

Міністерство освіти і науки України

Український державний університет науки і технологій

Комп'ютерні технології і системи  
(назва факультету)

Автоматики та телекомунікацій  
(повна назва кафедри)

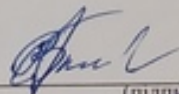
## Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи  
на здобуття освітнього ступеня (магістр)  
(ступінь вищої освіти)

на тему: Дослідження режимів роботи перетворювачів напруги для живлення асинхронного двигуна.

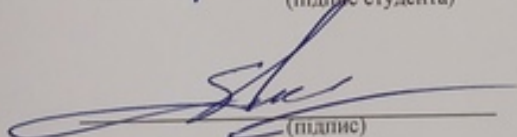
за освітньою програмою "Системи керування рухом поїздів"  
зі спеціальності: 273 "Залізничний транспорт"  
(шифр і назва спеціальності)

Виконав: студент групи: СК2221

  
(підпис студента)

Владислав Кожушко  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

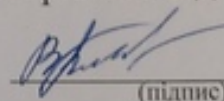
Керівник:

  
(підпис)

завідувач кафедри  
Володимир ГАВРИЛЮК  
(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

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

Студент

  
(підпис)

**Ministry of Education and Science of Ukraine**  
**Ukrainian State University of Science and Technologies**

‘Computer technologies and system’

(faculty)

‘Automatics and Telecommunications’

(department)

**Explanatory Note**  
**to qualification work**  
**for obtaining an educational degree (master's degree)**  
(higher education degree)

on the topic: Study of the modes of operation of voltage converters for powering an asynchronous motor.

according to educational curriculum\_\_Train traffic control systems

in the Speciality: 273 Railway transport

(speciality and its code )

Done by the student of the group: CK2221

/ Vladislav KOZHUSHKO

(name, surname)

Scientific Supervisor:

Head of Department

Volodymyr Havryliuk

(position, name, surname)

**Міністерство освіти і науки України**  
**Український державний університет науки і технологій**

Факультет: Комп'ютерних технологій і систем

Кафедра: Автоматики та телекомунікації

Рівень вищої освіти: Другий (магістерський)

Освітня програма: Системи керування рухом поїздів

Спеціальність: 273 Залізничний транспорт

(шифр та назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ Володимир Гаврилюк \_  
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Дата \_\_\_\_\_

**ЗАВДАННЯ**

на кваліфікаційну роботу

Бакалавра

(ступінь вищої освіти)

студенту Кожушко Владиславу Віталійовичу

(Прізвище, Ім'я По батькові)

1. Тема роботи: Дослідження режимів роботи перетворювачів напруги для живлення асинхронного двигуна

Керівник роботи: Гаврилюк Володимир Ілліч, д.ф.-м.н., професор

(Прізвище, Ім'я, По батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом від

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_ 202\_ р. № \_\_\_\_

2. Строк подання студентом роботи: 07.12.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: Схема інвертора; параметри асинхронного

двигуна

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

4.1 Аналітична частина: асинхронні двигуни. Регулювання частоти обертання двигуна. 4.2 Основна частина: регулювання частоти обертання асинхронних двигунів. 4.3 Дослідження роботи: дослідження режимів роботи перетворювачів напруги для живлення асинхронного двигуна з ШІМ на моделі.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Асинхронні двигуни	05.09.2023	
2	Регулювання частоти обертання асинхронних двигунів	04.10.2023	
3	Дослідження режимів роботи перетворювачів напруги для живлення асинхронного двигуна з ШІМ на моделі	19.11.2023	
4	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	18.01.2024	
5	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Експертної комісії	22.01.2024 - 28.01.2024	

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Владислав Кожушко

\_\_\_\_\_ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Володимир Гаврилюк

\_\_\_\_\_ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

## Реферат

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістр:

**Об'єкт розробки** – автономний інвертор напруги для живлення асинхронного двигуна.

**Мета роботи** – дослідити режими роботи автономного інвертора.

**Методи дослідження** – моделювання роботи автономного інвертора з трифазним асинхронним двигуном в пакеті Симулінк/Матлаб.

**Ключові слова:** ТРИФАЗНИЙ АВТОНОМНИЙ ІНВЕРТОР НАПРУГИ, МОДЕЛЮВАННЯ, РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ, ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНА МОДУЛЯЦІЯ.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. АСИНХРОННІ ДВИГУНИ. РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ДВИГУНА.....	7
1.1. Механічні характеристики асинхронних двигунів та принципи регулювання частоти обертання.....	7
1.2. Регулювання частоти обертання асинхронних двигунів .....	15
1.3. Параметри асинхронних двигунів для стрілочних електроприводів змінного струму.....	17
1.4. Висновки за розділом.....	21
2. РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ .....	22
2.1. Трифазний автономний інвертор напруги.....	22
2.2. Регулювання напруги інверторів.....	34
2.3. Метод широтно-імпульсної модуляції.....	35
2.4. Висновки за розділом.....	39
3. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ШІМ НА МОДЕЛІ.....	40
3.1. Характеристика Matlab-Simulink.....	40
3.2. Модель.....	43
3.3. Результати моделювання.....	47
3.4. Висновки за розділом.....	49
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	50
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	51

## ВСТУП

Основні положення щодо перетворювачів напруги для живлення АТ я розглянув у бакалаврській роботі. У цій роботі я розгляну застосування своїх досліджень для стрілочних ЕП змінного струму.

Основним елементом систем залізничної автоматики є стрілочне переведення. В даний час переважна більшість стрілок обладнано приводами з електродвигунами постійного струму. Суть модернізації полягає в тому, що пропонується некерований електропривод замінити на асинхронний електропривод з частотним керуванням та електродинамічний гальмування, а також застосувати захист асинхронного електродвигуна по струму. Застосування асинхронного електродвигуна замість двигуна постійного струму зменшує вартість переведення стрілок і збільшує його надійність. Використання частотного керування дає можливість прискорити початок процесу переведення стрілок і, внаслідок цього, зменшити час переведення. Електродинамічний гальмування двигуна в кінці процесу переключення дозволить зменшити силу удару дотепника об рейку, що відповідно зменшує механічне зношування стрілочного переключення і збільшує термін його служби. Захист асинхронного двигуна струмом дає можливість більш ефективно захистити обмотки від перевантажень, а також відмовитися від фрикціону, який зараз застосовується для цієї мети.

Використання мікропроцесора дозволяє керувати процесом переключення, що важливо, наприклад, у зимовий час, коли потрібно форсувати рух дотепника при рясному снігопаді. Спрощується і поточне обслуговування стрілки, тому що немає необхідності ручного налагодження механічної частини.

Використання засобів модернізації дало можливість:

- Підвищити надійність електроприводу;
- зменшити енерговитрати;
- зменшити час переведення стрілок;
- Збільшити термін служби стрілочного переключення.

# 1. АСИНХРОННІ ДВИГУНИ. РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ДВИГУНА

## 1.1. Механічні характеристики асинхронних двигунів та принципи регулювання частоти обертання

Основними характеристиками трифазного асинхронного двигуна є: механічна характеристика. Залежність  $M=f(S)$  отримало назву механічної характеристики двигуна.

В момент пуску двигуна, коли  $n_2=0$ , ковзання  $S=1$ , тоді:

$$M_{\ast} = \frac{m_1 p U_1^2 r_2'}{9,81 \cdot 2\pi f_1 [(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2]}$$

[1] Під дією моменту  $M_n$  ротор прийде до обертання. В подальшому ковзання зменшиться, а обертаючий момент збільшиться. При ковзанні  $S_{кр}$  він досягає максимального значення  $M_{max}$ . Величина критичного ковзання:

$$S_k = \frac{r_2'}{x_1 + x_2'}$$

Тоді підставимо його значення в формулу для  $M$ , отримаємо:

$$M_{max} = \frac{m_1 p U_1^2}{9,81 \cdot 4\pi f_1 [(r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}]}$$

Подальший розгін двигуна буде зі зменшенням ковзання і разом з тим зменшенням обертаючого моменту. Рівновага настане, коли величина обертаючого моменту буде протистояти гальмуючому моменту, викликаний напругою.

При номінальній нарузі буде номінальний обертаючий момент  $M_H$  і номінальне ковзання  $S_H$ . Відношення максимального моменту до номінального називається перевантажувальною здатністю двигуна.

$$K = \frac{M_{max}}{M_H}$$

У багатьох випадках вона складає величину від 1,7 до 2,5. Відношення пускового моменту до номінального називається-кратністю пускового моменту:

Ця величина може бути менше одиниці (наприклад 0,8) і більше (до 1,2). При зменшеній кратності двигуна потрібно вмикати в роботу без навантаження і лише після розгону подається навантаження. Двигун з кратністю  $K_{п.м.}>1$  можна ввімкнути в мережу з повним навантаженням.

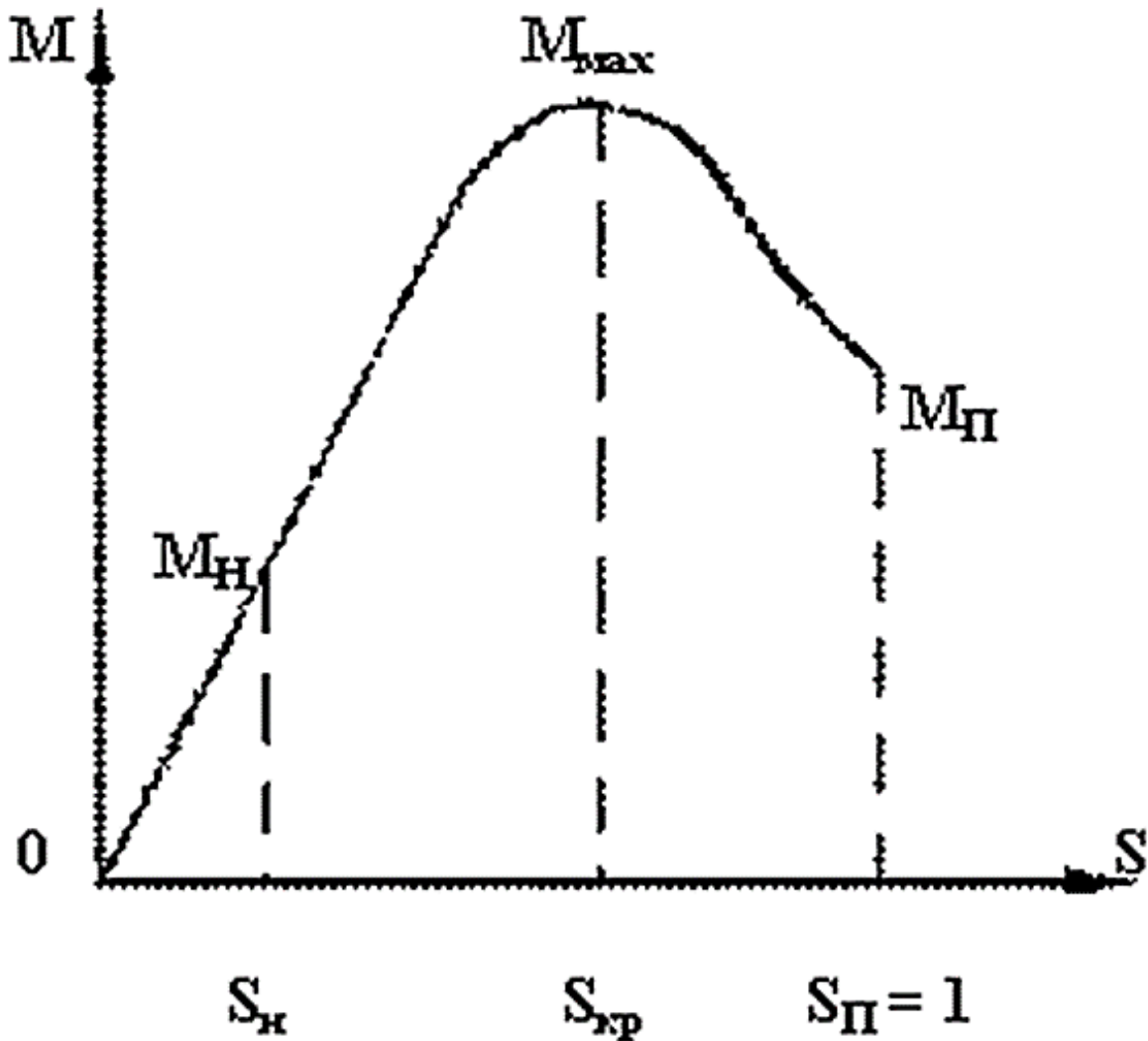


Рис.1.1. Механічна характеристика асинхронного двигуна

Регулювати частоту обертання Асинхронних двигунів можливо різними видами:

- Регулювання частоти обертання зміною частоти напруги живлення;

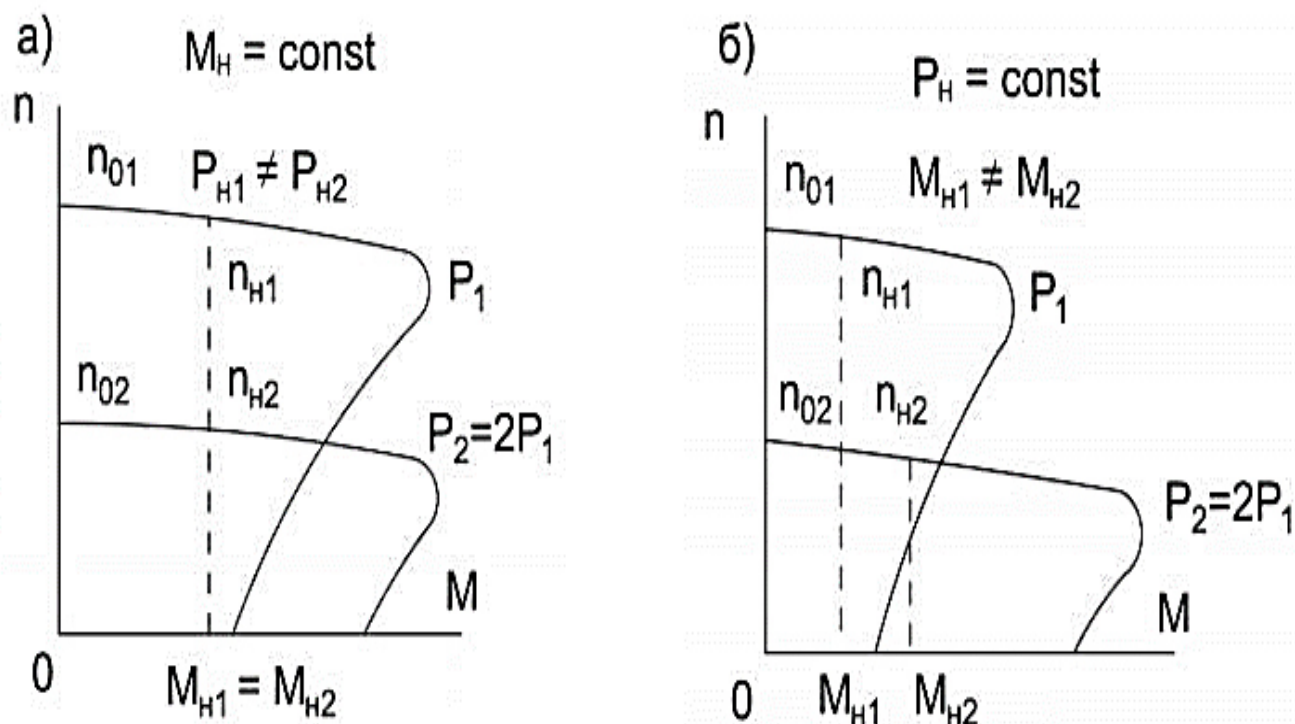
- Регулювання частоти обертання двигуна зміною числа пар полюсів;
- Частотне регулювання швидкості обертання АД;
- Регулювання частоти обертання двигуна шляхом зміни ковзання;
- Імпульсне регулювання швидкості асинхронних двигунів;
- Регулювання частоти обертання за допомогою дроселів насичення.

