліків інверторів струму можна віднести той факт що вони можуть використовуватись лише для середніх значень напруги живлення. До гідностей схеми слід віднести можливість рекуперації електричної енергії крізь структуру перетворювача.

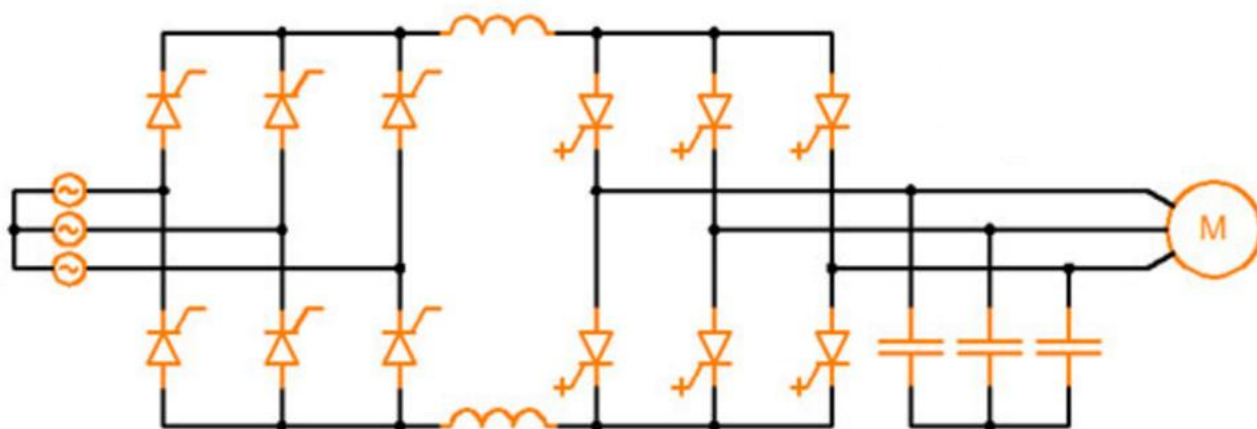


Рис. 1.12. Структура інвертора струму

Розглянемо структуру безпосереднього перетворювача електричної енергії. Цей перетворювач не використовує елементи накопичення енергії та забезпечує пряме з'єднання вхідних та вихідних елементів. То гідності безпосередніх перетворювачів слід віднести доволі незначні масогабаритні характеристики. До недоліків слід віднести складність виконання схеми керування.

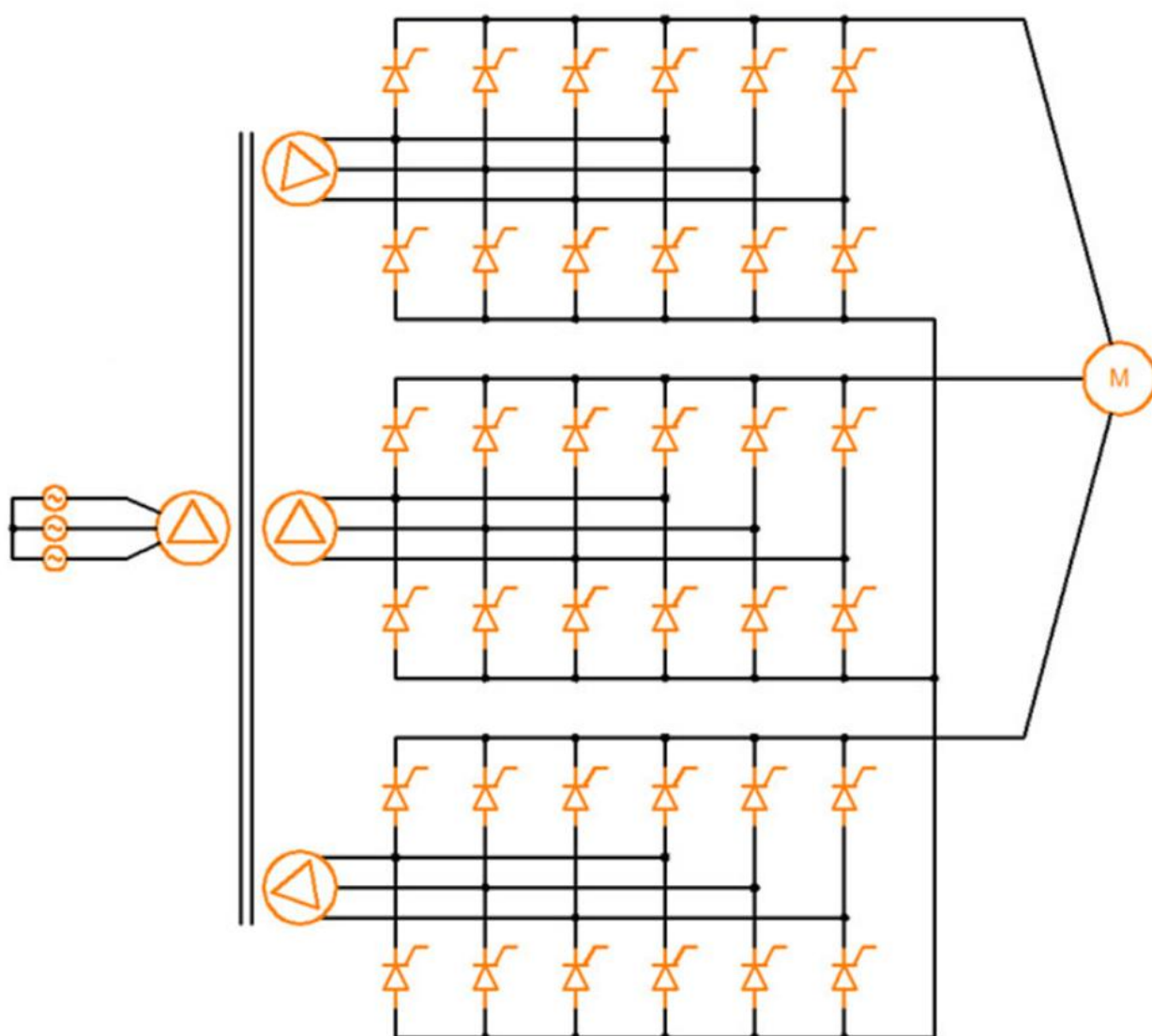


Рис. 1.13. Структура циклоконвертеру

Розглянемо структуру циклоконвертеру. Подібні схеми також відносяться до безпосередніх перетворювачів частоти. Циклоконвертери можна використовувати у структурі високовольного електроприводу.

До особливостей структури циклоконверторів можна віднести наявність подвійного перетворювача, який може генерувати зміну напругу синусоїдального сигналу. Вихідна напруга до кожного перетворювача подається відокремленого трансформатору.

Такий підхід дозволяє усунути гармонійні складові у сигналів вхідного струму. Вихідна напруга формується в результаті модуляції сегментованих елементів вхідного блоку. Така структура безпосереднього перетворювача частоти використовується для керування низькочастотним електроприводом великої потужності.

Розглянемо структуру матричного перетворювача частоти. Він також належить до типу безпосередніх перетворювачів частоти. За специфікою роботи матричного перетворювача можливо виконувати живлення вихідного навантаження від вхідної напруги.