За рахунок механічних характеристик АД можна побачити, що вводячи додатковий опір у схему збудження, ви можете відрегулювати швидкість вгору від його номінального значення. Жорсткість механічних штучних характеристик незначно змінюється. Діапазон регулювання частоти обертання для тих, що регулюються таким чином двигунів від 1,5: 1 до 4: 1. Метод регулювання частоти обертання зміною частоти напруги живлення є одним із найпростіших і найдешевших, що визначає це широке застосування.

[2] Наступний спосіб регулює частоту обертання двигуна за рахунок зміни числа пар полюсів. Цей регулювання частоти є економніший, і включає в себе механічні характеристики, які мають більшу жорсткість. Перемикаючи обмотки статора на різні схеми з'єднання, вони дають різне число пар полюсів і за рахунок цього, можна ступінчасто змінювати частоту обертання двигуна. За рахунок цього, двигуни зі змінними пар полюсів, багатошвидкісні двигуни знаходять широке застосування у приводах, які не потребують плавного регулювання частоти обертання.

Перемикання числа пари полюсів досягаються зміною схеми з'єднання статорної обмотки. При виборі багатошвидкісного двигуна необхідно звертати увагу на зміни номінального моменту та номінальної потужності при переході від однієї швидкості обертання до іншої. Якщо розглядати в галузі промисловості та в свою чергу випускає дво-, три-, і чотиришвидкісні ЕД із короткозамкненим ротором.

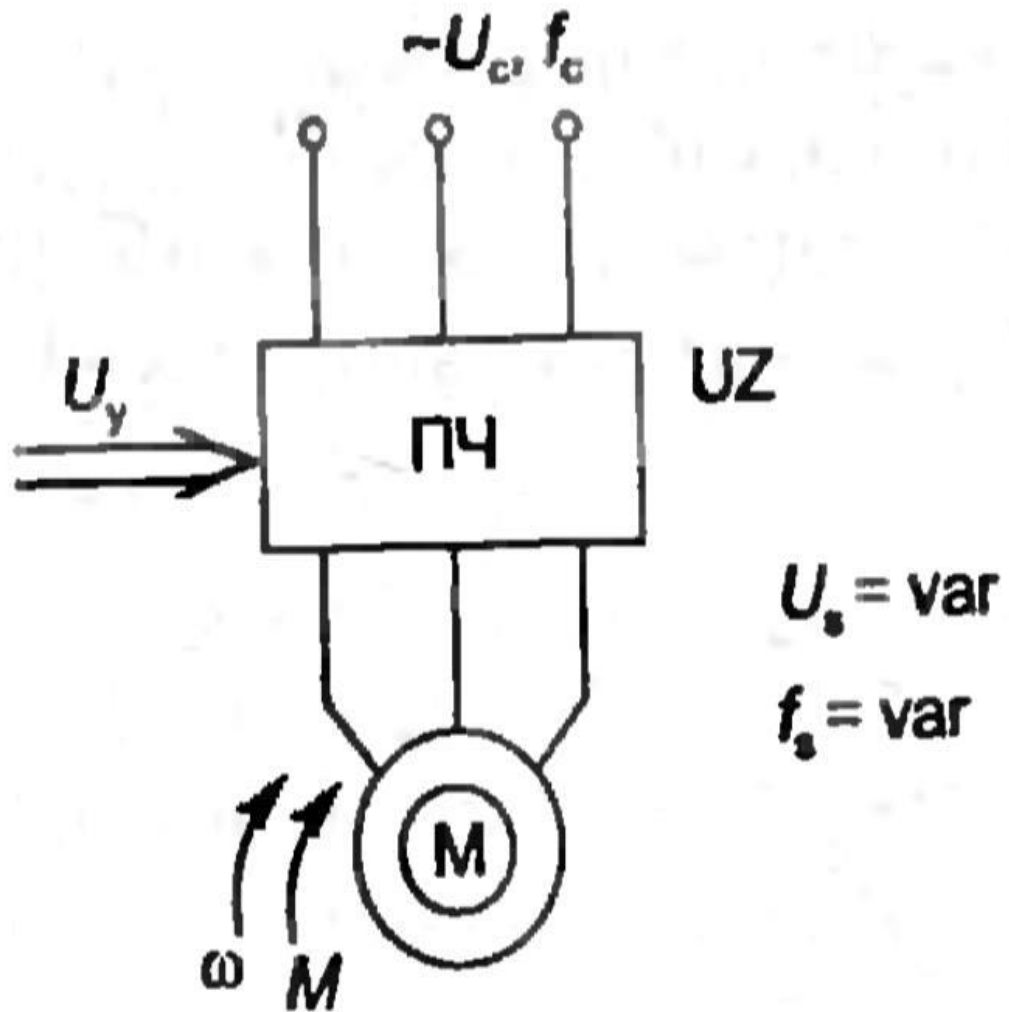
На даному малюнку представлені механічні характеристики двошвидкісних асинхронних двигунів.



**Рис. 1.2.** Механічні характеристики двошвидкісних трифазних двигунів

Суть частотного регулювання швидкості обертання АД полягає в тому що, регулювання синхронної швидкості відбувається за рахунок зміни частоти струму живлення статора АД. Економність частотного регулювання швидкості пояснюється тим, що при регулюванні частоти не відбувається збільшення ковзання, як наприклад при реостатному управлінні.

Схема електроприводу з частотним регулюванням швидкості приведена на рис.1.3. Головним елементом цієї схеми є перетворювач частоти ПЧ, здійснюється регулювання частоти і напруги по одному із законів. Вони розрізняються типами ЧП, способами формування напруги і видами зворотніх зв'язків. Для отримання досконалих характеристик частотного електроприводу застосовуються замкнуті системи.



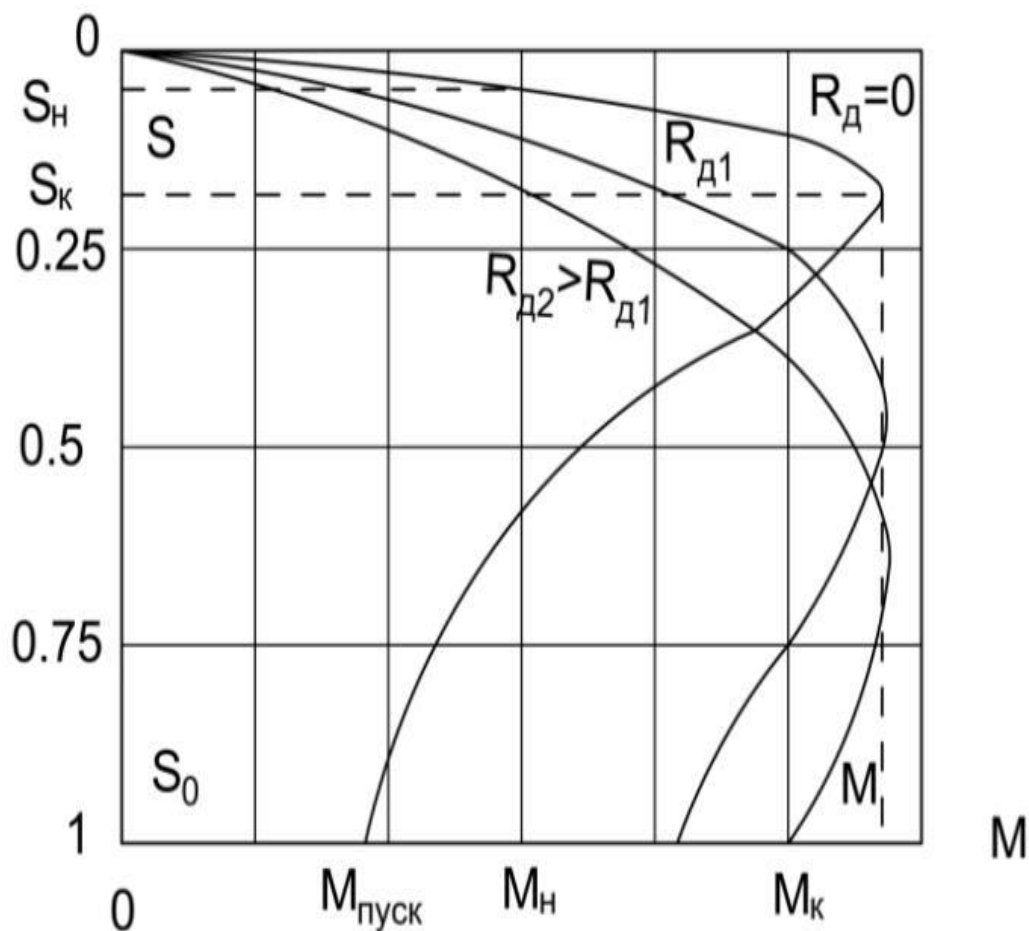
**Рис. 1.3.** Збільшена схема електроприводу з частотним управлінням

Цей метод являє собою є найбільш економічний і тому розглядається як основний і найбільше бажаний спосіб.

Найбільш просто реалізувати регулювання частоти обертання шляхом зміни ковзання можна вводом додаткового резистора в коло ротора. У результаті цього змінюється ковзання двигуна, а значить і його частота обертання. Величина максимального моменту  $M_k$  залишиться постійною, а величина відповідно його ковзання і нахил характеристик змінюється. Частоту обертання можна регулювати

тільки вниз від номінальної частоти обертання з діапазоном (2-3):1. Плавність регулювання частоти залежить від числа ступеней вмикаючого резистора.

Регулюючи частоту обертання таким чином, слідує мати на увазі, що при потужності двигуна, зменшуючого пропорційно частоті обертання, він працює в течії на відрізках часу не більше 0,5(час.) з інтервалами х.х., перевищуючими тривалість робочого періоду в 3-4 рази. Тривала робота двигуна на зниженій частоті допустима тільки при відповідному зниженні моменту обертання.

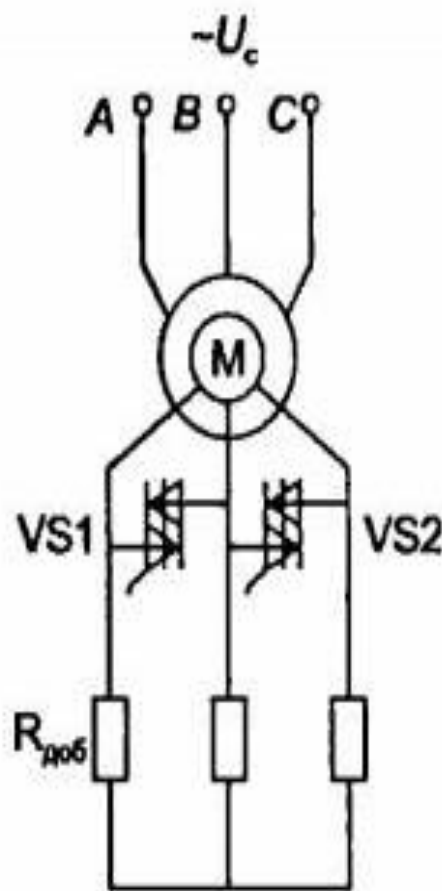


**Рис. 1.4.** Механічні характеристики асинхронного двигуна з фазним ротором

До недоліків даного методу можна віднести збільшені втрати енергії і зниження жорсткості механічної характеристики

Принцип імпульсного регулювання швидкості обертання АД полягає в дискретній зміні параметрів АД або в живлячій мережі, при якому виникають періодичні коливання моменту АД. Цей спосіб став можливий завдяки удосконаленню характеристик силових напівпровідникових приладів, головним чином тиристорів. Імпульсне регулювання використовують в електроприводах з асинхронним двигуном с фазним ротором при регулюванні в колі ротора.

Розглянемо схему-(імпульсного регулятора швидкості АД на симисторах в колі ротора).



**Рис. 1.5.** Схема імпульсного регулятора швидкості АД на симисторах в колі ротора

Ця схема характеризується тим, що частота комутацій ключів не може переважати частоту струму в роторі, за рахунок низької частоти струму в роторі особливо поблизу номінальних значень параметрів, таке управління приводить до великих пульсацій моменту.