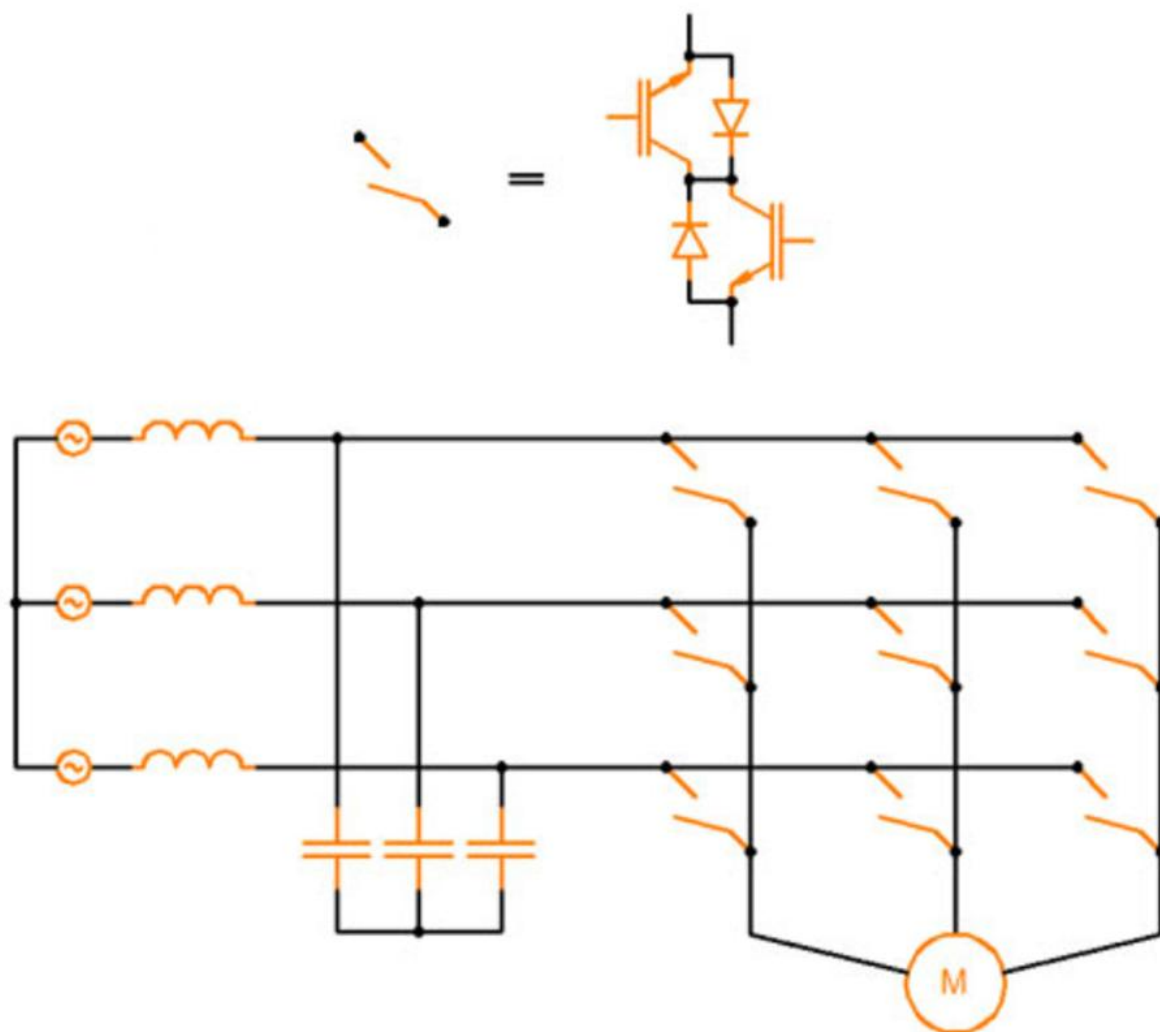


Рис. 1.14. Структура матричного перетворювача

Структуру матричного перетворювача складають двонаправлені напівпровідникові силові модулі. Зазвичай така структура містить дев'ять двонаправлених напівпровідникових силових модулів. Принцип роботи матричного безпосереднього перетворювач частоти полягає у комбінації живлення вихідного навантаження від джерела живлення через комутацію двонаправлених напівпровідникових силових модулів струм через які може протікати в будь-якому напрямку.

Для поліпшення енергетичних показників матричного безпосереднього перетворювач частоти використовується індуктивно-ємнісний фільтр. За допомогою дев'яти двонаправлених напівпровідникових силових модулів можна виконувати комбінацію з 27 комутаційних станів вихідної напруги.

До основних переваг матричних безпосередніх перетворювачів частоти можна віднести невеликі масогабаритні характеристики.

Розглянемо роботу непрямого матричного перетворювача. На відміну від безпосереднього матричного перетворювача непрямий матричний перетворювач складається з трифазного випрямляча який будується на базі двонаправлених напівпровідникових силових модулів.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248-03 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 30   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

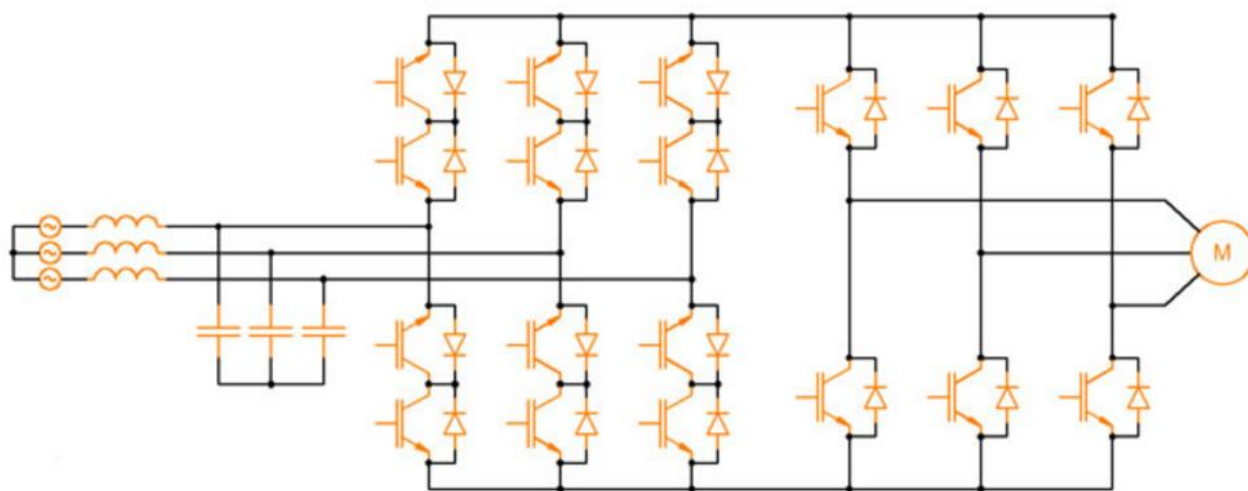


Рис. 1.15. Структура непрямого матричного перетворювача

Двонаправлені напівпровідникові силові модулі формують у структурі непрямого матричного перетворювача віртуальну ланку постійного струму. До переваг непрямого матричного перетворювач можна віднести меншу кількість напівпровідникових силових модулів яка утворює ту ж саму кількість комутаційних станів вихідної напруги як і у безпосередньому матричному перетворювачі частоти.

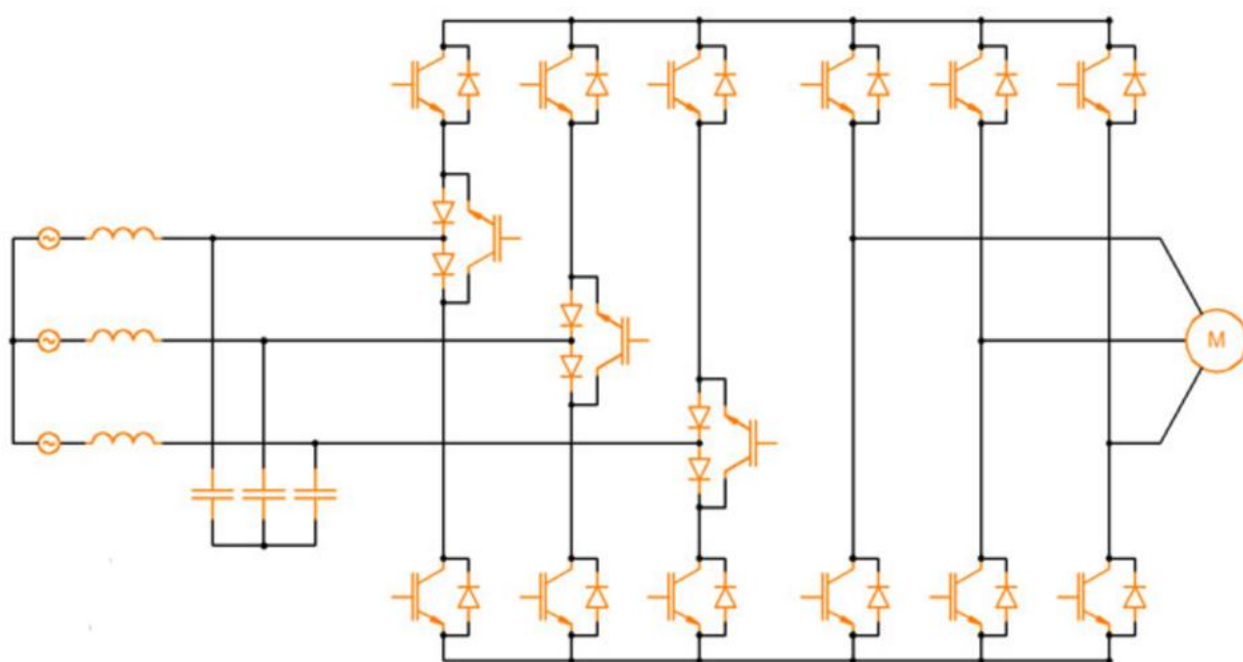


Рис. 1.16. Різновид структури нематричного перетворювача

## Розділ 2. Структура багаторівневого перетворювача

### 2.1. Розробка структури багаторівневого перетворювача

Для дослідження режимів роботи багаторівневого перетворювача частоти скористаємося математичною моделлю у програмному середовищі MatLab. У якості навантаження для багаторівневого перетворювача будемо використовувати асинхронний електричний двигун.

Представимо загальний вигляд розробленої математичної моделі.