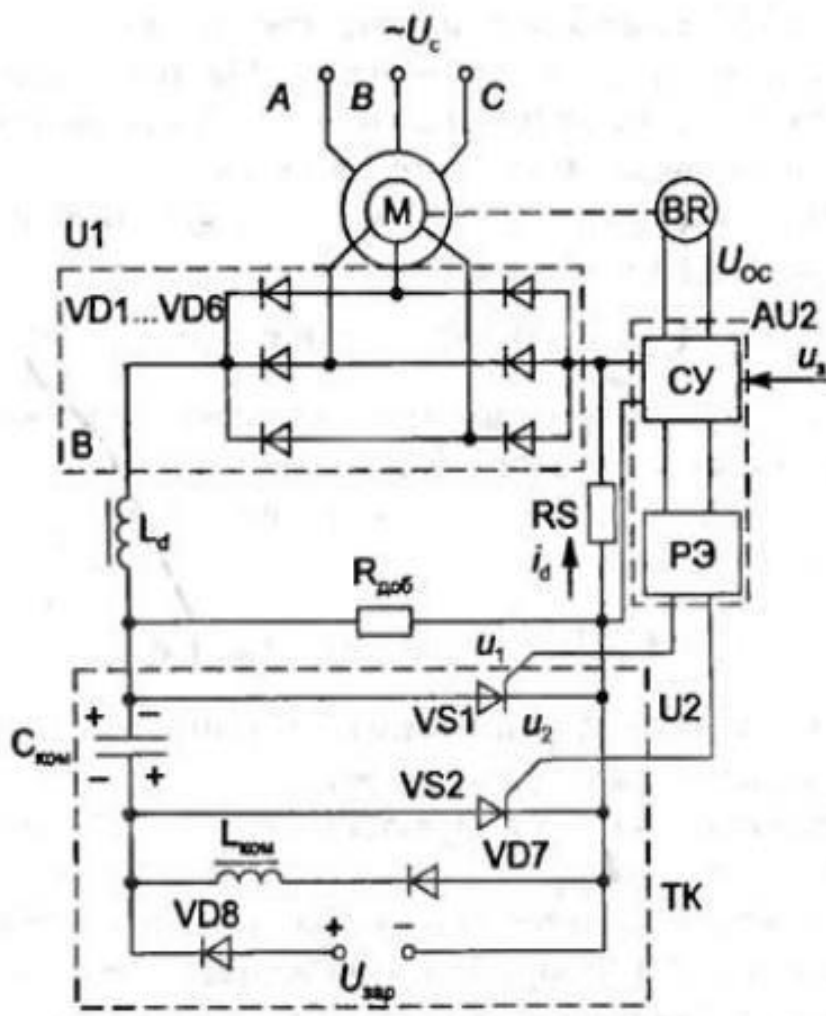


Рис. 1.6. Схема імпульсного регулювання в колі ротора АД

Для підвищення жорсткості механічних характеристик і збільшення діапазона регулювання застосовується замкнута система в якій управління теристорами VS1 і VS2 здійснюється в функції випрямляючого струму ротора і швидкості обертання АД.

Останній спосіб регулювання частоти ми виконуємо за допомогою дроселів насичення, в якому основним елементом управління є дросель насичення. На сердечнику дроселя є обмотка постійного струму, вмикаюча в коло управління. Друга обмотка змінного струму знаходиться в силовому колі, подаючи до обмотки статора двигуна. Внаслідок цього змінюється напруга, прямує до статора двигуна. Потужність, споживана в колі управління постійного струму, незначна, порядку декількох процентів від потужності силового кола.

Дросельне регулювання має багато переваг при управлінні кранами. Ця система управління забезпечує: широкий діапазон регулювання частоти обертання, плавність зміни частоти обертання при спуску вантажу і гальмуванні. Вона обмежує величину піднімаючого вантажу і дозволяє управління міцними силовим агрегатом виконувати шляхом зміни невеликого по величині струму у колі намагнічування дроселя.

Недоліками цього методу управління є зменшення максимального обертаючого моменту двигуна при зниженні напруги в колі статора, так як у асинхронних двигунів момент пропорційний квадрату напруги.

## 1.2. Регулювання частоти обертання асинхронних двигунів

Основне рівняння частоти обертання асинхронного двигуна має наступний вигляд:

$$n = \frac{60f}{p} (1 - S)$$

З цього рівняння виходить, що швидкість обертання можна відрегулювати шляхом:

- зміни ковзання;
- зміни кількості пар полюсів статора намотування  $P$ ;
- зміни частоти напруги живлення  $f$ .

Метод регуляції частоти обертання доступний тільки для двигунів с фазовим ротором. Зміна ковзання s досягається шляхом введення регулювальної опору в ланцюг ротора, дані схеми часто використовуються на підйомних кранах. На рис.1.7. представлена схема зміни напрямку обертання валу двигуна.

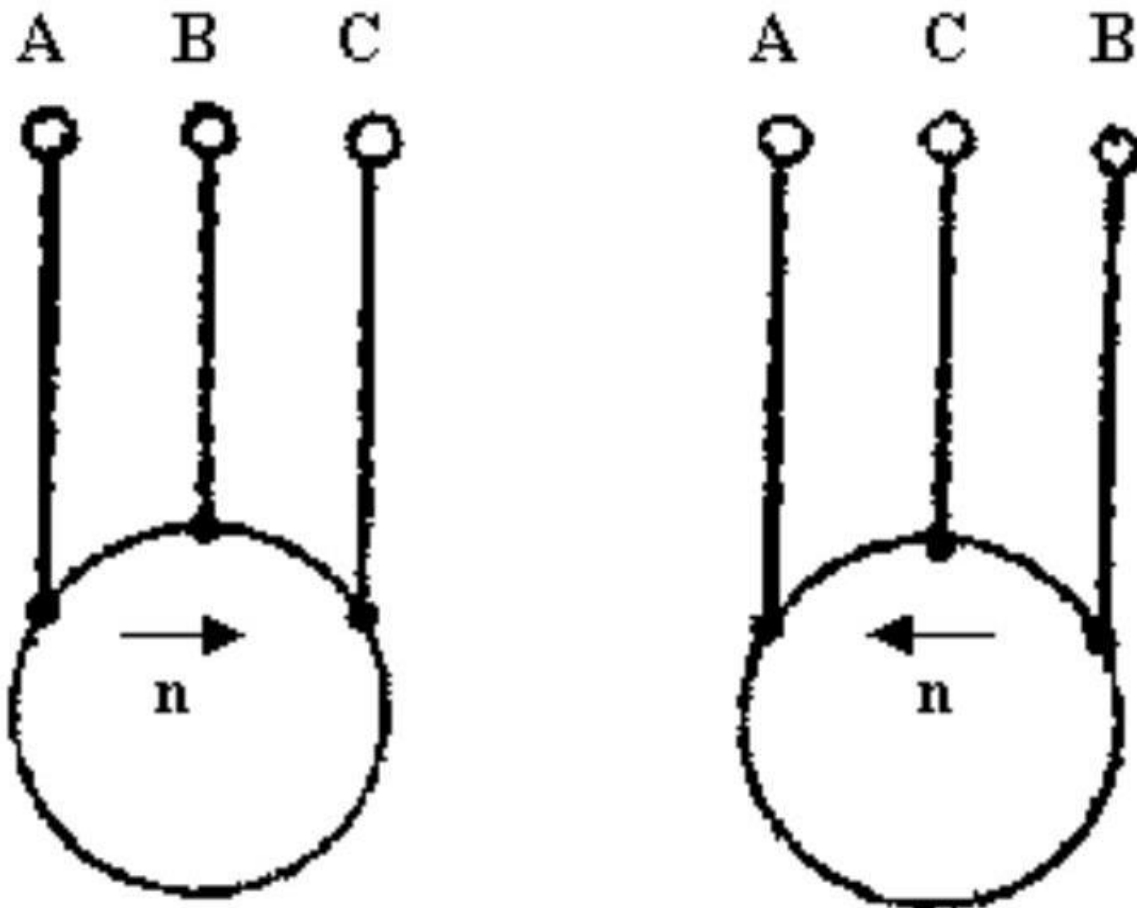


Рис. 1.7. Реверсування двигуна

За категорією регулювання обертання валу двигуна відноситься так зване реверсування це – зміна напрямку обертання на протилежне, він здійснюється шляхом зміни порядку чергування фаз обмотки статора.

Розглянемо рівняння швидкісної характеристики електродвигунів:

$$n=U/\alpha R_{\Sigma}/k\Phi$$

З цієї формули виходить, що частоту обертання можна регулювати такими методами як:

- зміна величини підведеного до двигуна напруги за рахунок застосування спеціальних схем включення;
- зміна опору кола якоря за допомогою резистора;
- зміною магнітного потоку збудження  $\Phi$  за допомогою резистора в колі збудження.

### **1.3. Параметри асинхронних двигунів для стрілочних електроприводів змінного струму**

Розглянемо регулювання швидкості АД на прикладі двигунів змінного струму, що використовуються у стрілочних електричних приводах змінного струму. Параметри деяких двигунів наведено в цьому розділі.

Електродвигун стрілочний трифазного змінного струму типу МСТ – 0,25 призначений для встановлення в електроприводах для переведення стрілок. Електродвигун змінного струму типу МСТ – 0,25 є трифазним асинхронним електродвигуном із короткозамкненим ротором; режим роботи повторно – короткочасний. Горизонтальний вал обертається в підшипниках кочення №202 (ГОСТ 8338 – 75), на які наносять мастило ЦИАТИМ 201. Обмотки статора можуть включатися зіркою (220В) або трикутником (127В) шляхом перестановки перемичок на контактних болтах клемної діжки. Електричні та механічні характеристики електродвигуна типу МСТ – 0,25 наступні:

Корисна потужність,  $200 \pm 10$  Вт.

Напруга живлення при з'єднанні обмоток зіркою 220В; споживаний струм при з'єднанні обмоток зіркою 1,4А; напруга живлення при з'єднанні трикутником обмоток 127В; споживаний струм при з'єднанні трикутником обмоток 2,4А; частота обертання ротора  $1250 \pm 50$  об/хв.

Кратність пускового струму 2,7.

Обертаючий момент на валу 1,57 (16) Н/м (кгс/см). Зазор між статором та ротором 0,6 – 0,72 мм. Поздовжній люфт ротора 0,4 - 1,0 мм.

### **Обмотувальні дані:**

Опір обмотки статора (однієї фази) постійному струму при температурі +20°C 11,3 Ом. Діаметр дроту марки ПЕЛБО (ПЕВ – 2) 0,55 мм. Число витків в одній секції 53. Число всіх секцій 24. В один паз укладається по дві секції, тобто 106 витків вивідні кінці виконують дротом ПРГ500 перетином 1 мм<sup>2</sup>.

Ізоляція обмоток статора щодо корпусу електродвигуна повинна витримувати протягом 1 хв без пробою та перекриття при температурі  $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$  відносної вологості до 90% випробувальна напруга 1500В частотою 50 Гц при потужності джерела не менше 0,5 кВА. Опір ізоляції обмоток статора щодо корпусу електродвигуна при температурі навколишнього повітря  $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$  відносної вологості 75% має бути не менше 50 МОм. Умови експлуатації електродвигуна МСТ – 0,25 такі самі, як і для електродвигунів МСП – 0,1. Габаритні розміри електродвигуна 322-250-170 мм; маса трохи більше 17 кг.

Електродвигуни стрілочні трифазні змінного струму типів МСТ – 0,3 та МСТ – 0,6. Асинхронні трифазні електродвигуни типу МСТ-0,3 встановлюються в електроприводах для переводу вістряків важких та звичайних стрілок електричної централізації; типу МСТ-0,6 – для перекладу дотепників стрілок у маневрових районах. Призначений ресурс електродвигунів –  $5 \times 10^5$  переводів стрілок. Електричні та механічні характеристики електродвигунів МСТ – 0,3 та МСТ – 0,6 наведені в табл. 1.



**Таблиця 1.** Характеристики електродвигунів типів МСТ – 0,3 та МСТ – 0,6

<b>Характеристика</b>	<b>МСТ – 0,3</b>	<b>МСТ – 0,3А</b>	<b>МСТ – 0,6</b>	<b>МСТ – 0,6А</b>
<b><i>Напруга живлення, Ст.</i></b>	190/110 (+30%, – 5%)	330/190 (+30%, – 5%)	190/110 (+30%, – 5%)	330/190 (+30%, – 5%)
<b><i>Потужність, Вт.</i></b>	300	300	600	600
<b><i>Споживаний струм*, А, не більше.</i></b>	2,1/3,6	1,2/2,1	2,8/4,85	2,00/3,46
<b><i>Частота обертання, об/хв</i></b>	850 ±5%	850 ±5%	2850 ±10%	2850 ±10%

<b>Обертальний момент, Н/м, (кг/м).</b>	3,43 (0,35)	3,43 (0,35)	2,37 (0,24)	2,37 (0,24)
<b>Частота, Гц.</b>	50	50	50	50
<b>к. п. д.%, не менше.</b>	66	66	69	69
<b>cosφ.</b>	0,72	0,72	0,84	0,84
<b>Діаметр дроту ПЕВ – 2 обмотки статора, мм.</b>	0,69	0,51	0,93	0,69
<b>Число провідників у пазу.</b>	58	100	42	72
<b>Число провідників фази.</b>	348	600	168	288

У чисельнику вказаний струм при з'єднанні обмоток зіркою, у знаменнику – при з'єднанні обмоток трикутником. Електричні ланцюги, ізольовані один від одного та від корпусу повинні витримувати без пробую та перекриття випробувальну напругу 1800В частотою 50 Гц. Опір ізоляції електрично ізольованих ділянок монтажу щодо корпусу та між собою має бути: не менше 100 МОм – у практично холодному стані; не менше 5 МОм – при підвищеній вологості. Габаритні розміри 320×244×182 мм, приєднувальні та настановні розміри ті самі, що й у раніше описаних електродвигунів МСП – 0,25. Маса електродвигунів типу МСТ – 0,3 трохи більше 18 кг, МСТ – 0,6 – трохи більше 19 кг.

#### **1.4. Висновки за розділом**

За даним розділом ми визначили, що регулювання частоти обертання асинхронних двигунів, може відбуватися за різних способів. Регулювання частоти обертання асинхронних двигунів являє собою найбільш економічним, тому він вважається головним і найбажанішим методом. Суть полягає у регулюванні синхронної швидкості, змінюючи частоту джерела живлення статора асинхронного двигуна. Регуляція частоти швидкості ефективна тим що, при регулюванні частоти не відбувається збільшення ковзання. В сучасних приводах крокових електродвигунів з задачею управління успішно справляються мікроконтролери різних само-технічних виконань.