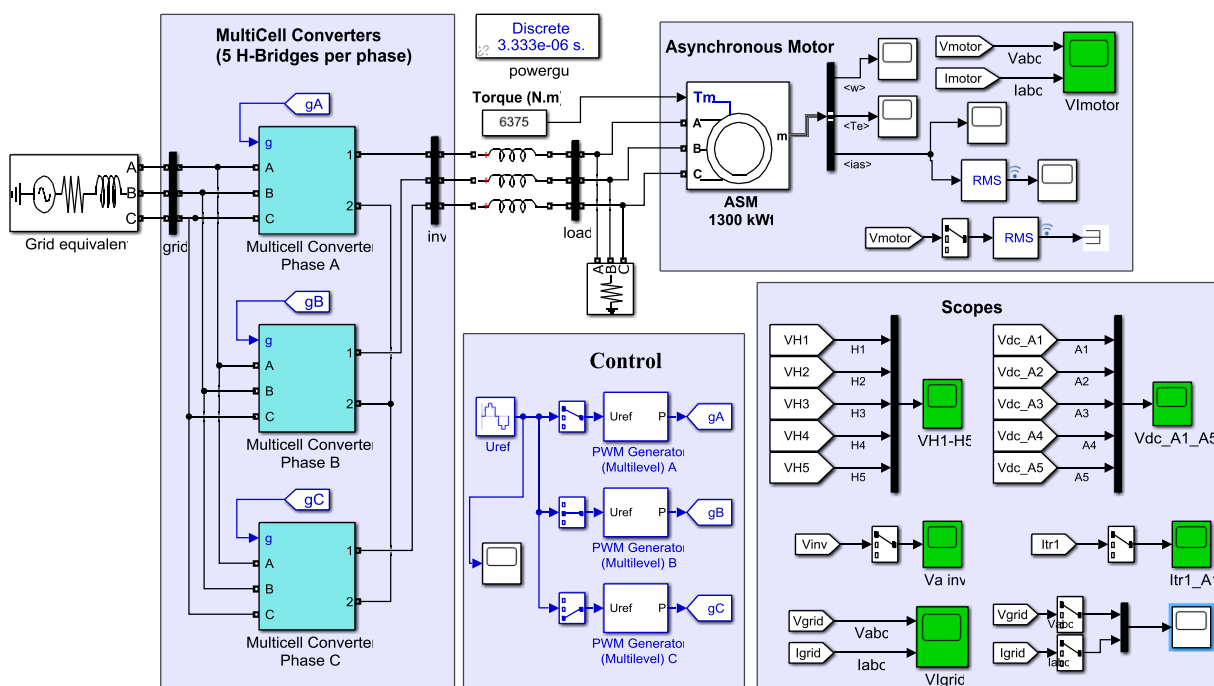


Рис. 2.1. Структура багаторівневого перетворювача

|           |                 |          |        |     |                          |      |        |
|-----------|-----------------|----------|--------|-----|--------------------------|------|--------|
|           |                 |          |        |     | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248-03 |      |        |
| Зм.       | Лист            | № докум. | Підпис | Дат | Розділ 2                 |      |        |
| Розробив  | Гринько Д.К.    |          |        |     |                          |      |        |
| Перевірив | Сінчук І.О.     |          |        |     | КНУ<br>ЕЕМ-21-1          |      |        |
| Реценз.   |                 |          |        |     |                          |      |        |
| Н. Контр. | Сінчук І.О.     |          |        |     |                          |      |        |
| Затвердив | Пересунько І.І. |          |        |     |                          |      |        |
|           |                 |          |        |     | Лім.                     | Лист | Листів |
|           |                 |          |        |     |                          | 33   | 4      |

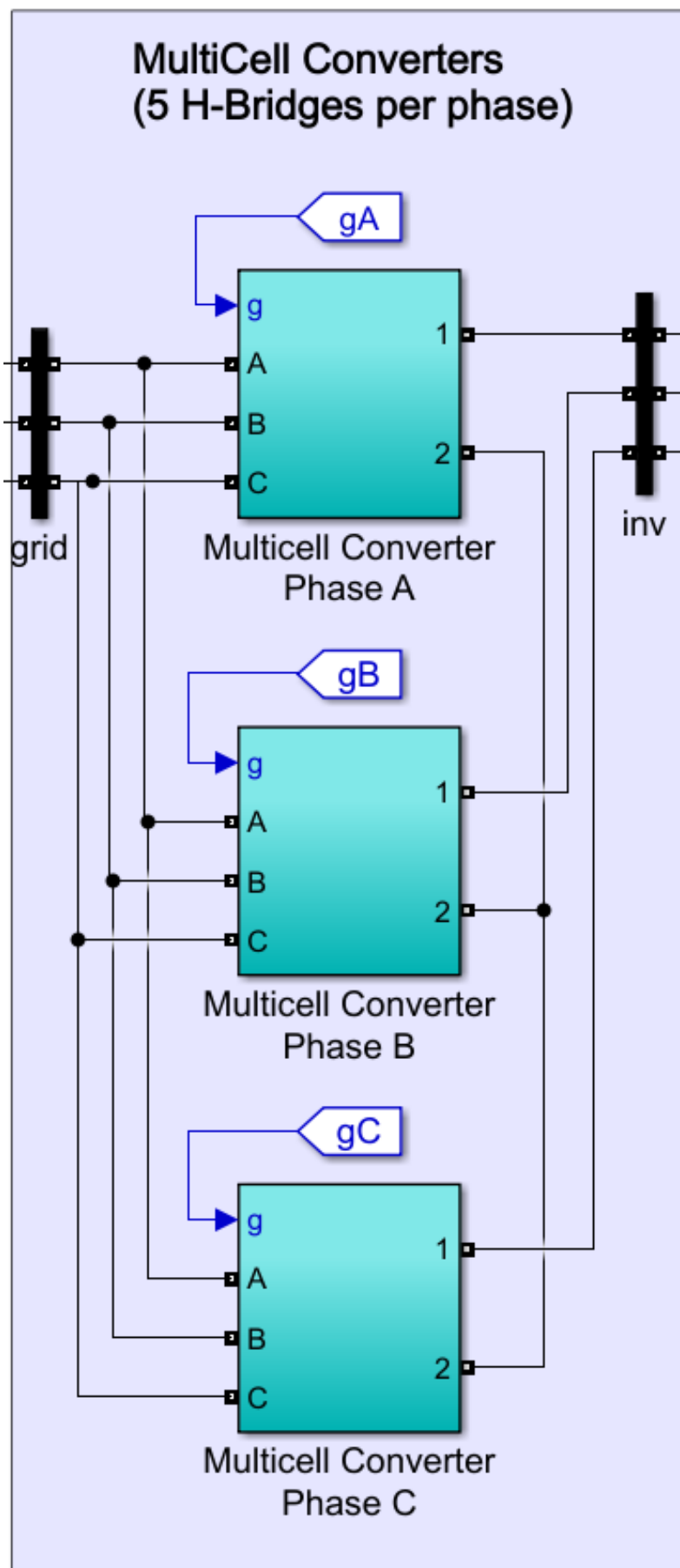


Рис. 2.2. Структура моделі багаторівневого перетворювача

|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248-03

Арк.

34

Окремо у математичній моделі буде представлено джерело живлення матричного перетворювача. Матричний перетворювач розбудовуємо за трирівневою структурою. Кожен з напівпровідникових силових модулів являє собою однофазний перетворювач. Також у системі встановимо ємнісний фільтр.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248-03 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 35   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

## 2.2. Структура системи керування багаторівневим перетворювачем

Окремий блок моделі представляє систему керування багаторівневим перетворювачем.

Для підвищення якості керування у моделі застосовуємо спеціальні бустерні схеми.

Представимо більш детальну структуру системи керування напівпровідниковим силовим модулем.

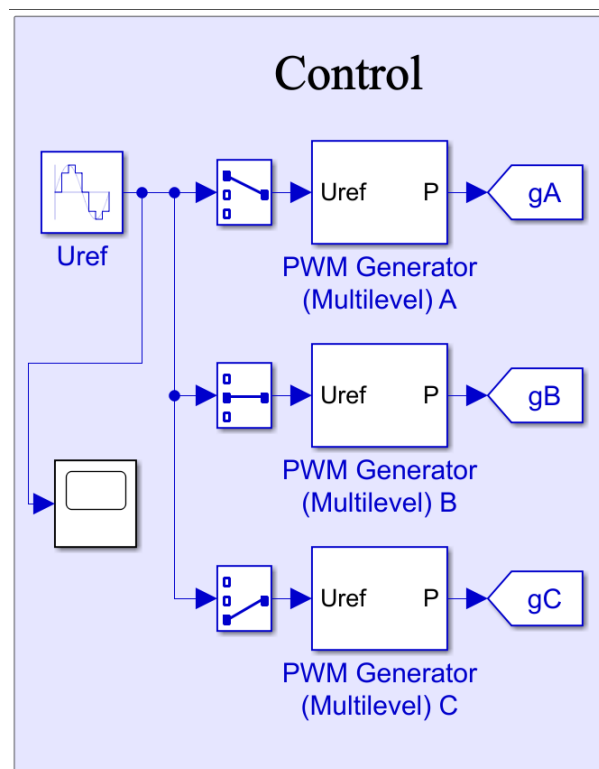


Рис. 2.3. Структура системи керування

## Розділ 3. Моделювання роботи багаторівневого перетворювача

### 3.1. Структура моделі багаторівневого перетворювача

Представимо напрацювання щодо розробки математичної моделі багаторівневого перетворювача частоти який живить асинхронний електричний двигун.