## **2. РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ**

### **2.1. Трифазний автономний інвертор напруги**

У сучасних стрілочних приводах, які застосовуються на залізничних станціях, використовуються трифазні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором. На ротор впливає магнітне поле, що обертається, яке створюється шляхом подачі на обмотки статора трифазної змінної напруги. Важлива властивість цієї електричної машини з точки зору безпечного керування - неможливість обертання ротора під впливом постійного струму. Це визначає особливий інтерес до використання перетворювальних схем, що формують трифазну напругу, як засіб управління даним виконавчим об'єктом. При цьому слід визначити оптимальний режим роботи силових ключів, що забезпечує ефективне використання інвертора як пристрій управління приводами залізничних стрілок. Крім того, необхідно сформулювати вимоги до реалізації електроживлення даного пристрою управління та розробити технічні рішення для безпечного узгодження інвертора з обчислювальними засобами, що управляють.

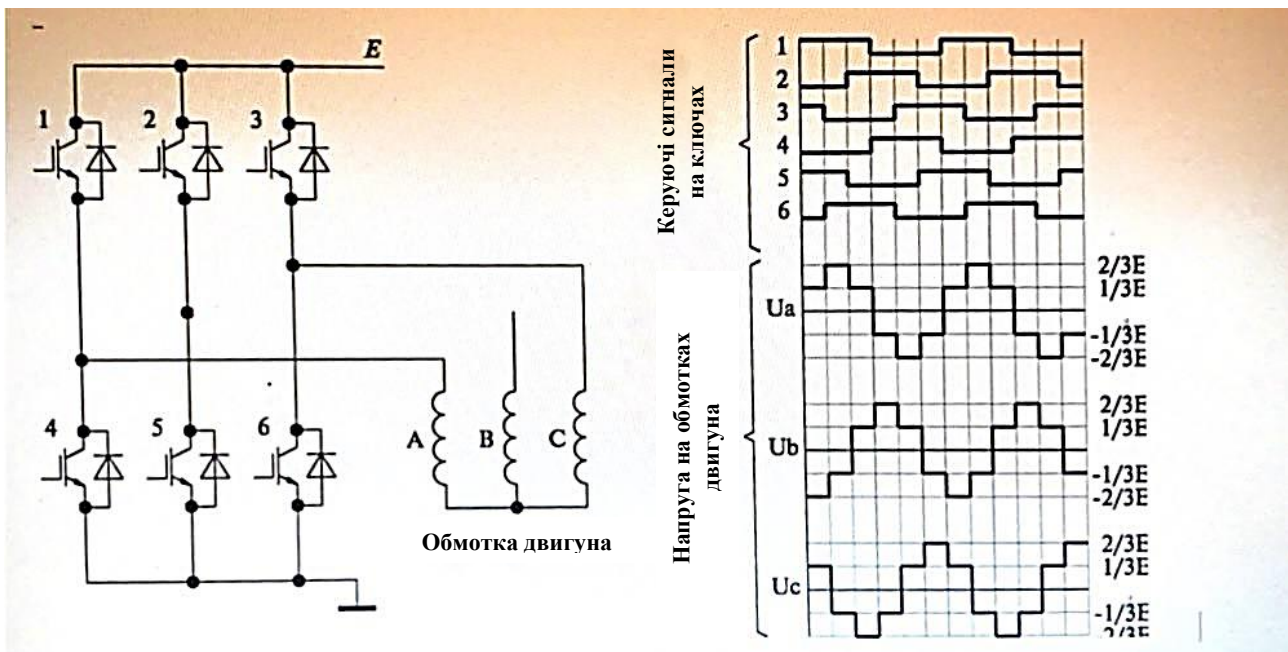
Як перетворювальну схему, що дозволяє створювати трифазну напругу для двигунів, зазвичай розглядається мостовий інвертор напруги. Одна з сфер застосування трифазних інверторів – системи електроживлення. У цьому випадку інвертори використовуються для отримання трифазної напруги за наявності первинного джерела постійної напруги. Якщо йдеться про стрілочний привод, завдання зміни частоти обертання двигуна не ставиться. Величина втрат в обмотках немає визначального значення з короткочасного режиму роботи приводів і теплової інерції двигунів.

Необхідно розуміти, що значна довжина кабельних ліній, що з'єднують двигуни приводів із перетворювальними пристроями, суттєво загострює проблеми, пов'язані з високочастотною комутацією ланцюгів. Відзначається можливість небезпечного та заважає впливу на ланцюги інших пристроїв, що особливо актуально для систем залізничної автоматики. Варто згадати і відомі недоліки ЧРП,

які виявляються при віддаленому розміщенні керованих двигунів. По-перше, виникають значні струми витоку через ємність кабельної лінії, що створює додаткове навантаження на перетворювальну схемотехніку. По-друге, висока швидкість перемикання комутаційних елементів перетворювача у поєднанні з великою довжиною кабелю сприяє виникненню імпульсних перенапруг на обмотках двигунів і в кінцевому підсумку призводить до передчасного зношування ізоляції обмотувального дроту.

Зазначені проблеми можна вирішувати шляхом встановлення електричних фільтрів, що забезпечують придушення високочастотних гармонік на виході перетворювачів. Однак застосування схем фільтрації не можна розглядати як раціональне рішення при створенні мікропроцесорних систем централізації, що реалізують керування значною кількістю стрілочних приводів, оскільки використання електричних фільтрів помітно збільшує габарити та вартість апаратури.

Оптимальним варіантом для безпечного управління стрілочними приводами змінного струму слід вважати використання трифазних мостових схем перетворення з низькочастотною комутацією. Низька частота перемикання забезпечує зменшення динамічних втрат силових ключах. Це дозволяє серйозно скоротити розміри радіаторів, що реалізують відведення тепла від напівпровідникових компонентів, що сприяє помітному покращенню масогабаритних показників апаратури. Схемне рішення трифазного інвертора, реалізоване на основі сучасної елементної бази, а також часова діаграма, що пояснює роботу трифазного перетворювача при низькочастотному керуванні ключами, показано на рисунку 2.1.



**Рис. 2.1.** Схема трифазного мостового інвертора для керування двигуном стрілочного приводу та часова діаграма роботи.

Форма напруги на обмотках двигуна залежить від схеми з'єднання обмоток та алгоритму керування силовими ключами. При з'єднанні обмоток за схемою «зірка» і рівною тривалістю відкритого та закритого стану кожного ключа на обмотках двигуна формується ступінчасто-прямокутна напруга, що характеризується відносно невеликим коефіцієнтом гармонік, приблизно рівним 14 %.

Величина постійної напруги, що подається на перетворювальну схему, повинна бути такою, щоб момент двигуна, що крутить, був еквівалентний моменту, що існує при роботі на синусоїдальних напругах. При визначенні параметрів джерела живлення перетворювальної схеми за основу можна прийняти відоме положення: крутний момент асинхронного двигуна при роботі на несинусоїдальних напругах є сумою моментів, що крутять, створюваних окремо кожною гармонікою. Якщо не враховувати падіння напруги на відкритих ключах, розкладання ступінчастої напруги, що формується на обмотках двигуна, в ряд Фур'є дає наступний вираз для миттєвого значення напруги:

$$u(t) = \frac{2}{3}E \sin \omega t + E \sin k\omega t, \quad (1)$$

де  $E$  – величина постійної напруги на шині живлення інвертора,  $K$  – порядковий номер гармоніки напруження. Перший доданок у цьому виразі визначає величину основної гармоніки. Третя гармоніка у ступінчастій напрузі відсутня. Для форми напруги, що розглядається, номер гармоніки може приймати тільки непарні і не кратні трьом значення. Обертальні моменти, створювані вищими гармоніками, мають різні напрями. Гармоніки з порядковим номером  $6l + 1$  ( $l = 1, 2, 3$ ) створюють крутний момент, що збігається у напрямку з моментом, що створюється основною гармонікою. Гармоніки з порядковим номером  $6l - 1$  створюють крутний момент протилежного напрямку. З формули (1) видно, що амплітуда напруги зменшується зі зростанням номера гармоніки. Крутний момент асинхронного двигуна пропорційний квадрату напруги на обмотках статора. Якщо врахувати квадратичну залежність моменту від напруги, а також те, що моменти, створювані вищими гармоніками, через свою різноспрямованість частково компенсують один одного, можна з достатньою для практики точністю вважати результуючий момент асинхронної машини рівним моменту, що створюється основною гармонікою напруги. Враховуючи вираз (1) діюче значення напруги основної гармоніки можна визначити так:

$$U = \frac{\sqrt{2}E}{\pi}. \quad (2)$$

Враховуючи (2), при заданому значенні діючої напруги основної гармоніки постійна напруга повинна мати величину:

$$E = \frac{U\pi}{\sqrt{2}}. \quad (3)$$

За допомогою формули (3) можна визначити величину постійної напруги на вході інвертора, що забезпечує момент, що крутить, аналогічний тому, який відбувається при експлуатації стрілочних приводів в релейних системах електричної централізації. Номінальне значення лінійної напруги в робочому ланцюзі стрілочних приводів прийнято рівним 220 В. Фазна напруга буде 127 В. Якщо знехтувати падінням напруги на відкритих ключах перетворювальної схеми, то,

згідно формули (3), змінну напругу 127 В можна отримати при величині постійної напруги 282 В. Типове значення напруги на відкритому силовому ключі в сучасних перетворювальних схемах має величину близько 1,5 В. Струм двигуна протікає через два відкриті транзистори. Тому, враховуючи втрати на ключах, необхідну величину постійної напруги доцільно прийняти рівною 285 В. Для керування віддаленими стрілками існуючі пристрої електроживлення формують напругу, що на 5 % перевищує номінальне значення. З огляду на це при значному видаленні об'єктів постійна напруга на вході інвертора повинна мати величину близько 300 В.

У разі використання трифазних інверторів як УСО у залізничних системах автоматики така тенденція потребує критичної оцінки. Пов'язано це з іншою «системою цінностей» у цій галузі, і навіть із необхідністю централізованого управління об'єктами, віддаленими на велику відстань.

Елементна база трифазного мостового інвертора та принципи безпечного керування ключами.

У сучасній перетворювальній техніці для потужностей близько кількох кіловат як напівпровідникові ключі успішно використовуються польові транзистори з ізолюваним затвором (MOSFET) або біполярні транзистори з ізолюваним затвором (IGBT). Основною перевагою різних типів транзисторів з ізолюваним затвором стає мінімальне споживання потужності від джерела керуючих сигналів, що дозволяє використовувати для управління ключами відносно нескладні схемні рішення, що реалізуються в мікроелектронному виконанні. Розробляючи перетворювачі для електричних приводів, що працюють при напругах від 200 В, краще використовувати IGBT. Ці транзистори поєднують у собі позитивні якості польових і біполярних приладів і за величинах робочої напруги близько кількох сотень вольт мають меншу, ніж в MOSFET, величину статичних втрат. Діоди, включені паралельно транзисторам, використовуються для рекуперації енергії, що накопичується в індуктивності навантаження. Зазначені діоди, як правило,

входять до складу сучасних IGBT, розроблених для використання у схемах керування двигунами.

Особливість IGBT (порівняно з раніше застосовуваними напівпровідниковими ключами) – висока швидкодія. Час увімкнення та вимкнення сучасних приладів скорочено до сотень нано-секунд. Це позитивний момент в умовах високо-частотної роботи ключів. У контексті низькочастотної комутації за наявності протяжних кабельних ліній дана властивість ключа буде швидше недоліком, ніж перевагою, оскільки посилює негативні ефекти, пов'язані з великою швидкістю зміни напруги на виході перетворювальної схеми.

Існують різні можливості штучного обмеження швидкості зміни напруги під час використання швидкодіючих силових ключів. Стосовно силових ключів із ізольованим затвором найменш витратним і досить ефективним способом обмеження швидкості зміни напруг можна вважати збільшення опору ланцюга затворів транзисторів. У типових схемних рішеннях, що працюють на високій частоті, опір резисторів, що включаються в ланцюг затворів, зазвичай має величину, що не перевищує 100 Ом. У перетворювачах, що працюють на низьких частотах, величина цього опору може бути збільшена. Результати експериментальних досліджень показують, що оптимальна величина опору резисторів у ланцюгах затворів IGBT при роботі на частоті 50 Гц має величину порядку одиниць кОм. Подальше збільшення опору до десятків ком і більше призводить до помітного погіршення енергетичної ефективності перетворювальної схеми, оскільки динамічні втрати на ключах зростають до значень, порівнянних із величинами втрат провідності.