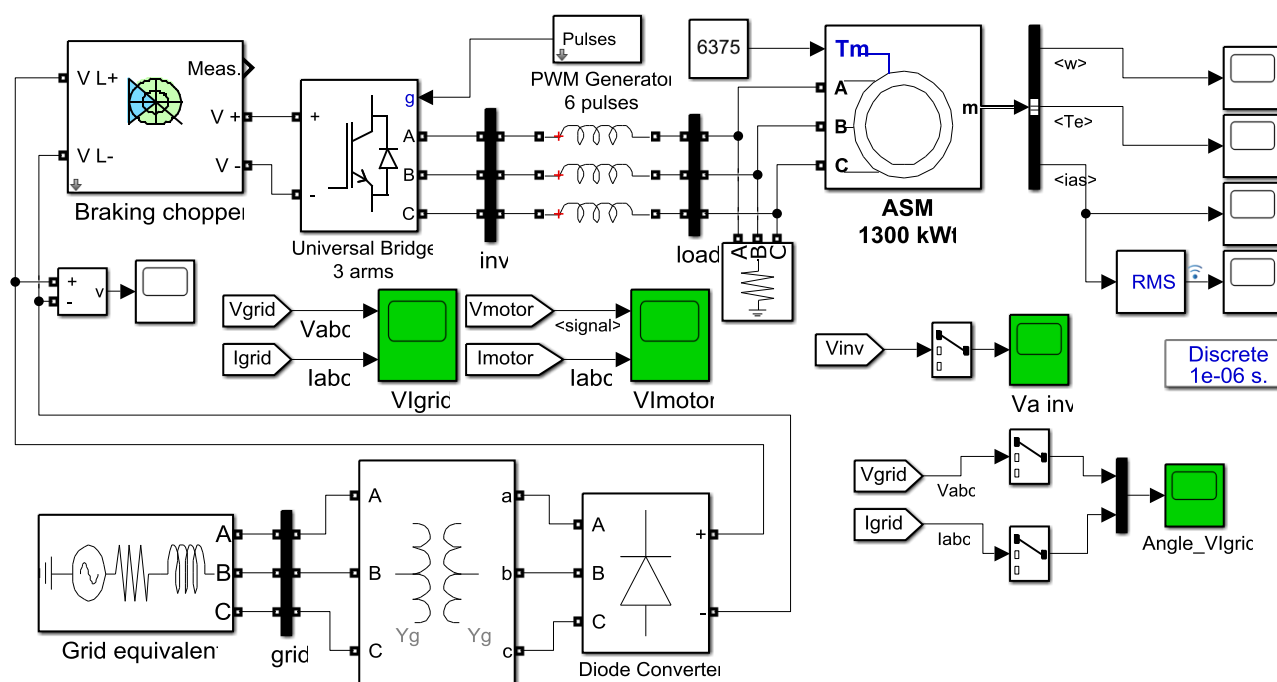


Рис. 3.1. Структура моделі багаторівневого перетворювача

|           |                 |          |        |     |                          |      |        |
|-----------|-----------------|----------|--------|-----|--------------------------|------|--------|
|           |                 |          |        |     | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248-03 |      |        |
| Зм.       | Лист            | № докум. | Підпис | Дат | Розділ 3                 |      |        |
| Розробив  | Гринько Д.К.    |          |        |     |                          |      |        |
| Перевірів | Сінчук І.О.     |          |        |     | КНУ<br>ЕЕМ-21-1          |      |        |
| Реценз.   |                 |          |        |     |                          |      |        |
| Н. Контр. | Сінчук І.О.     |          |        |     |                          |      |        |
| Затвердив | Пересунько І.І. |          |        |     |                          |      |        |
|           |                 |          |        |     | Літ.                     | Лист | Листів |
|           |                 |          |        |     |                          | 37   | 4      |

У структурі математичної моделі можна бачити джерело живлення, багаторівневий напівпровідниковий перетворювач та асинхронну машину. Структура окремих елементів математичної моделі багаторівневого перетворювача була розглянута попередньому розділі.

Також можна бачити що у структурі моделі багаторівневого напівпровідникового перетворювача використовується високовольтний інвертор напруги. Таке застосування дає змогу суттєво зменшити кількість силових напівпровідникових модулів.

У якості захисного елемента використовується вхідний напівпровідниковий силовий модуль, який забезпечує накопичення електричної енергії на ємності віртуальної ланки постійного струму що дає можливість знизити значення напруги у зазначеному контурі.

### 3.2. Графіки перехідних процесів у багаторівневному перетворювачі

Розглянемо перехідні процеси у структурі багаторівневого напівпровідникового перетворювача частоти який живить асинхронний електричний двигун.

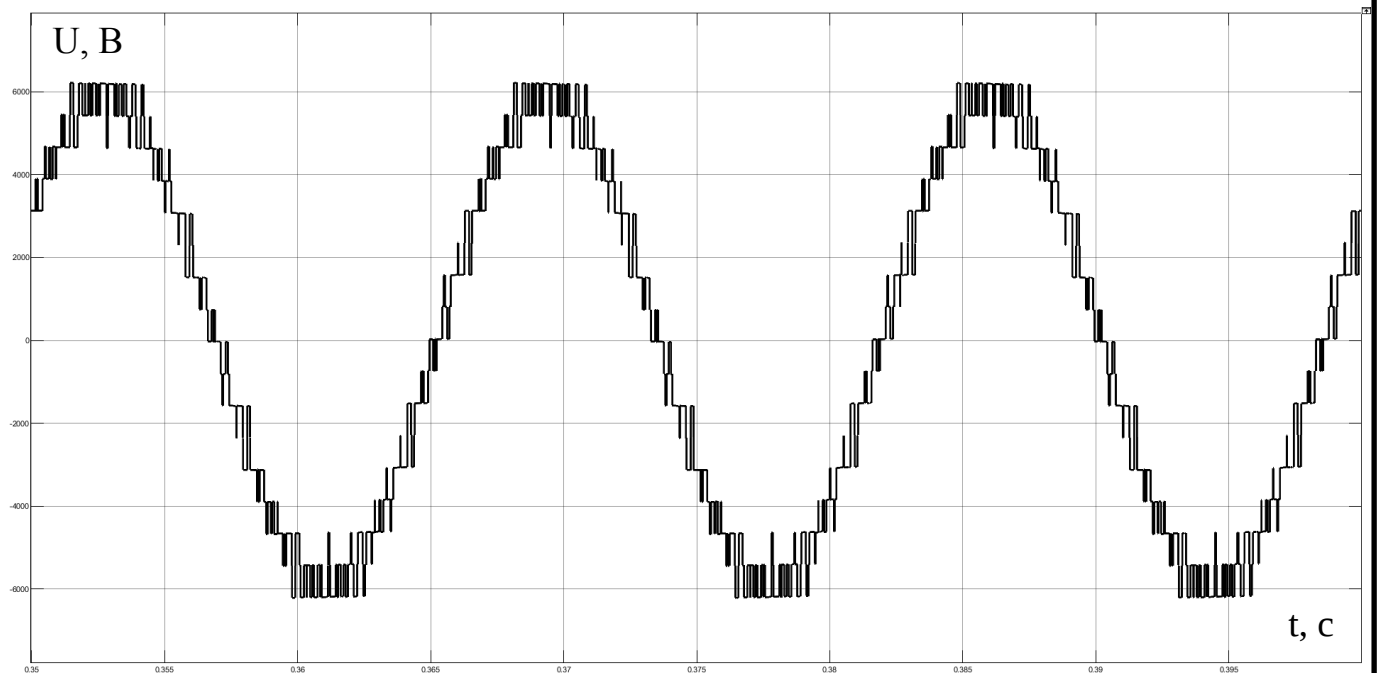


Рис. 3.2. Перехідні процеси у контурі вихідної напруги  
багаторівневого перетворювача