Керуючі сигнали для силових ключів трифазного мостового перетворювача можуть генеруватися обчислювальними засобами мікропроцесорної системи автоматки. Однак у ході практичної реалізації апаратури сполучення переважним варіантом виявляється використання окремих генераторів сигналів керуючих (ГУС) у складі УСО. Пояснюється це прагненням більш ефективного використання обчислювальних ресурсів системи, і навіть необхідністю виключення

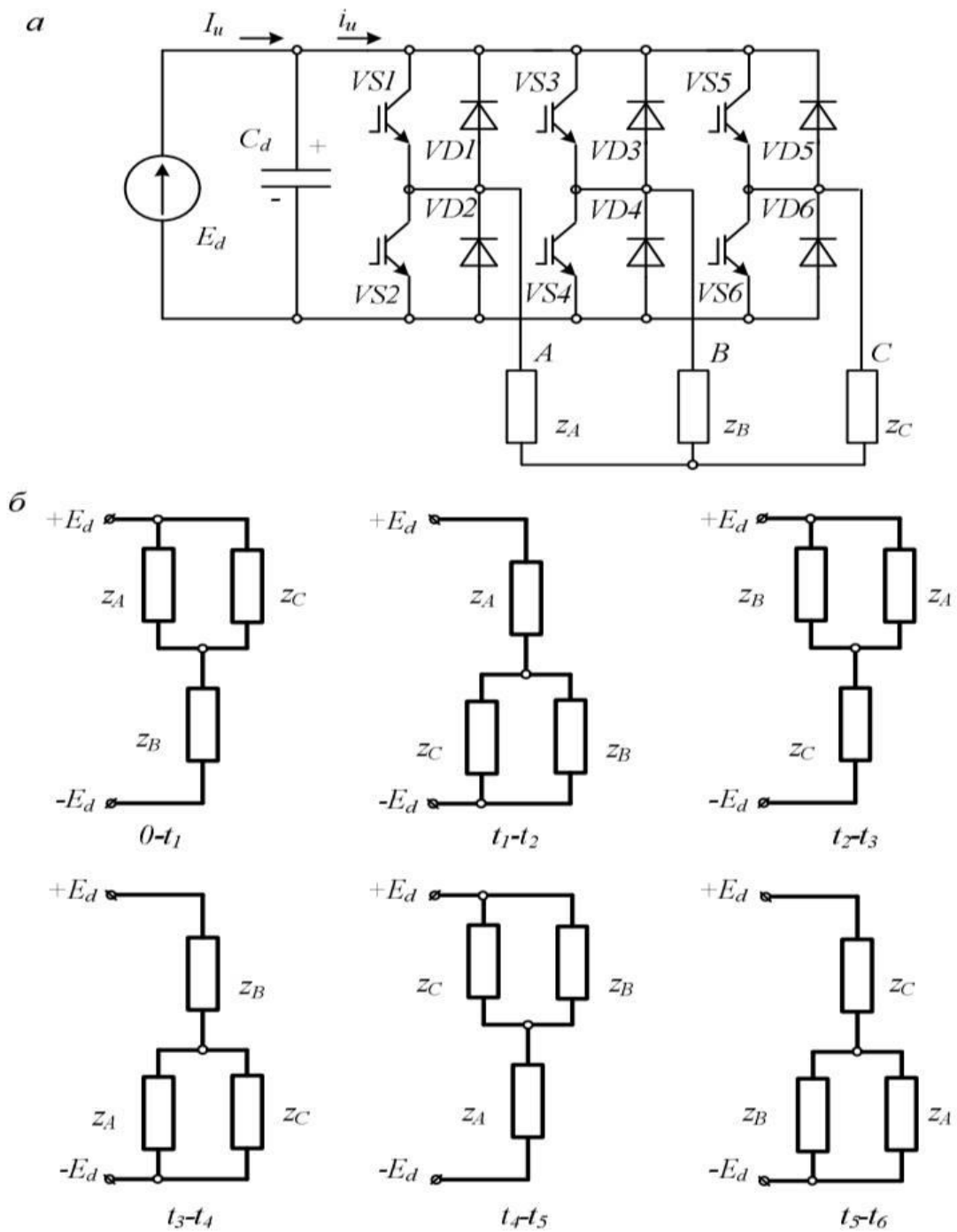
ушкодження силових компонентів у разі збоїв у роботі управляючого обчислювального комплексу. Раніше для побудови таких генераторів застосовувалися транзисторні та мікроелектронні схеми з «жорсткою логікою». Сьогодні в основному використовується програмована елементна база (мікроконтролери), що дозволяє значно спростити схемні рішення, реалізувати більш досконалі алгоритми роботи та забезпечити легке переналаштування часових параметрів сигналів керування без зміни апаратних засобів. Безпосереднє керування силовими ключами реалізується за допомогою драйверів, які являють собою мікросхеми, що забезпечують формування керуючих імпульсів з необхідними параметрами та захист силових напівпровідникових ключів в аварійних режимах.

У цьому прикладі безпечне управління реалізується шляхом формування живлення ГУС за допомогою ФП малої потужності, що реалізують логічну обробку динамічних сигналів від обчислювального комплексу, що управляє.

До трифазного *АІН* входять транзистори  $VS1 - VS6$  і включені паралельно їм зворотні діоди  $VD1-VD4$ . Навантаження  $zA - zC$  підключена до загальної точки з'єднання транзисторів  $VS1, VS3, VS5$  анодної та  $VS2, VS4, VS6$  катодної груп інвертора. Паралельно до джерела напруги  $E_d$  включений конденсатор  $C_d$  великої ємності, через який протікають вищі гармоніки вхідного струму. В результаті роботи інвертора на його виході формується трифазна симетрична систем напруг  $U_a, U_b$  і  $U_c$  навантаження.

Імпульси управління транзисторами анодної та катодної груп зміщені відносно один одного на третину періоду  $T$  роботи інвертора, при цьому керування транзисторами однієї фази зводиться до поперемінного включення транзисторів анодної та катодної групи фази інвертора.

На рис. 2.2 ми розглянемо схему трифазного інвертора напруги та схему заміщення.



**Рис. 2.2.** Трифазний інвертор напруги:

*a* – схема інвертора; *b* – схема заміщення

Роботу інвертора у окремих інтервалах часу, зазначених на наступному рис. 2.1 в першому інтервалі ( $0 - t_1$ ) у включеному стані знаходяться транзистори *VS1*, *VS4* та *VS5*. Транзистори *VS1* та *VS5* підключають опори фаз  $Z_A - Z_C$  до «плюсу» вхідного джерела, через відкритий транзистор *VS4* фаза навантаження з'єднана з

«мінусової» шиною  $E_d$ . Напруга джерела  $E_d$  розподіляється пропорційно до величин опорів  $Z_A - Z_C$  ланцюга навантаження, якщо прийняти однакові опори навантаження фаз інвертора, то загальний опір паралельно включених фаз  $Z_A$  та  $Z_C$  буде вдвічі менше опору  $Z_B$  фази В. У цьому зв'язку до  $Z_B$  прикладається вдвічі більша частина напруги  $E_d$  в порівнянні з фазами А і С, тобто  $U_A = U_C = 1/3E_d$ , а  $U_B = -2/3E_d$ .

Знаки напруги навантаження визначаються полярністю виведення джерела, з якими в цей час вони з'єднані, оскільки на інтервалі  $0 - t_1$  фази  $Z_A$  і  $Z_C$  підключені до «плюсу»  $E_d$ , напруга на них становить:  $U_A = U_C > 0$ , фаза В пов'язана з «мінусом»  $E_d$ , тому  $U_b < 0$ . Цьому відповідають величини та полярність напруг  $U_A - U_C$  на другому інтервалі ( $t_1 - t_2$ ) включені вентиля VS1, VS4 та VS6 утворюють конфігурацію ланцюга навантаження, в цьому випадку  $U_A = 2/3E_d$ , а  $U_B = U_C = -1/3E_d$ . Наступна зміна схеми інвертора відбувається відповідно до діаграми управління рис. 2.2, а-е.

На виході інвертора одержують трифазну симетричну систем змінної напруги з частотою  $f = 1/T$ , яка визначається періодом  $T$  відкриття (закриття) транзисторів. При активно-індуктивному навантаженні форми струмів навантаження  $I_A - I_C$  близькі до синусоїдальної, при цьому для з'єднання «зірки» не потрібна наявність середньої (нульової) точки у джерела живлення для з'єднання з «нулем» навантаження. У разі з'єднання навантаження в «трикутник» до її фаз прикладається лінійна напруга з виходу А, В і С інвертор.

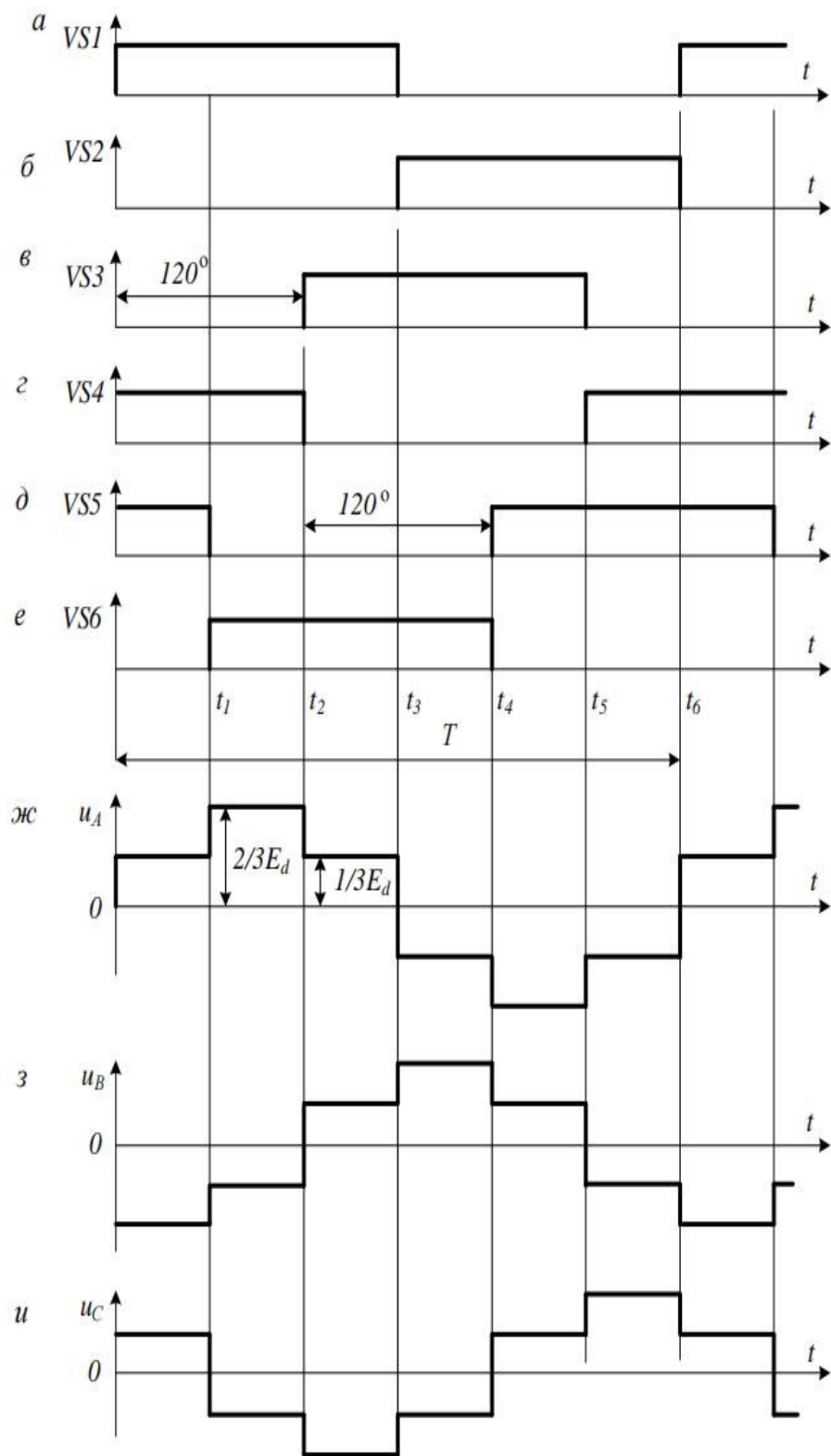


Рис. 2.3. Діаграми роботи трифазного АІН: а, б, в, г, д, е – імпульси.

Перспективним варіантом реалізації безпечного управління стрілочними приводами змінного струму в мікропроцесорних системах централізації стає використання інверторів – перетворювальних схем, що формують змінну напругу. Сучасна практика використання інверторів у системах електроживлення та частотно-регульованому приводі передбачає високочастотну роботу комутаційних елементів із широтно-імпульсною модуляцією. Управління стрілочними приводами на залізничному транспорті вимагає іншого підходу, що пов'язано з відсутністю завдання регулювання частоти обертання та необхідністю управління двигунами, віддаленими на значну відстань від перетворювального пристрою. У якості основних орієнтирів при виборі технічних рішень можна назвати забезпечення мінімальних габаритів та вартості апаратури у перерахунку на один виконавчий об'єкт, а також мінімізацію електромагнітних впливів на ланцюг інших пристроїв. У зазначених умовах найбільш ефективним є відомий принцип формування трифазної напруги, що передбачає роботу напівпровідникових ключів на частоті 50 Гц.

Основним критерієм вибору величини постійної напруги, що перетворюється інвертором, стає забезпечення моменту, що крутить, еквівалентного тому, який реалізується в існуючих системах електричної централізації при використанні синусоїдальних напруг. Аналіз впливу ступінчастої напруги, що формується на обмотках двигуна, дозволяє зробити висновок, що величина моменту, що крутить, визначається напругою основної гармоніки. Відповідно, постійна напруга повинна бути такою, щоб середньоквадратичне значення основної гармоніки дорівнювало фазному напрузі, що забезпечується пристроями електроживлення релейних систем електричної централізації. Розрахунки показують, що для виконання цієї умови величина постійної напруги повинна становити 285 В.

Оптимальним рішенням при виборі елементної бази для побудови інверторів, що забезпечують роботу навантаження потужністю порядку одиниць кВт можна вважати використання біполярних транзисторів із ізольованим затвором (IGBT). Властива цим транзисторам висока швидкість перемикання - нестача в умовах

керування віддаленими об'єктами. Простий та ефективний метод обмеження швидкодії напівпровідникових ключів із ізольованим затвором – збільшення опору в ланцюгах затворів. Результати експериментальних досліджень, дають підстави стверджувати, що з роботі силових ключів на частоті 50 Гц найкращі результати можуть досягатися при величинах опорів порядку одиниць кОм.

У ході практичної реалізації УСО на основі інверторів неминує виникає проблема реалізації безпечного управління перетворювальною схемою. Як варіант ефективного вирішення цієї проблеми запропоновано використання окремих генераторів керуючих сигналів для кожного виконавчого об'єкта, живлення яких формується малопотужними функціональними перетворювачами, що працюють під безпосереднім керуванням обчислювальних засобів мікропроцесорної системи автоматики.

Вирішення проблеми безпеки на рівні пристроїв сполучення з об'єктами (УСО) може бути досягнуто шляхом використання комутації ланцюгів виконавчих об'єктів реле першого класу надійності. Однак такий підхід не дозволяє реалізувати одну з основних переваг мікропроцесорних систем, що полягає у малих габаритах та високій технологічності апаратних засобів. Тому сучасні тенденції розвитку систем залізничної автоматики припускають для безпосереднього керування об'єктами переважне використання силових напівпровідникових ключів та малогабаритних реле із жорстко зв'язаними контактними групами (safety relay). Безпека функціонування апаратури у разі забезпечується особливою побудовою схем, що виключає подачу живлення на виконавчий об'єкт у разі відмов.

Відомими принципами забезпечення безпеки у практиці реалізації УСО є програмно-апаратний контроль справності напівпровідникових комутаційних елементів із гарантованим відключенням живлення у разі виявлення відмови та використання функціональних перетворювачів (ФП) з несиметричною відмовою, що здійснюють перетворення енергії джерела живлення за рахунок динамічної роботи комутаційних елементів. Враховуючи сучасний рівень розвитку силової

елементної бази та перетворювальної техніки, а також відносну складність контролю справності комутаційних елементів та реалізації гарантованого відключення, можна стверджувати, що використання ФП є перспективним напрямком у розробці безпечних УСО.

Безпечна поведінка УСО на основі ФП при виникненні відмов комутаційних елементів пояснюється втратою здатності до перетворення напруги джерела живлення, що забезпечує функціонування виконавчого об'єкта. Перевагою перетворювальних схем порівняно з рішеннями на основі (safety relay) можна вважати відсутність дефіцитної елементної бази та сумісність із сучасними системами безперебійного електроживлення на основі шин постійного струму, оскільки як вихідна напруга для перетворення використовується саме постійна напруга. Застосування перетворювальних схем як безпечні УСО найбільш доцільно в тих випадках, коли немає необхідності у використанні розділових трансформаторів для забезпечення безпеки, що трапляється при управлінні об'єктами, нечутливими до постійної напруги.

Новизна цього дослідження полягає у розробці рекомендацій та технічних рішень, що забезпечують ефективне використання відомих принципів перетворення електричної енергії для побудови безпечної апаратури управління стрілочними приводами на основі сучасної елементної бази. Запропоновані рішення успішно реалізовані в системі мікропроцесорної централізації МПЦ-МПК.

## **2.2. Регулювання напруги інверторів**

Є декілька способів регулювання вихідної напруги інверторів, один з них ми розглянули в минулому розділі, що дозволяє регулювати величину вихідної напруги за рахунок зміни вхідної напруги інвертора  $E_d$ . Щоб реалізувати цей спосіб регулювання на вході інвертора необхідно включати перетворювач, наприклад керований випрямляч, за допомогою якого можна змінювати вхідну напругу.

Два головних способи імпульсного регулювання: широтно-імпульсне регулювання (ШИР) та метод широтно-імпульсного модулювання (ШІМ) вихідної напруги. Якщо розглянути перший випадок, то протягом одного на пів-періоду роботи інвертора на його виході формується лише один імпульс, вихідну напругу регулюють шляхом зміни тривалості цього імпульсу, залишаючи незмінним його амплітуду. У другому випадку на виході однофазного інвертора одержують послідовність імпульсів різної ширини, зміна величини вихідної напруги досягається зміною ширини імпульсів при постійній амплітуді.

Одним із основних досягнень, пов'язаних з реалізацією ЧРП, стала можливість плавної зміни частоти обертання асинхронних та синхронних електричних машин шляхом зміни частоти трифазної напруги. Для збереження постійного моменту, що крутить, регулювання частоти слід супроводжувати пропорційною зміною величини напруги на обмотках двигуна. Щоб зменшити втрати в обмотках, форма струму має бути максимально наближена до синусоїди. Зазначені вимоги найпростіше забезпечити, використовуючи ШІМ у поєднанні з високою частотою перемикання комутаційних елементів перетворювача. В результаті застосування високочастотної комутації фактично стало нормою розробки перетворюючих пристроїв. Технічні рішення, що передбачають роботу комутаційних приладів на низьких частотах, нечасто потрапляють у поле зору сучасних розробників.

### **2.3 Метод широтно-імпульсної модуляції**

Метод широтно-імпульсного моделювання як засіб регулювання напруги і отримання синусоїдальних струмів в обмотках. Прогресивні технічні рішення забезпечують здобування синусоїдальних напруг за рахунок використання - (ШІМ).

Для збереження постійного крутного моменту регулювання частоти потрібно супроводжувати пропорційною зміною величини напруги на обмотках двигуна.

Щоб зменшити втрати в обмотках форма струму повинна бути максимально наближена до синусоїди, вказані потреби простіше всього забезпечити, використовуючи метод – (ШІМ), в поєднанні з високою частотою перемикання комутаційних елементів перетворювача. В результаті застосування високочастотної комутації фактично стало нормою при розробці перетворювальних пристроїв.

Метод широтно-імпульсного модулювання на мал.2.4 наведені форми напруги  $u_{m1}$ ,  $u_{m2}$  та  $u_{znn}$ , за допомогою яких відбувається формування імпульсів керування  $VS1$ - $VS4$  транзисторами інвертора, а також форма його вихідної напруги  $u_n$ , отримана методом ШІМ. Широтно-імпульсне модулювання вихідної напруги інвертора здійснено за синусоїдальним законом. Для цього використовується модулююча функція  $u_{m1}$  синусоїдальної форми:

$$u_{m1} = U_{m1} \sin \omega_m t,$$

де  $U_{m1}$  – амплітудне значення синусоїди;  $\omega_m = 2\pi/T$  – частота модулюючого сигналу.

Реалізація в алгоритмі ШІМ використовується друга модулююча функція протилежного знаку:  $u_{m2} = -u_{m1}$ . Перемикання транзисторів інвертора відбувається в точках перетину кривих, що модулюють, з напругою несучої  $u_{znn}$ , що має пілкоподібну форму з амплітудою  $U_{znn}$ . Частота  $f_{znn}$  напруги  $u_{znn}$  повинна бути не парно кратна частоті  $f_m$  модулюючого сигналу. Відношення частот несучого та модулюючого сигналів характеризує коефіцієнт модуляції до ШІМ. У цьому випадку він складає:

$$K_{шім} = \frac{f_{гпн}}{f_m} = 5,$$

тобто під час періоду модулюючої напруги  $T = 2\pi$  відбувається п'ять пульсацій сигналу опорної  $u_{GPN}$ .

Глибина модуляції сигналу визначається співвідношенням амплітуд модулюючого сигналу та напругою носія  $U_{GPN}$ :

$$\mu = \frac{U_m}{U_{\text{ГПН}}}.$$

Значення  $\mu$  можуть змінюватися в діапазоні від 0 до 1. Перемикання транзисторів

$VS1 - VS4$  інвертора відбувається відповідно до алгоритму:

$$VS1 = \begin{cases} 1 & \text{при } U_{m1} - U_{\text{ГПН}} \geq 0 \\ 0 & \text{при } U_{m1} - U_{\text{ГПН}} < 0 \end{cases}$$

$$VS3 = \begin{cases} 1 & \text{при } U_{m2} - U_{\text{ГПН}} \geq 0 \\ 0 & \text{при } U_{m2} - U_{\text{ГПН}} < 0 \end{cases}$$

$$VS2 = VS1, \quad VS4 = VS3,$$

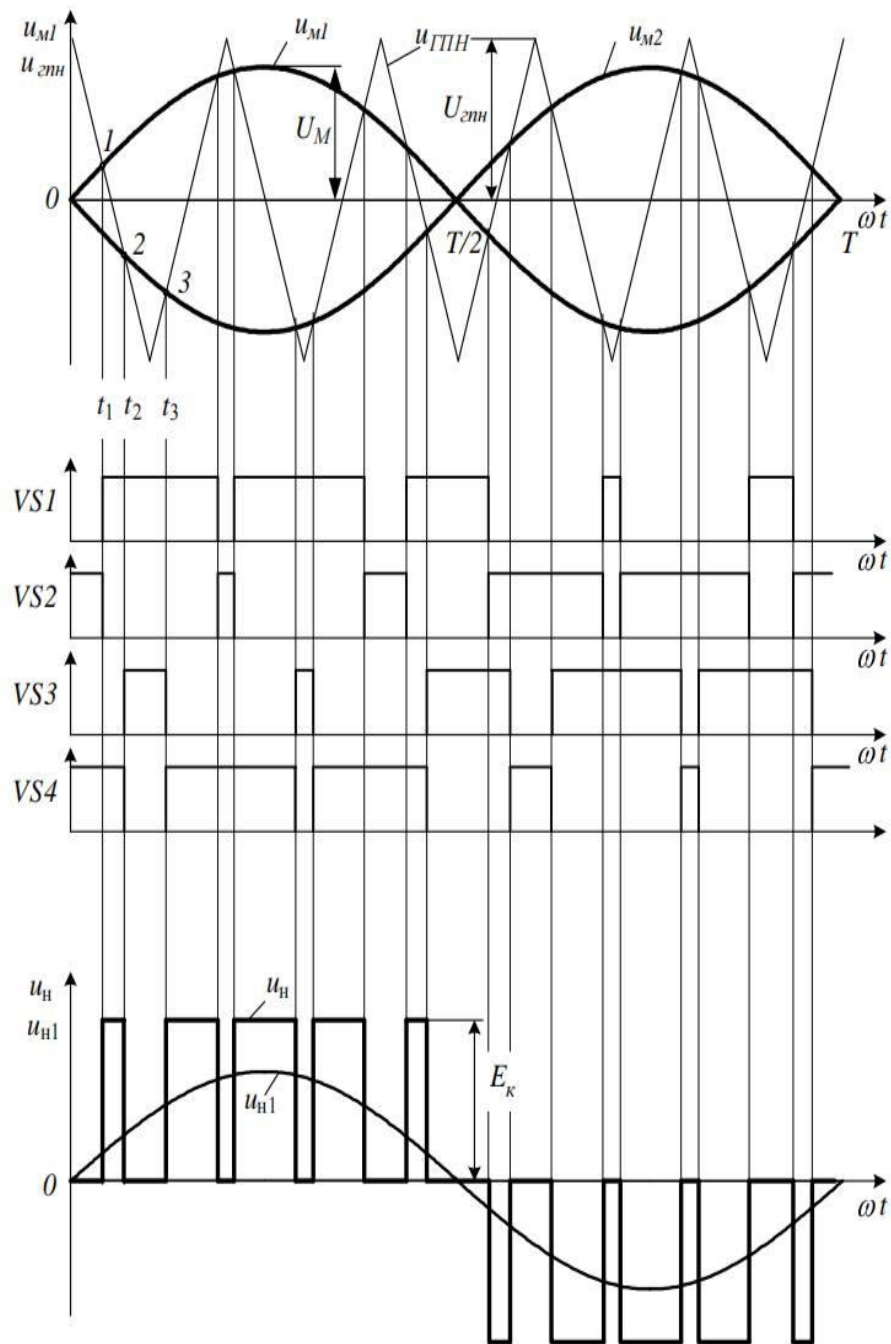
тобто, стан транзисторів  $VS1 - VS4$  відповідає логічному 1, логічний 0 означає їх відключення. Транзистори контролюють сигнали  $VS1, VS2$  та  $VS3, VS4$  взаємно розумні.

На інтервалі  $0 - t_1$  сигнали  $u_{M1}$  та  $u_{m1}$  менше, ніж напруга носія  $u_{\text{зпн}}$ , отже, у штаті існують транзистори  $VS2, VS4$  катодної групи. Навантаження відключається від позитивної шини джерела ЕД, закрита транзисторами  $VS1, VS3$ , тому напруга навантаження є  $u_n = 0$ .

На інтервалі  $t_1 - t_2$  транзистори  $VS1, VS4$  включені, через які до навантаження застосовується напругою позитивної полярності з вхідного джерела  $E_d$ . У вигляді вихідної напруги  $u_n$  інвертора на цьому інтервалі утворюється імпульс напруги позитивної полярності з амплітудою  $E_d$ .

На інтервалі  $t_2 - t_3$  провідному стані знаходяться вентиля  $VS1, VS3$  отже, група анода з відключеним  $VS2, VS4$  напругою  $u_n = 0$ . Протягом першої половини періоду  $0 - T/2$  утворюються імпульси напруги  $u_n$  з позитивної полярності. У другому полу-періоді  $T/2 - T$  крива напруги  $u_n$  складається з негативних імпульсів. Напруга при навантаженні утворюється під час включення транзисторів різних груп, таких як  $VS1, VS4$  або  $VS2, VS3$ . У першому випадку відбувається збільшення струму навантаження через енергію джерела  $E_d$ , а в другому струм у навантаженні підтримується через енергію, що зберігається раніше в індуктивності навантаження, потік цього струму утворюється транзистором і зворотним діодом

однієї групи інвертора. В першому на пів-періоді збільшення струму  $i_n$  це відбувається під час включення транзисторів  $VS1, VS4$ . Під час пауз на-  
 пруги:  $u_n = 0$  струм навантаження закривається або через транзистор  $VS1$ , і діод  $VD3$ , або через ланцюг  $VS4, VD2$ , подібні процеси відбуваються у другому полу-  
 періоді.



**Рис. 2.4** Діаграми для методу ШПМ-модуляції.

Форма струму навантаження визначається коефіцієнтом модуляції контрольних сигналів, тобто збільшення частоти напруги сприяє більшому приближенню струму  $i_n$  до синусоїдальної форми. На початку і кінці на півперіоду імпульси  $u_n$  мають меншу ширину порівняно з серединою на півперіоду тобто тривалість імпульсу  $u_n$  змінюється відповідно до розміру синусоїдальної модулюючої напруги. При виході інвертора напруги навантаження утворюється у формі, значення якого регулюється за рахунок зміни ширини імпульсів синусоїдальним законом.

#### 2.4. Висновки за розділом

Величина та форма вихідної напруги автономного інвертора визначається значенням навантаження. Близька до синусоїдальної вихідної напруги інвертора зберігається в обмеженому діапазоні параметрів навантаження.

Інвертори, які використовуються як пристрій сполучення з приводами, слід створювати на основі сучасної елементної бази, яка виключає необхідність застосування складних схемо-технічних рішень. У складі пристроїв сполучення не повинна використовуватися великогабаритна та дорога елементна база, зокрема силові трансформатори. Алгоритм управління силовими ключами повинен забезпечувати формування на обмотках двигунів напруги ступінчасто-прямокутної форми, що характеризується мінімальним значенням коефіцієнта гармонік.

Метод широтно-імпульсної модуляції призначений для управління струмом та напругою. Принцип роботи ШІМ полягає у зміні ширини імпульсу постійної амплітуди та постійної частоти, регуляція ШІМ використовуються в імпульсних перетворювачах, на схемах управління постійним струмом або яскравості світлодіодів.

### **3. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ШІМ НА МОДЕЛІ**

#### **3.1. Характеристика Matlab-Simulink**

Сучасні системи автоматичного керування характеризуються високою складністю, підвищеними вимогами до показників швидкості, точності та стійкості. Для моделювання і проектування таких систем використовуються пакети програм, що дають можливість проводити моделювання аналіз і синтез систем керування.

Одним із програмних комплексів призначених для моделювання систем керування є комплекс MATLAB/SIMULINK.

Система моделювання SIMULINK створена в середовищі MATLAB і працює з використанням функцій цього пакету. Система SIMULINK призначена для роботи з моделями, які можна зобразити у вигляді блок-схем. Він являє собою пакет програм для побудови моделей, моделювання і аналізу динамічних систем.

Моделювання в системі SIMULINK проводиться в графічному інтерфейсі користувача (GUI) для побудови моделі як структурної схеми з використанням миші.

Система SIMULINK включає повний комплект блоків, необхідних для створення моделей, пристрої відображення і генератори сигналів, дискретні лінійні та нелінійні компоненти та блоки з'єднань.

Розроблення блочних моделей засобами SIMULINK основана на технології drag-and-drop („перетягни і покинь”). Окремими елементами побудови блочних моделей є блоки, які зберігаються у бібліотеці пакету SIMULINK. Ті блоки, які ми вводимо до моделі пов'язані між собою за принципами передачі інформації і керування. Типи зв'язків залежать від виду блоків і логіки роботи розробленої моделі. Дані, якими обмінюються блоки, можуть бути скалярними величинами, векторами або матрицями довільного розміру. У процесі моделювання можна змінювати час моделі, а також умови закінчення моделювання.

Блочна модель може складатися з будь-якої кількості моделей більш низького рівня. Під час моделювання є можливість контролю за процесами, які ми досліджуємо на блочній моделі. Для цього існують спеціальні блоки, які виконують роль вікон де будуються графіки, або виводиться числова інформація. Бібліотека блоків SIMULINK дозволяє включати до неї блоки розроблені безпосередньо користувачем. При моделюванні систем керування технологічними об'єктами використовуються три типи моделей:

- функціональні моделі;
- структурні моделі;
- віртуальні моделі.

Функціональні моделі використовуються для моделювання напівпровідникових перетворювачів і схем управління на їхній базі.

Структурні моделі використовуються для моделювання технологічних об'єктів, систем і машин, які мають математичний опис і стандартні системи регулювання.

Віртуальні моделі використовуються для зображення готових систем керування, електричних машин та інше і які широко представлені, наприклад, в бібліотеці Power System Blockset.

Цінність SIMULINK полягає в широкій, відкритій для вивчення і використання бібліотеці компонентів (блоків). Вона включає джерела дій сигналів з практично любими часовими залежностями, масштабні, лінійні і нелінійні перетворювачі з різними формами передавальних характеристик, пристрої квантування, інтегральні і диференціальні блоки та ін.

У бібліотеці є цілий набір віртуальних реєструючих приладів – від простих вимірювачів типу амперметра або вольтметра до універсальних осцилографів чи то графопобудівників, які дозволяють проглядати часові залежності вихідних параметрів моделюючих систем, наприклад струмі і напруги, переміщення, тиску, температури та ін. там є також складні прилади, як то аналізатори спектру складних сигналів, засоби анімації графіків.

Об'єднання однієї із самих швидких матричних математичних систем – MATLAB з пакетом SIMULINK – відкрило нові можливості використання самих сучасних математичних методів для рішення задач динамічного і ситуаційного моделювання складних систем і пристроїв.

Simulink підтримує – системний дизайн, моделювання, автоматична генерація коду, тестування та перевірка вбудованих систем

Існує декілька інших додаткових продуктів, що надаються MathWorks та сторонніми апаратними та програмними продуктами, які доступні для використання з Simulink.

Наступний список дає короткий опис деяких із них – Stateflow дозволяє розробляти кінцеві автомати та блок-схеми. Simulink Coder дозволяє генерувати вихідний код C для автоматичної реалізації систем в реальному часі. xPC Target разом із системами реального часу на базі x86 забезпечують середовище для імітації та тестування моделей Simulink та Stateflow у реальному часі на фізичній системі. Вбудований кодер підтримує певні вбудовані цілі. HDL Coder дозволяє автоматично генерувати синтезовані VHDL та Verilog. SimEvents пропонує бібліотеку графічних будівельних блоків для моделювання систем масового обслуговування. Stateflow дозволяє розробляти кінцеві автомати та блок-схеми. Simulink Coder дозволяє генерувати вихідний код C для автоматичної реалізації систем в реальному часі. xPC Target разом із системами реального часу на базі x86 забезпечують середовище для імітації та тестування моделей Simulink та Stateflow у реальному часі на фізичній системі. Вбудований кодер підтримує певні вбудовані цілі. HDL Coder дозволяє автоматично генерувати синтезовані VHDL та Verilog. SimEvents пропонує бібліотеку графічних будівельних блоків для моделювання систем масового обслуговування. Simulink здатний систематично перевіряти та перевіряти моделі за допомогою перевірки стилю моделювання, відстеження вимог та аналізу охоплення моделі. Simulink Design Verifier дозволяє виявляти помилки проектування та генерувати сценарії тестування для перевірки моделі.

### 3.2. Модель

Інвертор напруги для живлення асинхронного двигуна має дозволити плавне регулювання частоти обертання його ротора. В літературі наведено багато схем інверторів для перетворення постійного струму в змінний. Простішими серед них є схеми з керуванням електронних ключів прямокутними імпульсами і схеми з ШІМ модуляцією. Схеми з ШІМ модуляцією дозволяють отримати синусоїдальний вихідний струм.

У роботі поставлено за мету розробити модель інвертора для живлення асинхронного двигуна і дослідити якість струму, а саме гармоніки в складі струму.

За основу взята типова схема трифазного інвертора (Рис. 3.1).

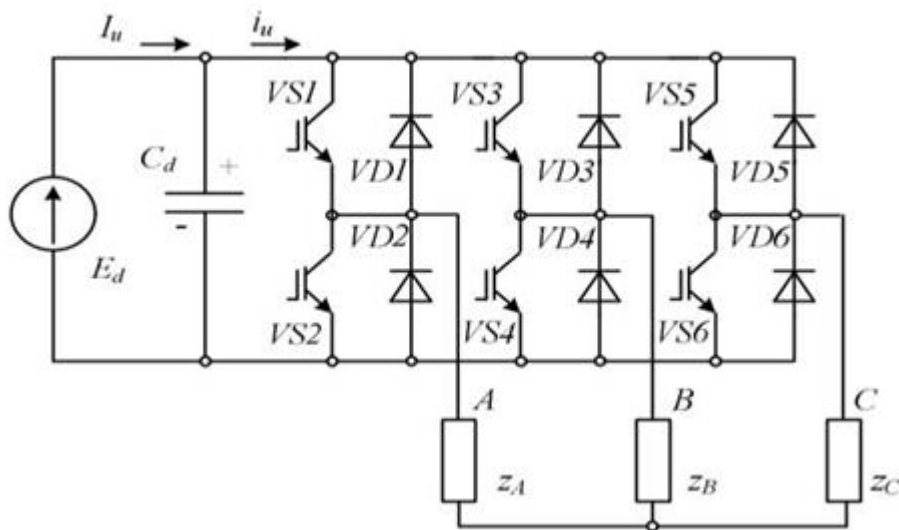
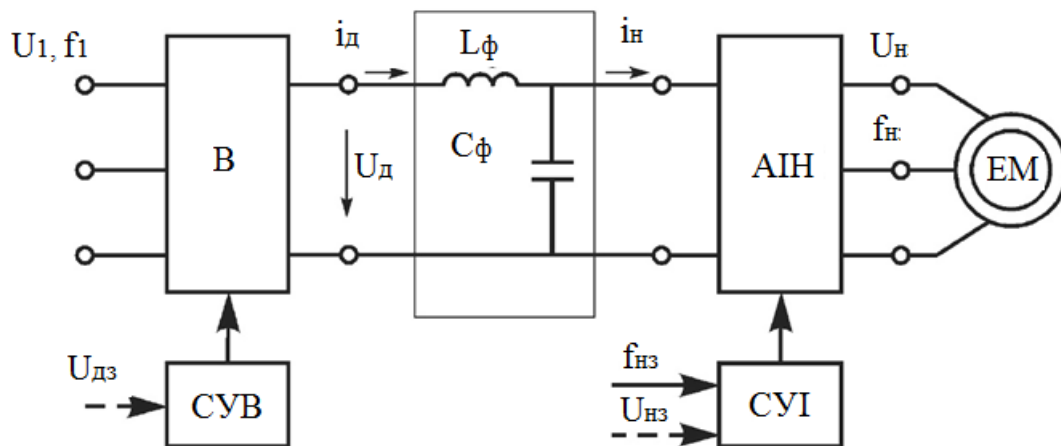


Рис. 3.1. Типова схема трифазного інвертора.

Для конкретизації в роботі розроблено модель інвертора для використання у стрілочному електроприводі змінного струму. За основу взято двохланкову схему (Рис. 3.2). Він побудований на базі автономного інвертора напруги та має в своєму комплекті фільтр. На схемі: ЕМ - електрична машина; АІН – автономний інвертор напруги;  $L_f$ ,  $C_f$  – індуктивність та ємність фільтра;  $f_{Hz}$  – задання частоти виходу інвертора;  $U_{dз}$  – задання вихідної напруги випрямляча; СУВ, СУІ

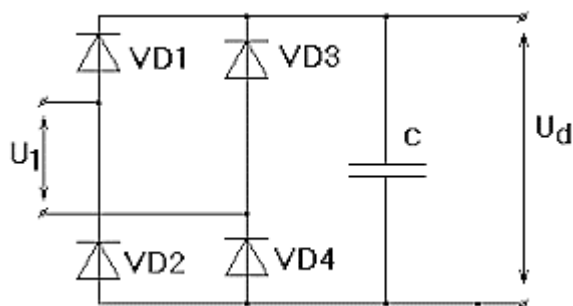
– система керування випрямлячем та інвертором;  $U_{нз}$  – задання вихідної напруги інвертора; В – випрямляч. В даній схемі для покращення роботи та усунення пульсацій використовується L-C – фільтр, зазвичай у нього Г – образна схема включення.



**Рис. 3.2.** Схема живлення двигуна СЕР

При використанні безпосередніх перетворювачів частоти (БПЧ) напруга з мережі подається через керовані вентелі на двигун. В кожній фазі БПЧ встановлюється реверсивний перетворювач, з сумісним або роздільним керуванням силовими комплектами. Схема трифазно-трифазного БПЧ, виконаного на основі трифазних мостових схем. Даний тип перетворювачів не має великого розповсюдження так не є досконалим. Серед недоліків є неможливість повного регулювання вихідної частоти. Постійна комутація вентилів призводить до погіршення коефіцієнта потужності, погана якість вихідної напруги і великий вплив на мережу живлення. До переваг БПЧ можна віднести більш високий ККД, пояснюється це тим що відбувається однократне перетворення енергії.

У першому каскаді використано некерований випрямляч на діодах.



**Рис. 3.3.** Схема некерованого випрямляча на діодах

Схема, представлена на рис. 3.1-3.3, що складається з випрямляча змінного струму і інвертора, дозволяє перетворити змінну однофазну наругу у трифазну, яка необхідна для живлення асинхронного двигуна.

Крім цього, схема дозволяє змінювати частоту трифазної наруги, що подається на двигун, і таким чином плавно регулювати електроприводом.

Для проведення моделювання вибрано пакет моделювання Matlab/Simulink.

**Рис. 3.4.** Схема моделі в Симулінк.

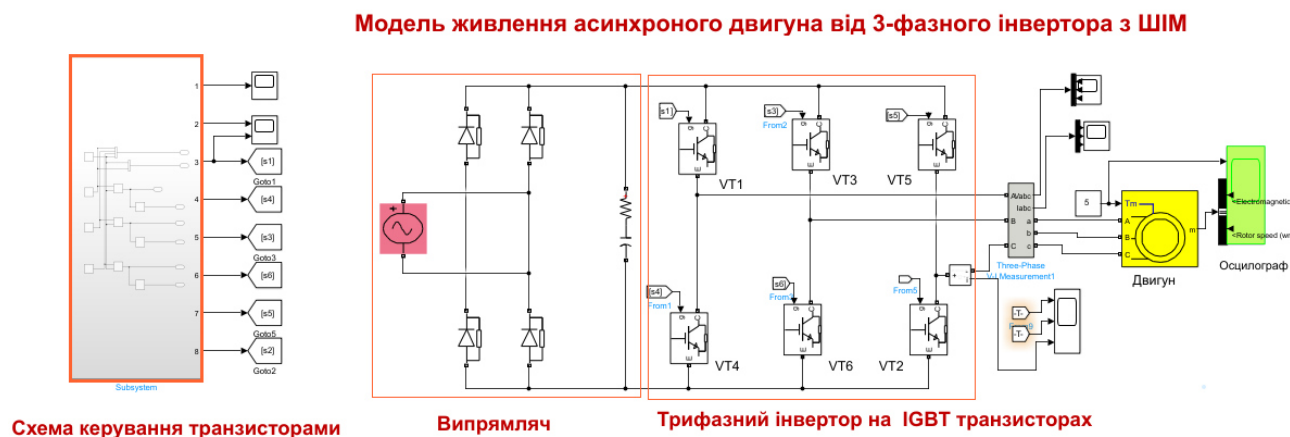
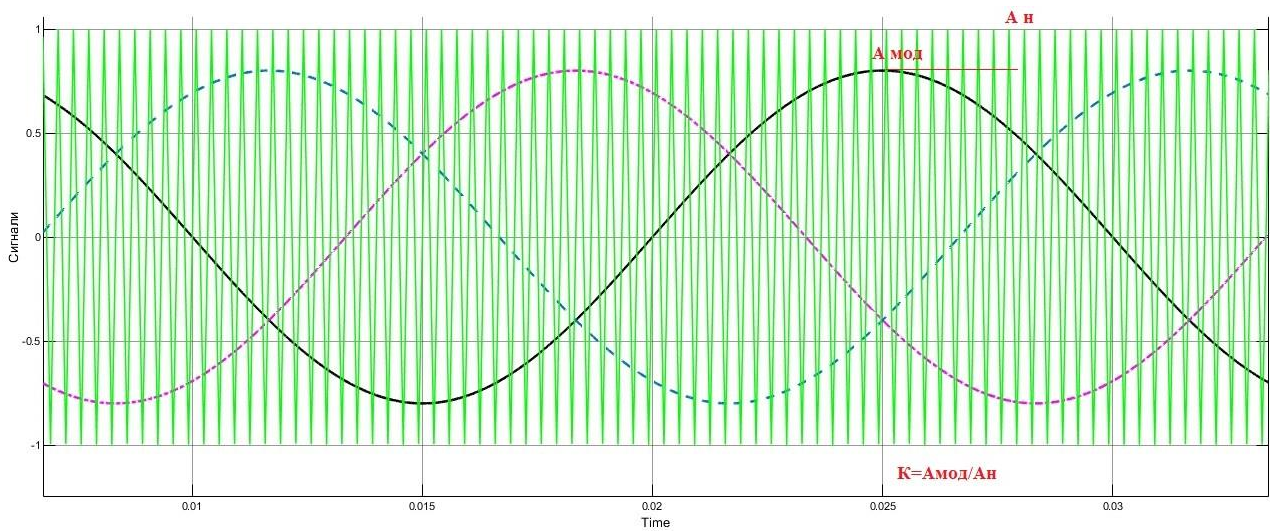


Схема моделі в Симулінк наведена на рис. 3.4. Схема складається з перетворювача і пристрою керування. Пристрій керування генерує управляючі імпульси з широтно-імпульсною модуляцією, що подаються на затвори транзисторів перетворювача. Імпульси формуються схемою порівняння значення двох сигналів – з несучою частотою і модулюючого сигналу



**Рис. 3.5.** Сигнали з несучою і модулюючою частотою.

Коефіцієнт модуляції визначається відношенням амплітуд цих сигналів  $K_{\text{мод}} = \text{Аплітуда модулюючого сигналу} / \text{Амплітуда несучого сигналу}$ .

У роботі досліджено форма струму на вході і на виході перетворювача і спотворення цих струмів. Для характеристики спотворень взято загальноприйнятий коефіцієнт нелінійних спотворень.

Коефіцієнт нелінійних спотворень – показник, що характеризує ступінь відмінності форми сигналу від синусоїдальної. КНІ використовується в основному для виміру спотворень форми вхідного або вихідного струму. Коефіцієнт нелінійних спотворень сигналу (КНІ,  $K_H$ ) – величина, що виражає ступінь нелінійних спотворень сигналу, що дорівнює відношенню середньоквадратичного значення всіх вищих гармонік сигналу до напруги першої гармоніки:

$$K_H = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_n^2}}{U_1}$$

### 3.3. Результати моделювання

Вихідний струм перетворювача був отриманий в результаті моделювання для наступних значень частоти сигналу несучого і модулюючого, а також для двох значень коефіцієнта модуляції (0.8 і 0.9) (Табл. 3.1).

Таблиця 3.1.

Номер дослідження	Частота несучого сигналу (кГц)	Частота модулюючого сигналу (Гц)	Коефіцієнт модуляції
1	3	20	0.8
2	3	50	0.8
3	3	20	0.9
4	3	50	0.9
5	100	20	0.9
6	100	50	0.9

Форми трифазних сигналів на виході перетворювача наведені на рис. 3.6.

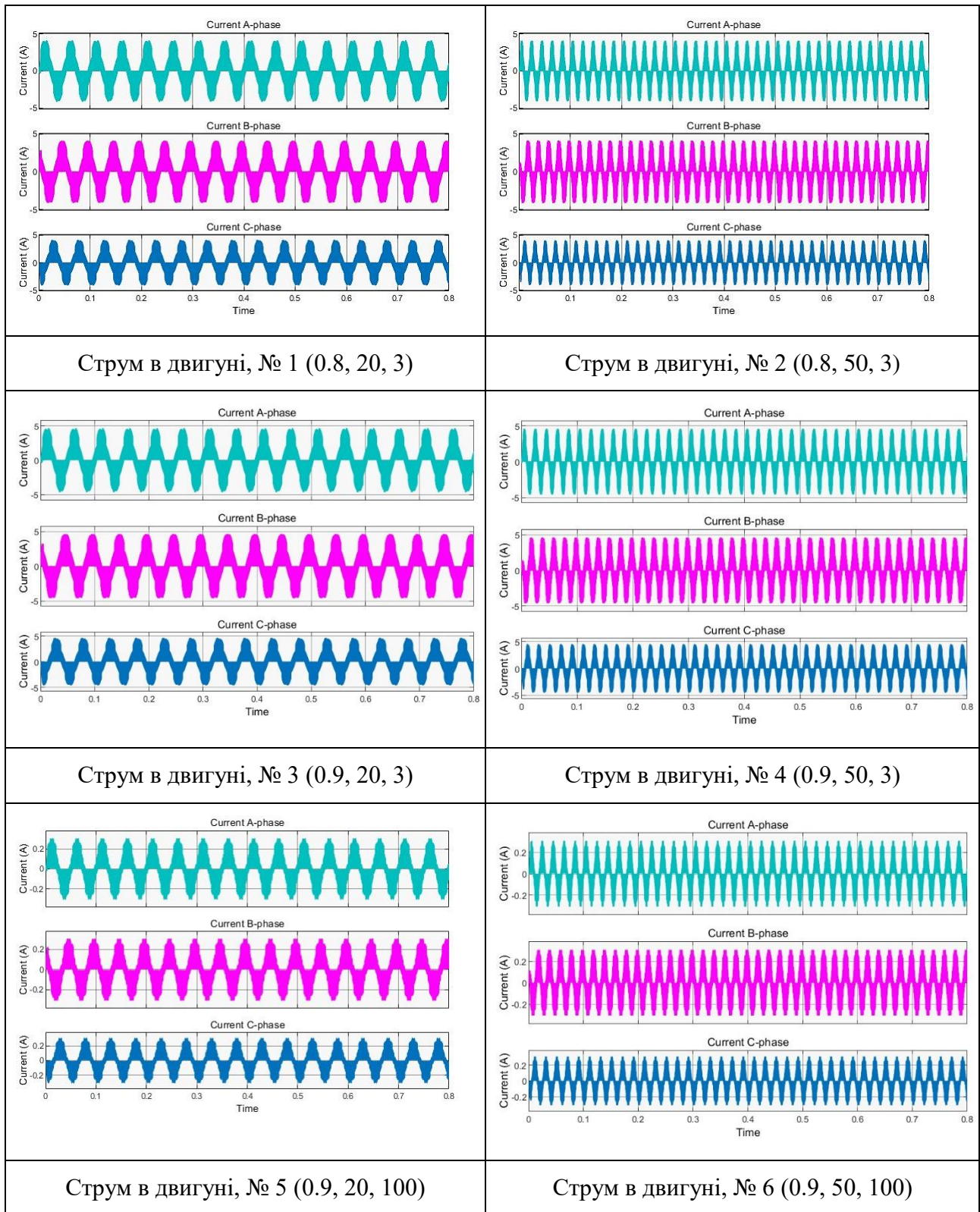
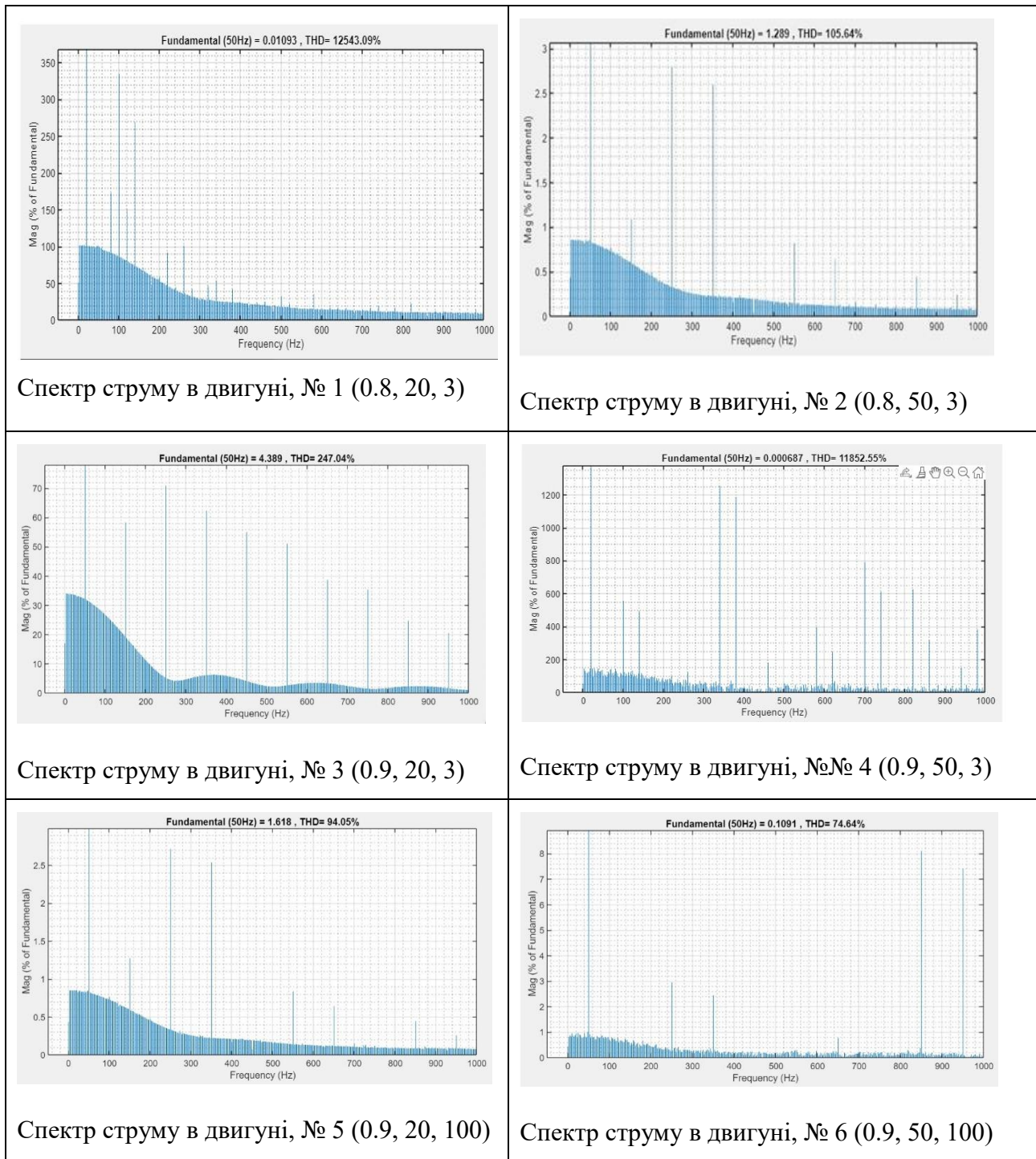


Рисунок 3.6. Трифазний струм, що подається з виходу перетворювача у двигун для шести досліджень відповідно табл. 3.1.



Спектр струму в двигуні, № 1 (0.8, 20, 3)

Спектр струму в двигуні, № 2 (0.8, 50, 3)

Спектр струму в двигуні, № 3 (0.9, 20, 3)

Спектр струму в двигуні, №№ 4 (0.9, 50, 3)

Спектр струму в двигуні, № 5 (0.9, 20, 100)

Спектр струму в двигуні, № 6 (0.9, 50, 100)

Рисунок 3.7. Спектри трифазного струму у двигуні для шести досліджень відповідно табл. 3.1.

### 3.4. Висновки за розділом

З наведених досліджень видно, що коефіцієнт нелінійних спотворень зменшується при збільшенні частоти несучого сигналу від 3 кГц до 100 кГц, а також при підвищенні коефіцієнта модуляції.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У даній дипломній роботі ми визначили регулювання частоти обертання асинхронних двигунів, яке може відбуватися за різних способів. Регулювання частоти обертання асинхронних двигунів представляє собою найбільш економічним методом. Суть полягає у регулюванні синхронної швидкості, змінюючи частоту джерела живлення статора асинхронного двигуна.

Інвертори, які використовуються як пристрій сполучення з приводами, слід створювати на основі сучасної елементної бази, яка виключає необхідність застосування складних схемо-технічних рішень.

Принцип роботи широтно імпульсної модуляції полягає у зміні ширини імпульсу постійної амплітуди та постійної частоти, регуляція ШІМ використовуються в імпульсних перетворювачах, на схемах управління постійним струмом або яскравості сьйвом світлодіодів.

З проведених досліджень видно, що коефіцієнт нелінійних спотворень зменшується при збільшенні частоти несучого сигналу від 3 кГц до 100 кГц, а також при підвищенні коефіцієнта модуляції.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Електроніка і мікросхемотехніка: Підручник для студентів вищ. закл. освіти, що навчаються за напрямками "Електромеханіка" та "Електротехніка": У 4-х т. / Сенько В.І., Панасенко М.В., Сенько Є.В., Юрченко М.М., Сенько Л.І., Ясінський В.В. -К.: ТОВ "Видавництво"Обереги", 2000. Т.1. Елементна база електронних пристроїв.- 300с.
2. Електроніка і мікросхемотехніка: Підручник для студентів вищ. закл. освіти, що навчаються за напрямками "Електромеханіка" та "Електротехніка": У 4-х т. / Сенько В.І., Панасенко М.В., Сенько Є.В., Юрченко М.М., Сенько Л.І., Ясінський В.В. - Харків: Фоліо, 2002. Т.2. Аналогові та імпульсні пристрої.- 510с.
3. Руденко В.С. та ін. Промислова електроніка: Підручник /В.С. Руденко В.Я. Ромашко, В.В.Трифонюк.- Київ, Либідь, 1993, 432 с
4. Готлиб И.М. Источники питания. Инверторы, конверторы, линейные и импульсные стабилизаторы. – М.: Постмаркет, 2002. – 544 с. 6. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника.М.:Техносфера. 2005. – 632с.
5. Жуйков В.Я.,Рогаль В.В., Буденний О.А., Пілінський В.В. Енергетична електроніка. Електронний підручник . Київ, 2008. 4. Лаврентьев Б. Ф. Схемотехника электронных средств : учебное пособие для вузов по направлению "Проектирование и технология электронных средств" / Б. Ф. Лаврентьев.- М. : Академия, 2010.- 333 с.
6. Руденко В.С., Сенько В.И., Трифонюк В.В. Приборы и устройства промышленной электроники. -Киев, Техника, 1989.
7. Скаржепа В.А., Сенько В.И. Электроника и микросхемотехника Сборник задач. Под ред. А.А. Краснопрошиной. - К., Выща школа, 1989,