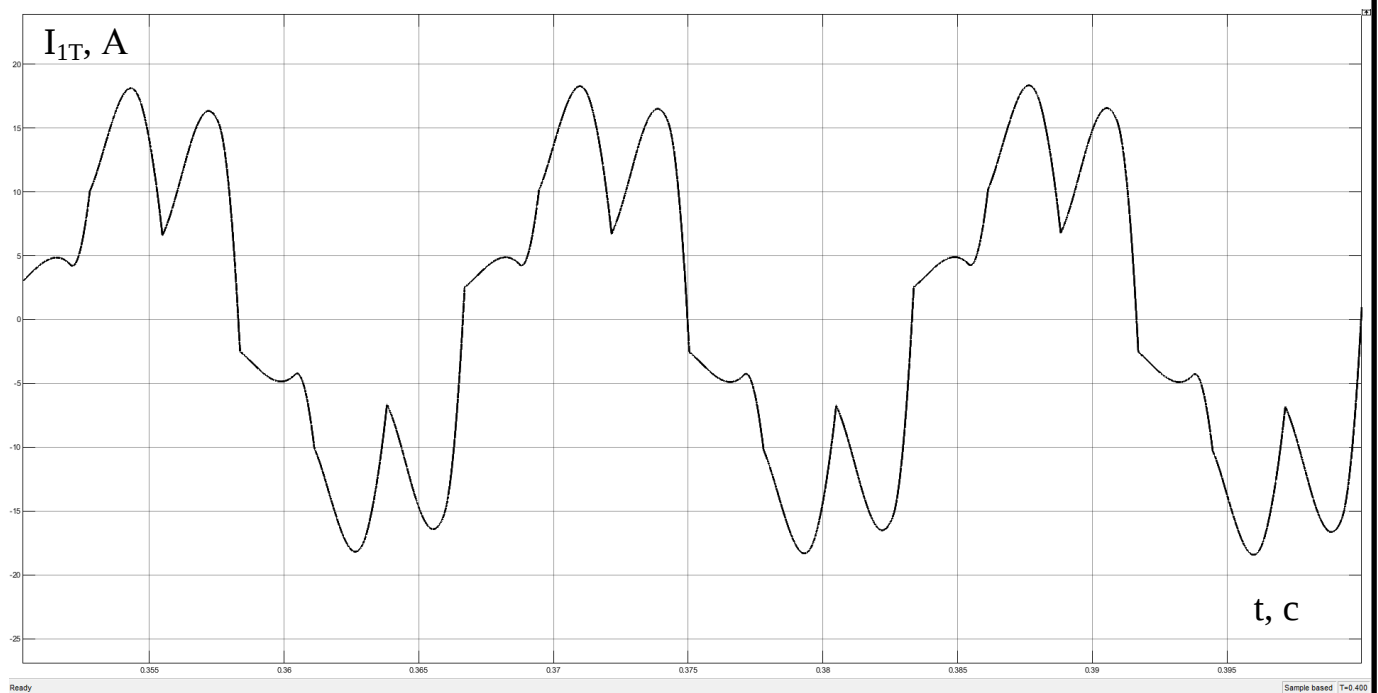


Рис. 3.3. Перехідні процеси у контурі струму багаторівневого перетворювача

## Висновки

У першому розділі було виконано порівняння структури перетворювача частоти у різній номенклатурній базі.

Також було визначено переваги різних схемних рішень структури перетворювача частоти та визначено недоліки таких структур.

Також були розглянуті принципи роботи перетворювача частоти для різних його типів.

У другому розділі була розроблена програма модельного дослідження багаторівневого перетворювача.

Також були визначені принципові відмінності зазначеної структури та її складових від інших типів перетворювачів.

Також було налаштовано параметри структурних складових модельного дослідження.

Модельні дослідження проводились для обраного асинхронного двигуна із заздалегідь підібраними параметрами та характеристиками.

У третьому розділі було досліджено перехідні процеси у структурі багаторівневого перетворювача.

Було отримано графіки перехідних процесів за струмом та напругою асинхронного двигуна.

Також були отримані графіки напруги живлення перетворювача частоти та проведено порівняльний аналіз з графіками напруги живлення асинхронної машини.

Завдяки порівняльному аналізу графіків напруги живлення перетворювача частоти та графіків напруги живлення асинхронної машини

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248-03 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 41   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

були зроблені висновки щодо впливу роботи перетворювача частоти на показники якості мережі живлення.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248-03 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 42   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |