

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет машинобудування, екології та хімічних технологій
Кафедра електромеханіки та машинобудування

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Калиниченко В.В.

(підпис)

(ініціали, прізвище)

«_____» _____ 20__ р.

Дипломна робота

бакалавра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему Підвищення надійності електроприводу шахтних електровозів в умовах відокремленого підрозділу «Шахта «Капітальна» Державного підприємства «Мирноградвугілля»

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕЛКЗ-17і

(шифр групи)

напряму підготовки (спеціальності) 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Косенко Михайло Іванович

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Керівник доц. каф. ЕМ, канд. техн. наук, доц. Повзун О.І.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Нормоконтроль _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

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

Студент _____

(підпис)

Покровськ – 2021 р.

АНОТАЦІЯ

Косенко М.І. Підвищення надійності електроприводу шахтних електровозів в умовах відокремленого підрозділу «Шахта «Капітальна» Державного підприємства «Мирноградвугілля»/ Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – ДВНЗ ДонНТУ, Покровськ, 2021.

Дипломна робота присвячена підвищенню надійності електроприводу шахтних електровозів в умовах відокремленого підрозділу «Шахта «Капітальна» Державного підприємства «Мирноградвугілля». Проаналізовано існуючі системи керування шахтних електровозів, в результаті чого виявлено, що сучасний тяговий привод має ряд недоліків до яких відносяться, ненадійність, великі габаритні параметри та велика вартість в виготовленні. Визначено забезпечення керування тяговими асинхронними електродвигунами, в процесі якого запропоновано використання ТАЕД з КЗ ротором, задля забезпечення потрібних тягових характеристик якого живлення електроенергією здійснюється від інвертора за спеціальною схемою керування. Проведено аналіз силових перетворювачів, що застосовуються для енергоживлення тягових асинхронних електродвигунів. Здійснено обґрунтований аналіз енергоживлення ТАЕД від статичного перетворювача. Визначені основні принципи керування тяговими асинхронними електродвигунами та виконано обґрунтування переходу ТАЕД в генераторний режим. Досліджено системи керування ТАЕД з короткозамкненим ротором за допомогою програмного продукту Simulink. В результаті дослідження визначено, що СК ТАЕД з КЗ ротором дозволяє отримати необхідні характеристики.

Ключові слова: надійність, шахтні електровози, тяговий асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором, система керування

Список публікацій здобувача: Публікації здобувача за темою випускної кваліфікаційної роботи – відсутні

ЗМІСТ

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ.....	4
ВСТУП.....	5
1 ГІРНИЧО-ГЕОЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ВІДОКРЕМЛЕНОГО ПІДРОЗДІЛУ «ШАХТА «КАПІТАЛЬНА» ДЕРЖАВНОГО ПІДПРИЄМСТВА «МИРНОГРАДВУГІЛЛЯ».....	6
2 ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ШАХТНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ В УМОВАХ ВІДОКРЕМЛЕНОГО ПІДРОЗДІЛУ «ШАХТА «КАПІТАЛЬНА» ДЕРЖАВНОГО ПІДПРИЄМСТВА «МИРНОГРАДВУГІЛЛЯ».....	8
2.1 Актуальність обраної теми. Формування мети та завдань	8
2.3 Аналіз забезпечення керування тяговими асинхронними електродвигунами	19
2.4 Аналіз силових перетворювачів, що застосовуються для енергоживлення тягових асинхронних електродвигунів	24
2.5 Аналіз енергоживлення ТАЕД від статичного перетворювача.....	30
2.6 Аналіз принципів керування тяговими асинхронними електродвигунами	32
2.7 Обґрунтування переходу ТАЕД в генераторний режим.....	38
2.9 Дослідження системи керування ТАЕД з короткозамкненим ротором за допомогою програмного продукту Simulink.....	50
ВИСНОВКИ.....	53
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ.....	54

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

АД – асинхронний двигун

ДПС – двигун постійного струму

СК – система керування

САК – система автоматичного керування

ТЕД – тяговий електродвигун

ТАЕП – тяговий асинхронний електропривод

ТАЕД – тяговий асинхронний електродвигун

КЗ – короткозамкнений

ККД – коефіцієнт корисної дії

АІН – автономний інвертор напруги

АІС – автономний інвертор струму

ВСТУП

На сьогоднішній день використання асинхронних електродвигунів (АД) є більш поширеним, так як основна їх частка становить приблизно 80 % від випускаємих двигунів. Причому сумарний обсяг електричної енергії, що необхідна для них, становить понад 50% всієї споживаної електроенергії [1].

Досить обширне розповсюдження АД зумовлюється їх конструктивною простотою, надійністю, високими експлуатаційними характеристиками, дешевизною та вважаються більш простими при обслуговуванні [1].

В даний час розрізняють наступні види асинхронних електродвигунів [2-3], які мають певні переваги і недоліки (рис. 1).

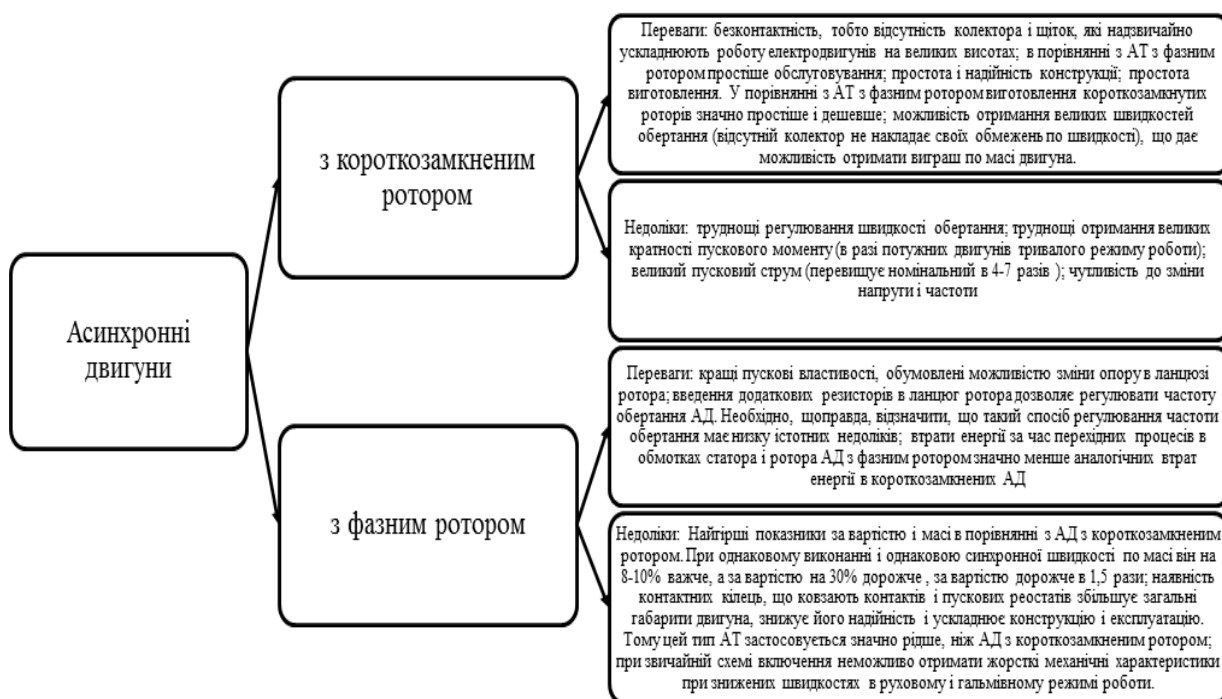


Рисунок 1 – Класифікація асинхронних двигунів та їх переваги і недоліки

Враховуючи зазначені вище переваги і недоліки відомих асинхронних електродвигунів, в даній роботі актуальним є розгляд АД з короткозамкненим ротором та їх системи керування з різноманітними контурами регулювання.

1 ГІРНИЧО-ГЕОЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ВІДОКРЕМЛЕНОГО ПІДРОЗДІЛУ «ШАХТА «КАПІТАЛЬНА» ДЕРЖАВНОГО ПІДПРИЄМСТВА «МИРНОГРАДВУГІЛЛЯ»

На теперішній час ВП «Шахта «Капітальна» ДП «Мирноградвугілля» виконує розробку двох пластів l_1 та l_7 . Її встановлена за проектом потужність становить 2400 тис. тон у рік, але у 2010 році Донгіпрошахт скорегував виробничу потужність у обсязі 860 тис. тон на рік [4].

Вугледобувне підприємство знаходиться на території Покровського вугленосного району та розкриті 11 вертикальними стовпами глибиною 830-1240 метрів та погоризонтними квершлагами. Підготовка шахтного поля виконується за блоковою схемою, а розробка здійснюється за стовповою системою [5]. Загальна середня потужність пластів l_1 та l_7 становить приблизно 1,3 - 2,3 метрів при умові їх залягання 6^0 - 11^0 . [4].

ВП «Шахта «Капітальна» ДП «Мирноградвугілля» проводить видобування корисної копалини за фланговою системою. В очисних виробках використовують однобічну схему видобування з застосуванням комплексів МКД-90 і 2КДД, в склад яких входять комбайни типу РКУ-10 та РКУ-13. Проведення підготовчих виробок здійснюється прохідницькими комбайнами типу 4ПП-2М, П-110, КСП-32 і ГПКС [4].

Перевезення гірничої маси, допоміжних вантажів та людського персоналу по основним виробкам здійснюється електровозами АМ-8Д у вагонетках ВГ-2,5, ВДК-2,5, ВПГ-18. Однак до очисних та підготовчих виробок допоміжні матеріали та робітники перевозяться монорельсовою дорогою 6ДМКУ в тих же самих вагонетках, окрім людей – ВНЛ-15, гірнича маса транспортується скребковими та стрічковими конвеєрами типу СП-202, ЛТ-80, Л80 [5]. Спуск-підйом вантажу та людей з поверхні до підземних виробок виконується підйомними машинами типу 2Ц-6,3×3,2, 2Ц-4×1,8, Ц-2,5×2 [4].

Провітрювання виробок виконується за комбінованою схемою за умови всмоктуючого способу. Загальна кількість повітря, яке потрібне для виконання провітрювання шахти, складає $8211 \text{ м}^3/\text{хв}$. [5].

На ВП «Шахта «Капітальна» ДП «Мирноградвугілля» передбачається двоступенева схема водовідливу. Головна водовідливна установка розташована на горизонті 622 м для виконання функції відкачування припливу на горизонт 217 м, з якого потім вода здійснює перекачування на поверхню шахти. Насосна камера горизонту 217 м складається з насосів типу ЦНС300х300 [5].

Електропостачання шахти виконується трансформаторами ТДТНШ-40000/110, які отримують електроживлення по лініям електропередач типу ПЛЗ30/110кВ від районних електропідстанцій «Красноармійська – 330 кВ» і «Красноармійська – 110 кВ». Загальна потужність шахти складає 330 тис. кВт. Електропостачання підземних електроспоживачів виконується по кабельній мережі типу ЦСКН 6,3х95; ЦСКН 6,3 х 120, що прокладена по стволам зі свіжим струменем повітря. ЦПП розташовується на пристволовому дворі горизонту 622 м. Всі споживачі даного підприємства живляться напругою 1140В, 660В, 220В, 127, проте електропривід головного водовідливу забезпечуються живленням високої напруги. Енергоживлення споживачів забезпечується від ГПП та ЦПП до дільничних РПП броньованими кабелями типу СБ, СБН, СБВШ, ВЕВБШв на 6 кВ, а вже по виробкам живлення виконується за допомогою гнучких кабелів [4-5].

2 ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ШАХТНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ В УМОВАХ ВІДОКРЕМЛЕНОГО ПІДРОЗДІЛУ «ШАХТА «КАПІТАЛЬНА» ДЕРЖАВНОГО ПІДПРИЄМСТВА «МИРНОГРАДВУГІЛЛЯ»

2.1 Актуальність обраної теми. Формування мети та завдань

На сьогоднішній час впровадження тягового електроприводу на шахтних електровозах є перспективним та актуальним питанням, так як забезпечується підвищення їх тягово-енергетичних характеристик. Сучасні електровози, що спроектовані для складних гірничо-геологічних умов та за умови значної швидкості їх пересування, потребують встановлення значно потужних та надійних тягових електродвигунів, проте їх надійність має обмеження за механічною та комутаційною напруженістю колектора, тому задля усування цих недоліків необхідно виконати перехід на тягові асинхронні двигуни [6].

Основні переваги використання тягових асинхронних електродвигунів в порівнянні з колекторними двигунами постійного струму вважаються, по-перше, зниження габаритних показників за умови однакової потужності; по-друге, зменшення витрат, які з'являються при створенні та експлуатації; по-третє, збільшення коефіцієнту використання зчіпної ваги електровозу; в четверте, підвищення потужності електродвигуна, що забезпечує збільшення потужності ЕРС загалом [7].

Перше дослідження в галузі використання тягових асинхронних електродвигунів було здійснено ще у 1930 році при розробці угорських електровозів, де застосовувалися електромашинні перетворювачі. А вже потім такий електропривод був використаний у Франції та в Україні десь у 60-х роках минулого століття, в яких застосовувалися напівпровідникові

перетворювачі задля забезпечення перетворення та регулювання електроенергії. Однак ці дослідження не були використані в подальшому, бо тоді елементний базовий рівень не зміг забезпечити потрібні показники та певний рівень надійності [7].

Тому з часом за умови подальшого розвитку напівпровідникової техніки надало новий імпульс при створенні електровозів з тяговим асинхронним електроприводом [6-7]. З виникненням силових транзисторів (IGBT) питання розробки статичних перетворювачів задля застосування на електровозах забезпечило перехід на більш вищий рівень реалізації та уникнення серйозних технічних перешкод. На даний момент в більш розвинутих країнах світу було досягнуто певних успіхів при серійному виробництві та використанні рухомого складу з тяговими асинхронними електроприводами (ТАЕП). Досвід експлуатації таких електровозів показав, що вони забезпечують експлуатаційний ККД порядком на 1 - 3% нижче ніж у локомотивів з тяговими двигунами постійного струму [8].

Наряду з такими показниками, як сила тяги в тривалому режимі та зчіпна вага, необхідно враховувати наступні тягово-енергетичні характеристики: осьова потужність та енергетичні втрати в діапазоні змін швидкостей і навантажень. Згідно досвіду світових країн можна зробити певні висновки, а саме більш ефективним для розвитку електровозів є електропривод з застосуванням тягових асинхронних електродвигунів (ТАЕД) [8].

Ці електродвигуни мають ряд переваг, а саме, по-перше, забезпечують ефективність використання зчіпної ваги електровозів; по-друге, забезпечує збільшення активної довжини ротора; по-третє, збільшує їх надійність, яка дозволяє реалізувати збільшену осьову потужність. Існуючі розробки в цьому напрямку підтвердили певні досягнення при підвищенні характерних показників за умови проектування систем автоматичного керування (САК) тягового електроприводу, які дозволяють виконати реалізацію тягових і енергетичних показників електровозу за умови використання прогресивних

тягових електродвигунів трифазного струму [9].

З вище написаного сформована головна мета даної роботи – розробка схеми формування тягової характеристики електроприводу із використанням асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором шахтних електровозів задля забезпечення підвищення його надійності.

У відповідності до визначеної мети були сформовані завдання роботи:

- ❖ проаналізувати системи керування шахтних електровозів
- ❖ визначити основне забезпечення керування тяговими асинхронними електродвигунами
- ❖ виконати аналіз силових перетворювачів, що застосовуються для енергоживлення тягових асинхронних електродвигунів
- ❖ провести аналіз енергоживлення ТАЕД від статичного перетворювача
- ❖ визначити основні принципи керування тяговими асинхронними електродвигунами
- ❖ виконати обґрунтування переходу ТАЕД в генераторний режим
- ❖ дослідити системи керування ТАЕД з короткозамкненим ротором за допомогою програмного продукту Simulink

2.2 Аналіз систем керування шахтних електровозів

Керування шахтними електровозами вважається певний вплив, який спрямований на переміщення з початкової до кінцевої точки за певний проміжок часу при забезпеченні необхідної безпеки руху і мінімальних енерговитрат. Задля досягнення цих параметрів необхідно щоб швидкість електровозу V змінювалася залежності від пройденого шляху [10-11].

Тому даний електровоз повинен забезпечити таку силу тяги F_k , якої буде достатньо задля подолання сили опору руху W і утворення певного його прискорення dV/dt , а для зниження швидкості, тобто при прискоренні

$dV/dt < 0$, потрібно утворити певну гальмівну силу B , що спрямована протилежно від сили інерції та швидкості V [11]. Такі показники визначають тягові та гальмівні характеристики електровозів та їх обмеження.

До основних завдань керування ЕРС відносять утворення необхідних режимів експлуатації тягових електродвигунів (ТЕД), за умови яких виконується забезпечення необхідних значень сили тяги F_k чи гальмування B відповідно заданих швидкостей руху V [12].

До основних параметрів режиму роботи тягових електродвигунів відповідно до їх виду відносяться [12]:

- ❖ двигуни постійного струму (ДПС): напруга U_d , струм якоря I_a , струм збудження I_e ;

- ❖ асинхронні двигуни (АД): напруга U_1 , струм статора I_1 , частота напруги живлення f_1 .

Для зміни режимів роботи ТЕД використовують системи керування ЕРС, яка виконує такі основні функції, як регулювання режимів роботи ТЕД задля забезпечення пересування електровозів згідно розкладу забезпечення обмеження швидкості руху, сил тяги та електрогальмування згідно параметрів ЕРС і вимог безпеки пересування; захист електрообладнання від пошкоджень і небезпечних режимів; виконує керування повітряним охолодженням електрообладнання та подачі стисненого повітря для пневматичних приводів; забезпечує повну автоматизацію керування ЕРС [11-13].

Розрізняють системи керування ЕРС на [14]:

- ❖ СК без перетворювачів, що здійснюють поетапне регулювання напруги тягового електродвигуна шляхом регулювання струму збудження і включення пускових резисторів чи перемикання числа витків обмоток трансформатора (рис. 2.1). Основні їх переваги: по-перше, простота конструкції, по-друге, більш дешеві. Проте наряду з перевагами, вони мають наступні недоліки: по-перше, значні втрати у пускових резисторах; по-друге, ступінчастість регулювання сили тяги; по-третє, складна будова колекторних

ТЕД; в четверте, знижена потужність тягових електродвигунів змінного струму [14].

❖ СК з обертовими перетворювачами (рис.2.2). Їх переваги: по-перше, забезпечують застосування тягових електродвигунів з урахуванням оптимальних параметрів і не залежать від напруги і струму в контактній мережі; по-друге, виконує плавне регулювання швидкості руху та сили тяги; по-третє, дозволяє виконувати регулювання коефіцієнту потужності. Недоліками таких систем керування вважаються велика вага електричного обладнання та досить низький ККД електровозу через багаторазове перетворення енергії [14].

❖ СК з статичним перетворювачем, в яких застосовують перетворювачі з ртутними та напівпровідниковими елементами (рис. 2.3). Розрізняють п'ять видів електровозів з таким видом системи керування: до перших відносять електровози з використанням одноанодних ртутних випрямлячів, до других – електровози з кремнієвими діодами; треті – електровози з тиристорами; четверті – електровози повністю керованими тиристорами (GTO); п'яті – електровози з силовими напівпровідниковими приладами IGBT і IGCT [14].

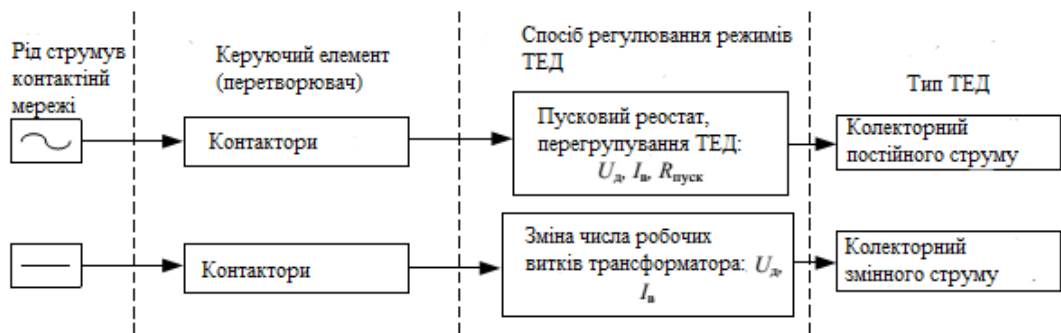


Рисунок 2.1 – Системи керування ЕРС без перетворювачів

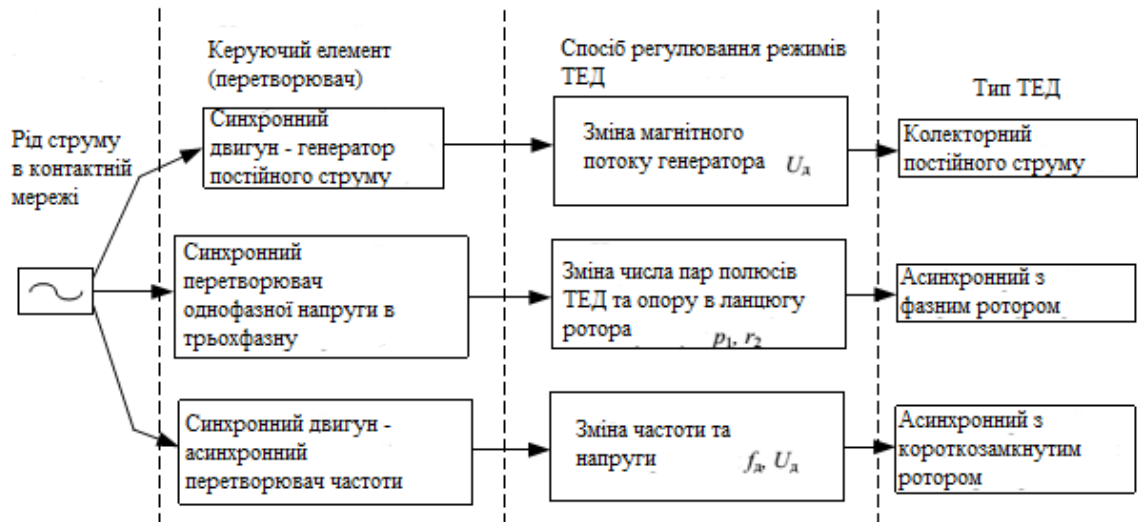


Рисунок 2.2 – Системи керування ЕРС з обертовими перетворювачами

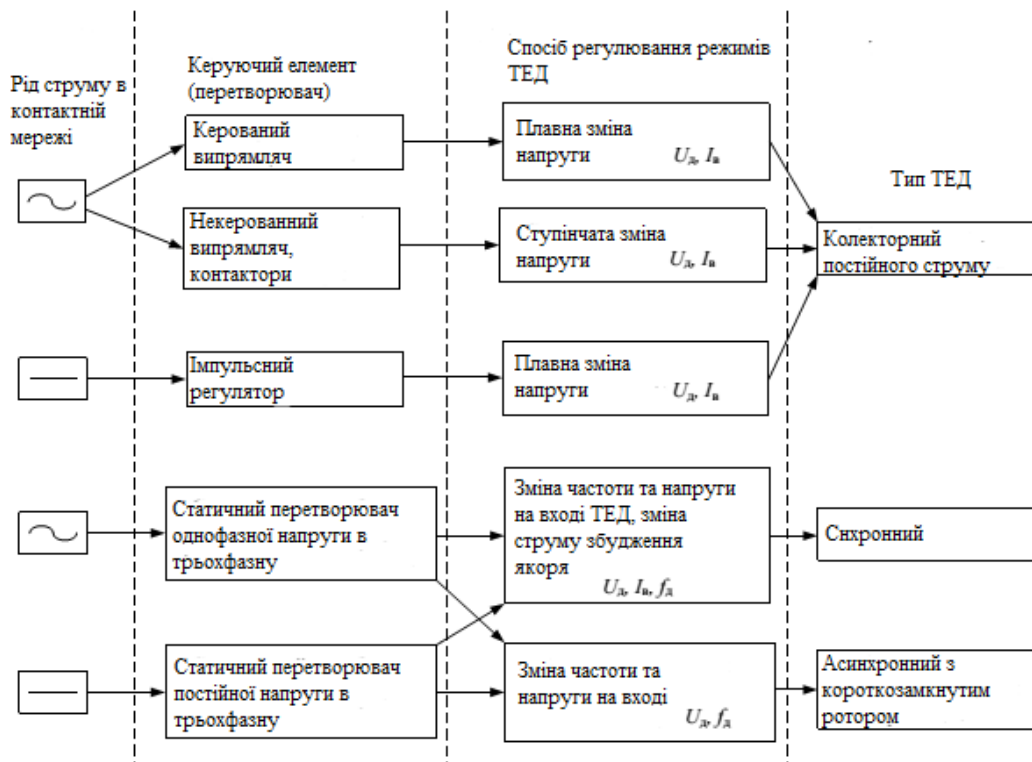


Рисунок 2.3 – Системи керування ЕРС з статичними перетворювачами

Всі вище описані системи керування ЕРС характеризують якість певними параметрами, до яких відносять наступні [12-16]:

- ❖ здатність регулювання забезпечує плавне регулювання швидкості руху та сили тяги та дозволяє показати реалізацію обмежень тягових і гальмівних характеристик [12-13];

❖ енергетична ефективність забезпечується її підвищенням за рахунок збільшення коефіцієнту корисної дії (ККД) η і коефіцієнтом потужності K_m , тобто їх значення не повинні бути для першого менше 0,9 та для другого не менш 0,86 [14];

❖ габаритні та вартісні характеристики. За умови зменшення цих показників забезпечується підвищення потужності електровозу за умови збереження навантаження на колісну пару та згідно однієї і тієї ж потужності зменшити його довжину, знизити вагу механічної частини та його вплив на шлях [14, 16];

❖ надійність залежить від загальної кількості елементів СК та їх якості, тому необхідно виконувати комплектацію такими елементами, що забезпечуватимуть тривалу роботи за умови вібрації і змін температурних показників (ГОСТ 17516.1-90Е і ГОСТ 15150-80) [15];

❖ безпека при обслуговуванні забезпечується за умови автоматизації керування ЕРС, а самі вимоги пожежної безпеки встановлені згідно ГОСТ 12.1.004-85 [14, 16].

Забезпечення реалізації основних задач керування ЕРС шахтних електровозів. Забезпечення режиму пересування електровозу з урахуванням постійної швидкості руху за умови зниженої витрати енергії при заданому часу руху (відрізок t_4 - t_5 на рис. 2.4). Проте, швидкість руху електровозу не може бути постійною через зупинки на виробках та обмежень його руху, у зв'язку з цим є необхідність зміни значення швидкості руху. Для цього застосовується такий рух, як рівноприскорений або рівноуповільнений, тобто $dv/dt = const$ (відрізок t_2 - t_3 на рис. 2.4). Однак необхідно враховувати, що при різкій зміні параметру прискорення отримується удар, що забезпечує створення додаткових навантажень на будову електровозу, тому, з урахуванням цього, виконується передбачення плавної його зміни з підтриманням постійного темпу, тобто $d^2V/dt^2 = const$ (відрізок t_1 - t_2 і t_3 - t_4 на рис. 2.4) [12].

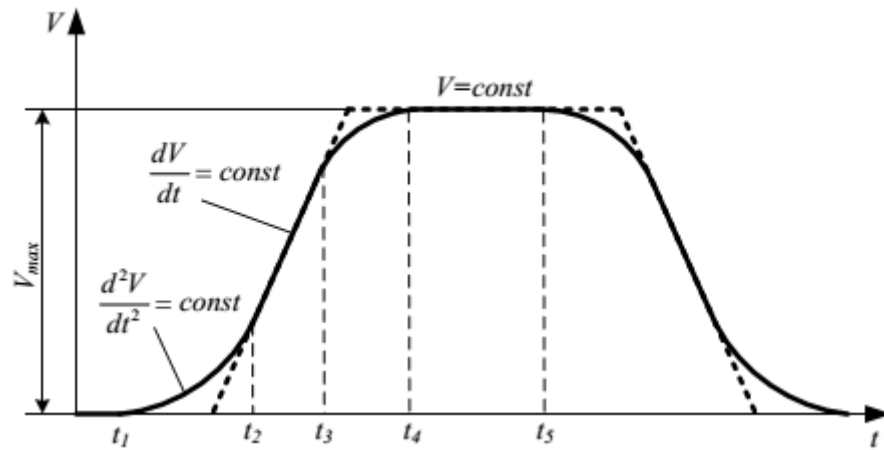


Рисунок 2.4 – Режими пересування (руху) електровозу

З вище написаного можна побачити, система керування передбачає три режими пересування електровозу, а саме $V = const$, $dV/dt = const$ і $d^2V/dt^2 = const$. Враховуючи реальну форму тягової характеристики використання вибігання, сама залежність $V(t)$ буде виглядати наступним чином (рис. 2.5).

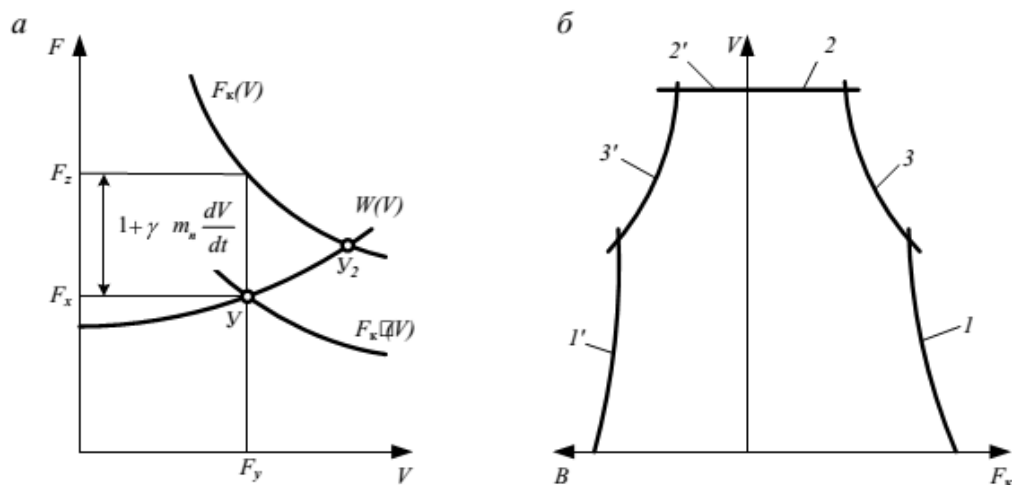


Рисунок 2.5 – Залежності реалізації режимів пересування (руху) електровозу:

а – визначення швидкості руху; б – обмеження тягових характеристик

Швидкість пересування електровозу, що є сталою, визначається тоді, коли сила тяги та сила опору руху є рівними, тобто є точкою перетину характеристики повного опору руху $W(V)$ і тягової характеристики $F_k(V)$ (рис. 2.5, а). Коли необхідно визначення прискорення dV/dt за умови тієї ж швидкості руху електровозу, змінюється тягова характеристика ($F_k'(V)$) так,

щоб сила тяги була рівною [12]:

$$F_z = F_y + 1 + \gamma \cdot m_n \cdot \frac{dV}{dt} \quad (2.1)$$

Причому m_n – вага електровозу;

$1 + \gamma$ – коефіцієнт, що враховує інерцію оберткових частин електровозу [12].

Тоді у відповідності до зміни тягової характеристики $F_{\kappa}'(V)$ встановлений рух буде в точці V_2 (рис. 2.5, а).

У зв'язку з тим, що існує досить різноманітних умов руху електровозу, то перед системами керування ЕРС виникає завдання по забезпеченню реалізації режимів руху електровозу згідно будь-яких точок в границях існуючих обмежень тягової характеристики ЕРС $F_{\kappa}(V)$ по зчепленню колісних пар – 1, по швидкості руху – 2 та по допустимому режиму роботи тягового електродвигуну – 3 (рис. 2.5, б). Такі ж самі обмеження є і для гальмівних характеристик $B(V)$ (1', 2' та 3' на рис. 2.5, б).

Виконання даної вимоги здійснюється повністю тільки у випадку, коли виконується плавне регулювання режиму роботи тягового електродвигуну. У випадку ступінчатого регулювання швидкості руху електровозу зміна опору руху потребує переходу з однієї тягової характеристики на іншу, тоді стала швидкість V_{cm} прийматиме значення в наступних межах $V_2 < V_{cm} < V_1$. Відхилення встановленої швидкості руху від максимально допустимої V_1 враховуються коефіцієнтом нерівномірності регулювання швидкості [12]:

$$K_{HV} = \frac{\Delta V}{V_{cp}} = \frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2} \quad (2.2)$$

Причому

$$V_{cp} = 0.5 \cdot V_1 + V_2 \quad (2.3)$$

$$\Delta V = 0.5 \cdot V_1 - V_2 \quad (2.4)$$

Електровози за умови ступінчатого регулювання коефіцієнт нерівномірності мають в межах 0,03-0,06; причому нижнє значення відповідає електровозам змінного струму. У випадку плавного регулювання даний коефіцієнт дорівнює нулю [12].

Рівномірний прискорений рух електровозу за частую реалізується за умови пуску, у випадку коли його швидкість зростатиме від 0 до V_2 (рис. 2.6, а). СК з плавним регулюванням режиму роботи тягового електродвигуну забезпечує сталість сили тяги $F_3 = const$ в даному діапазоні зміни швидкостей [12].

Ступінчатє регулювання сил тяги за умови переходу з однієї тягової характеристики на іншу супроводжується зміною сил тяги F в границях $F_4 < F < F_3$ [12].

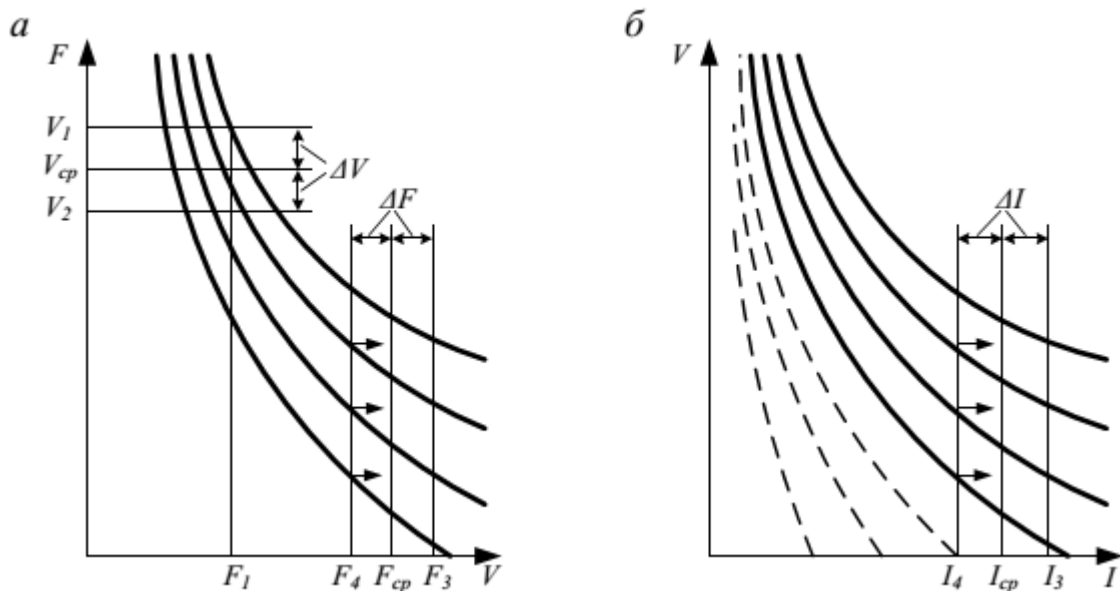


Рисунок 2.6 – Залежності ступінчатої зміни режимів руху: а – ступінчатє регулювання швидкості і сил тяги; б – коливання пускового струму

Колівання сил тяги при ступеневому регулюванні характеризується

коефіцієнтом нерівномірності пускової сили тяги K_{HF} [12, 14]:

$$K_{HF} = \frac{\Delta F}{F_{cp}} = \frac{F_3 - F_4}{F_3 + F_4} \quad (2.5)$$

$$F_{cp} = 0.5 \cdot (F_3 + F_4) \quad (2.6)$$

$$\Delta F = 0.5 \cdot (F_3 - F_4) \quad (2.7)$$

Однак при відсутності пристроїв на ЕРС для безпосереднього вимірювання сили тяги, тоді її величину визначають за непрямым показником, а саме струмом ТЕД [14]:

$$F = C \cdot \Phi \cdot I \quad (2.8)$$

C – постійний коефіцієнт, який залежить від певних параметрів тягових електродвигунів та тягової передачі;

Φ – магнітний потік, що виникає у тягових електродвигунах [14].

Плавність ступінчатого пуску ТЕД, що зазвичай використовуються на практиці, коефіцієнтом нерівномірності пускового струму K_{HI} (рис. 2.6, б) [12, 14]:

$$K_{HI} = \frac{\Delta I}{I_{cp}} = \frac{I_3 - I_4}{I_3 + I_4} \quad (2.9)$$

$$I_{cp} = 0.5 \cdot (I_3 + I_4) \quad (2.10)$$

$$\Delta I = 0.5 \cdot (I_3 - I_4) \quad (2.11)$$

Системи керування ЕРС ускладнюються за умови збільшення кількості

ступенів пуску, навіть тоді, коли при зниженні K_{HI} пуск становиться більш плавним, причому зі збільшенням пускового прискорення вимоги до плавності пуску зростають.

2.3 Аналіз забезпечення керування тяговими асинхронними електродвигунами

На даний час регулювання швидкості обертання тягового асинхронного електродвигуна (ТАЕД) в умовах ЕРС досить важко. На ЕРС використовують ТАЕД з короткозамкненим ротором через те, що вони характеризуються високою надійністю, простотою при обслуговуванні, а також великою потужністю і їх використання дозволяє збільшити коефіцієнт зчеплення коліс з рейками через жорсткість їх характеристик [14].

Задля забезпечення регулювання швидкості обертання ТАЕД на ЕРС використовують різноманітні перетворювачі, що дозволяють живити обмотки статора багатофазною, загалом трифазною, змінною напругою певної частоти та величини. В сучасних умовах в основному використовують автономні інвертори напруги (АІН) для енергоживлення ТАЕД електровозів, схема якої зображена на рисунку 2.7 [14-15].

Згідно рис. 2.7 на вході АІН розташовується вхідний конденсатор, що забезпечує зниження коливань напруги. Автономний інвертор напруги складається з перемикаючих ключів, що працюють за певним алгоритмом та забезпечують зміну потенціалу на обмотках ТАЕД за умови створення в них змінного струму. На рисунку 2.8 наведені механічні характеристики ТАЕД за умови зміни величини та частоти напруги, що подається [17].

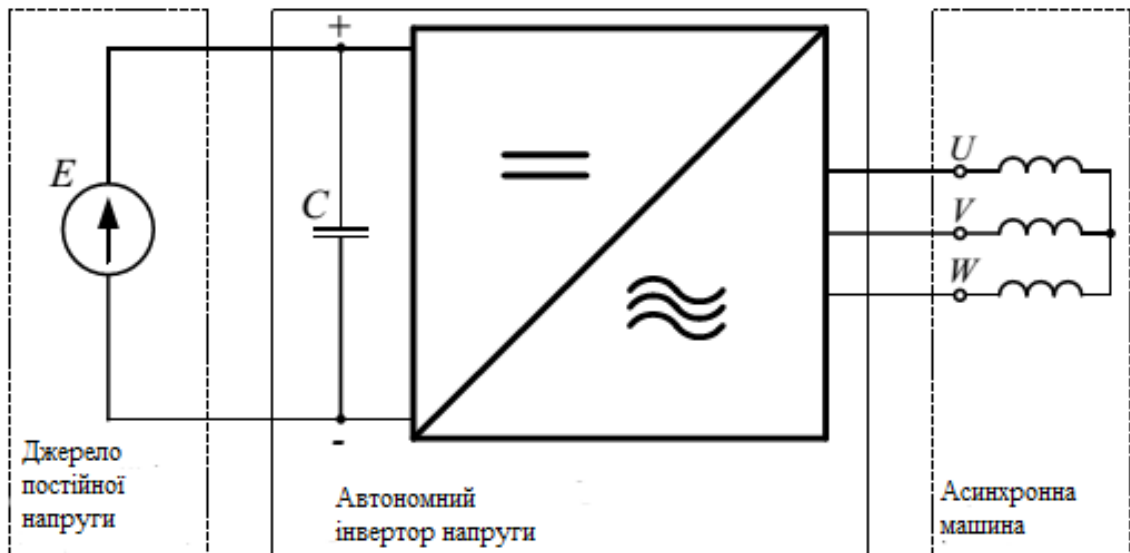


Рисунок 2.7 – Загальна принципова схема енергоживлення ТАЕД на ЕРС

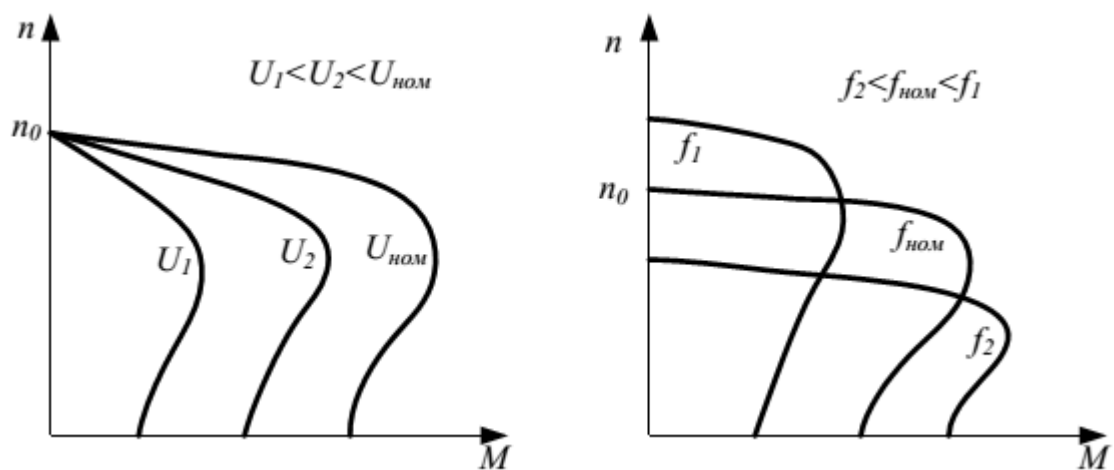


Рисунок 2.8 – Механічні характеристики ТАЕД за умови зміни величини (а) і частоти (б) напруги, від якої здійснюється енергоживлення

Визначення електромагнітного моменту ТАЕД здійснюється за виразом [17]:

$$M_e = \frac{p \cdot m \cdot w_1}{\sqrt{2}} \cdot K_{об} \cdot \Phi \cdot I'_2 \cdot \cos \psi_2 \quad (2.12)$$

p – кількість пар полюсів ТАЕД [17];

m – загальна кількість фаз обмотки статора ТАЕД [17];

w_1 – загальна кількість витків обмотки статора на полюс і фазу ТАЕД [17];

K_{ob} – певний обмотувальний коефіцієнт статора ТАЕД [17];

Φ – магнітний потік статора ТАЕД [17];

I'_2 – діючий струм ротора ТАЕД, що приведений до обмотки його статора [17];

ψ_2 – кут, який визначається між Φ і I'_2 за наступною формулою [17]:

$$\cos \psi_2 = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + (2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot L_{2s})^2}} \quad (2.13)$$

r_2 – еквівалентний активний опір стрижня обмотки ротора ТАЕД [17];

f_s – частота ковзання ТАЕД [17];

L_{2s} – індуктивність розсіювання обмотки ротора [17].

При пуску ТАЕД задля забезпечення сталості моменту на його валу потрібна підтримка сталості частоти струму в роторі, причому визначення частоти напруги і струму в обмотках статора забезпечується наступним виразом [18]:

$$f_1 = \frac{p \cdot n_2}{60} + f_s = \frac{p \cdot \mu}{\pi \cdot D_k} \cdot V + f_s \quad (2.14)$$

n_2 – певна частота обертання ротора ТАЕД [18];

μ – передавальне число редуктора ТАЕД [18];

D_k – діаметр колеса електровозу [18];

V – швидкість пересування електровозу [18].

Враховуючи вище написане, необхідно визначати функції регулювання параметрів тягових асинхронних електродвигунів. Так на рисунку 2.9 зображено залежність величини фазної напруги енергоживлення обмотки статора U_a в діапазоні частот обертання ротора, причому дана величина збільшується пропорційно частоті за умови її постійного підтримання від

номінальної до максимальної величини. Забезпечення стабільності номінального магнітного потоку ТАЕД в діапазоні частот обертання ротора від нуля до номінального значення та його природного спокійного послаблення, яке зворотно пропорційне підвищенню частоти в діапазоні від номінального до максимального значення, показано на рисунку 2.10. На наступному рисунку 2.11 зображена залежність регулювання частоти фазної напруги енергоживлення обмотки статора ТАЕД f_1 від частот обертання його ротора, що дозволяє підтримувати близьке значення до величини синхронної частоти f_s , за наступних умов [14, 17]:

- ❖ у випадку, коли частота струму обмотки статора ТАЕД є рівною синхронній частоті $f_1 = f_s$, то його крутний момент дорівнюватиме нулю;
- ❖ у випадку, коли частота струму обмотки статора ТАЕД трохи завищене від значення синхронної частоти $f_1 > f_s$, то розвивається тяговий момент на валу електродвигуна;
- ❖ у випадку, коли частота струму обмотки статора ТАЕД нижча за значення синхронної частоти $f_1 < f_s$, то розвивається гальмівний момент на валу електродвигуна [14, 17].

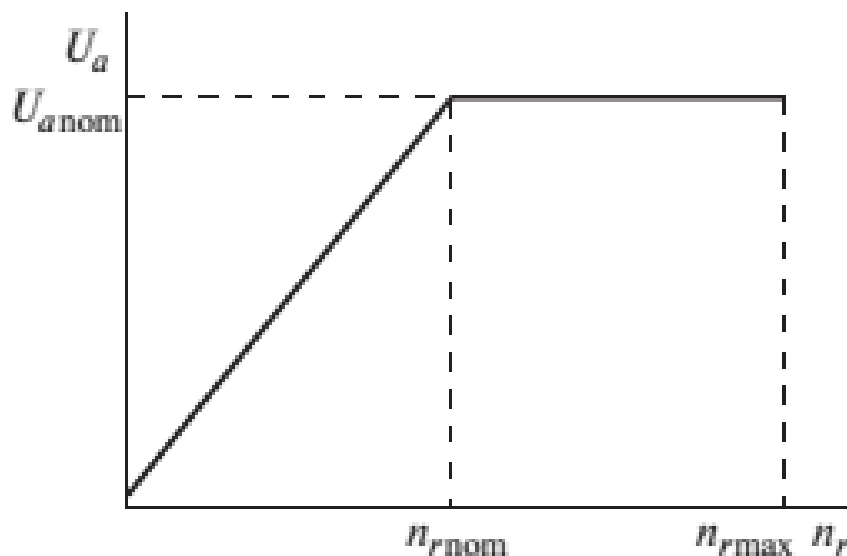


Рисунок 2.9 – Зображення функції регулювання значення фазної напруги U_a від частоти обертання ротора n_r за умови частотного керування ТАЕД

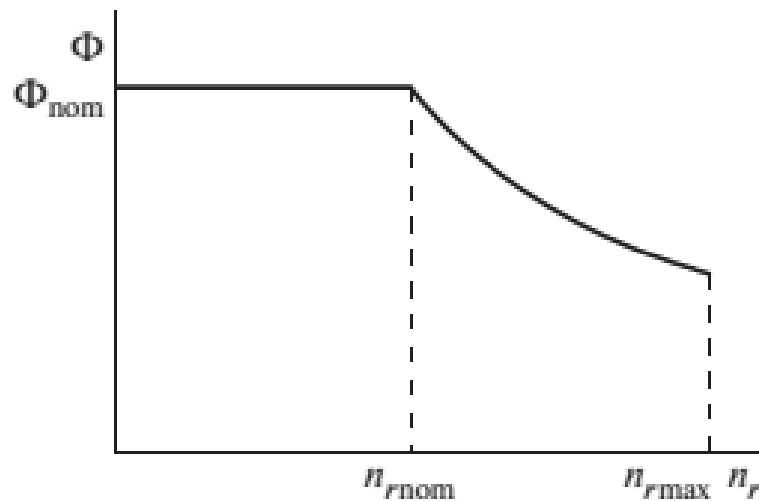


Рисунок 2.10 – Динаміка зміни магнітного потоку Φ в залежності від частоти обертання ротора n_r за умови частотного керування ТАЕД



Рисунок 2.11 – Зображення функції регулювання значення частоти фазної напруги f_1 від частоти обертання ротора n_r за умови частотного керування ТАЕД

За цих умов функція регулювання модулю різниці частот струму обмотки статора ТАЕД і синхронної частоти $\Delta f = |f_1 - f_s|$ дозволяють плавну

зміну величини крутного моменту на валу електродвигуна в межах від нуля до максимального показника за умови режимів тяги та електричного гальмування. Загалом частотне керування з описаними вище принципами забезпечує стійку роботу в будь-якій точці діапазону, який обмежений граничними електромеханічними показниками електродвигуна за умов режиму тяги і режиму електричного гальмування (рис. 2.12). Відповідні регульовальні можливості ТАЕД вважаються оптимальними для сил тяги та реалізуються при живленні електродвигунів від статичного перетворювача, що здатен сформувати на виході трифазну напругу регульованої величини і частоти [17].



Рисунок 2.11 – Робоча область ТАЕД за умови його частотного керування

2.4 Аналіз силових перетворювачів, що застосовуються для енергоживлення тягових асинхронних електродвигунів

З вище написаного видно, що на існуючих ЕРС для енергоживлення

тягових асинхронних електродвигунів використовують АІН, які за будовою бувають дворівневі (рис. 2.12, а) та трирівневі (рис. 2.12, б). Найбільш поширеними вважаються перший тип АІН. Вони створюють на кожній фазі будь-який один з чотирьох рівнів напруги, а саме $\frac{2}{3}U_d$, $\frac{1}{3}U_d$, $-\frac{1}{3}U_d$, $-\frac{2}{3}U_d$ (рис. 2.13). Проте, в порівнянні з дворівневими АІН, три рівневі мають сім рівнів напруги, а саме $\frac{2}{3}U_d$, $\frac{1}{2}U_d$, $\frac{1}{3}U_d$, 0 , $-\frac{1}{3}U_d$, $-\frac{1}{2}U_d$, $-\frac{2}{3}U_d$. Тобто вихідна напруга трирівневих АІН вважається більш синусоїдальним в порівнянні з дворівневими [17].

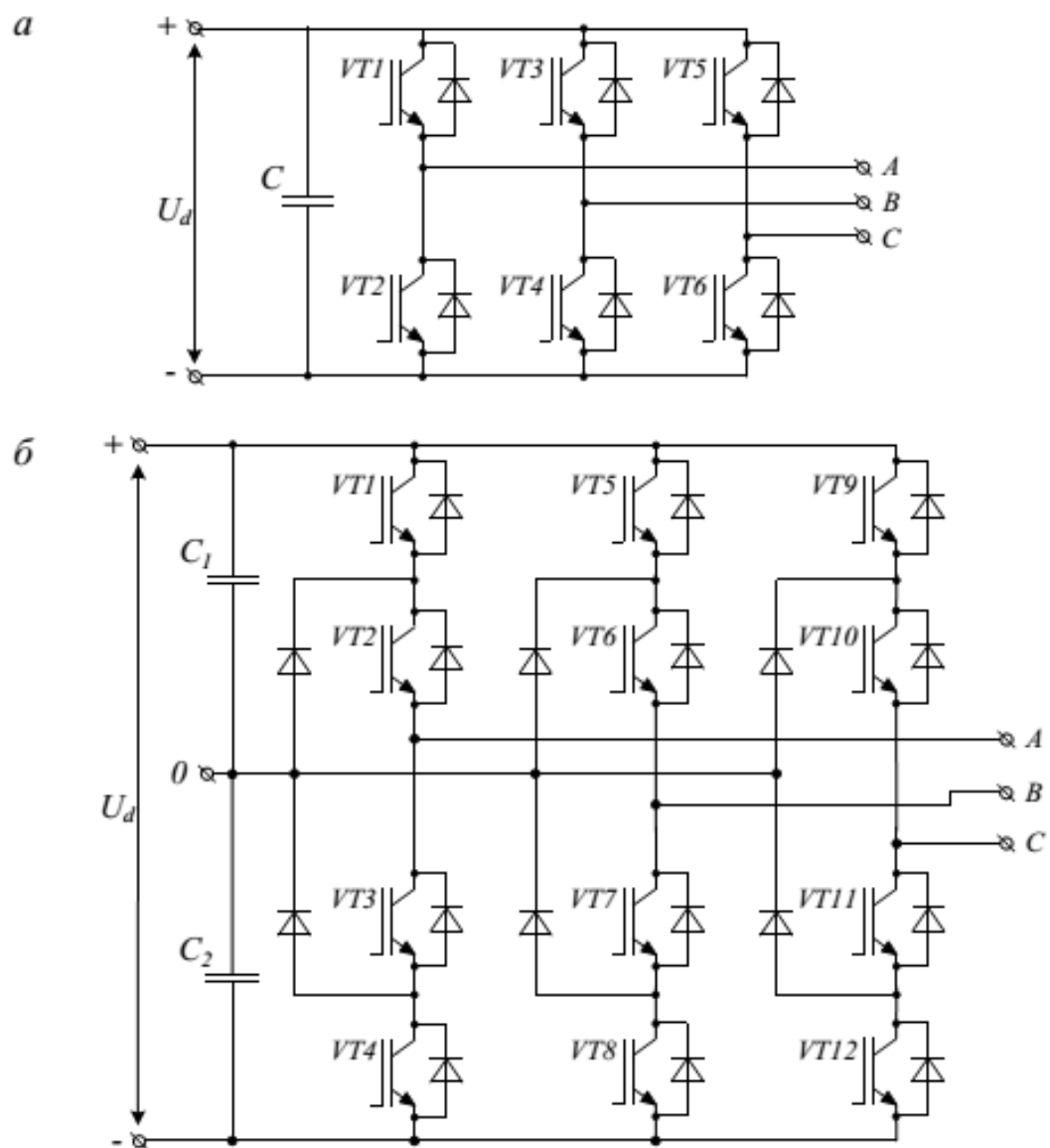


Рисунок 2.12 – Автономні інвертори напруги задля енергоживлення ТАЕД:
дворівневі (а) та трирівневі (б)

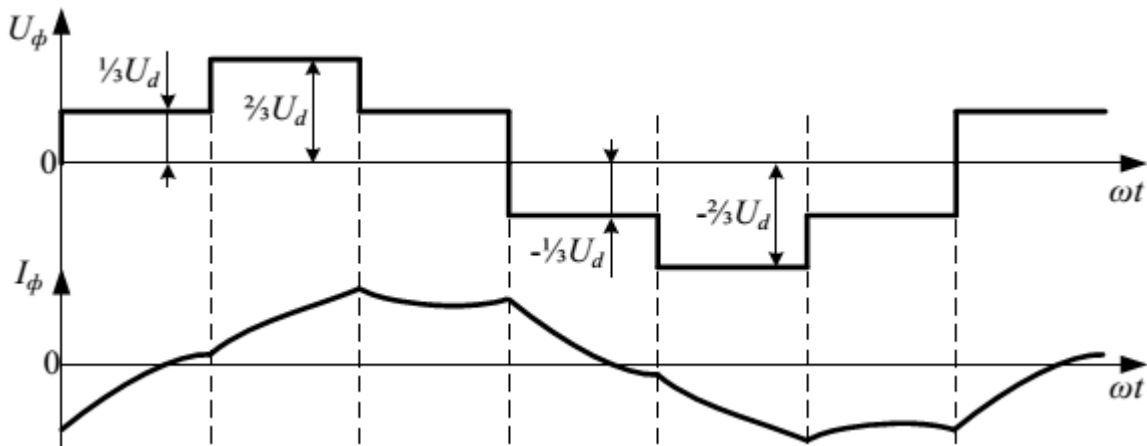


Рисунок 2.13 – Динаміка фазної напруги на виході дворівневого АІН

Функціонування трирівневого автономного інвертору напруги. З урахуванням різного поєднання відкритих транзисторів автономних інверторів напруги кожна вихідна фаза підключається до трьох точок вхідної напруги «+», «0», «-». Якщо в діапазоні часу Δt_1 виконується відкриття транзисторів $VT_2, VT_3, VT_5, VT_6, VT_{11}, VT_{12}$, то забезпечується підключення фази A до «0», фази B – «+» та фази C – «-». Обмотки фаз B і C послідовно підключені між зажимами вхідної напруги U_d , тоді напруга на них складає $\frac{1}{2}U_d$ і $-\frac{1}{2}U_d$. Якщо в діапазоні часу Δt_2 транзистор VT_3 буде закритим і VT_1 відкритим, то відкритими становляться транзистори $VT_1, VT_2, VT_5, VT_6, VT_{11}, VT_{12}$ і забезпечується підключення фаз A і B до «+» та фази C – «-». Коли обмотки A і B з'єднані паралельно та обмотка фази C підключені послідовно, то напруга на фазах A і B – $\frac{1}{3}U_d$; C – $-\frac{2}{3}U_d$ [17].

Інші діапазони часу за умови відкритих транзисторів та точки підключення фаз і їх напруга на наведені на рисунку 2.14.

а)

Інтервал часу	Відкриті транзистори	Точки підключення фаз			Потенціали напруги на фазах		
		A	B	C	A	B	C
Δt_1	VT2, VT3, VT5, VT6, VT11, VT12	0	+	-	0	$\frac{1}{2}U_d$	$-\frac{1}{2}U_d$
Δt_2	VT1, VT2, VT5, VT6, VT11, VT12	+	+	-	$\frac{1}{3}U_d$	$\frac{1}{3}U_d$	$-\frac{2}{3}U_d$
Δt_3	VT1, VT2, VT6, VT7, VT11, VT12	+	0	-	$\frac{1}{2}U_d$	0	$-\frac{1}{2}U_d$
Δt_4	VT1, VT2, VT7, VT8, VT11, VT12	+	-	-	$\frac{2}{3}U_d$	$-\frac{1}{3}U_d$	$-\frac{1}{3}U_d$
Δt_5	VT1, VT2, VT7, VT8, VT10, VT11	+	-	0	$\frac{1}{2}U_d$	$-\frac{1}{2}U_d$	0
Δt_6	VT1, VT2, VT7, VT8, VT9, VT10	+	-	+	$\frac{1}{3}U_d$	$-\frac{2}{3}U_d$	$\frac{1}{3}U_d$
Δt_7	VT2, VT3, VT7, VT8, VT9, VT10	0	-	+	0	$-\frac{1}{2}U_d$	$\frac{1}{2}U_d$
Δt_8	VT3, VT4, VT7, VT8, VT9, VT10	-	-	+	$-\frac{1}{3}U_d$	$-\frac{1}{3}U_d$	$\frac{2}{3}U_d$
Δt_9	VT3, VT4, VT6, VT7, VT9, VT10	-	0	+	$\frac{1}{2}U_d$	0	$-\frac{1}{2}U_d$
Δt_{10}	VT3, VT4, VT5, VT6, VT9, VT10	-	+	+	$-\frac{2}{3}U_d$	$\frac{1}{3}U_d$	$\frac{1}{3}U_d$
Δt_{11}	VT3, VT4, VT5, VT6, VT9, VT10	-	+	0	$-\frac{1}{2}U_d$	$\frac{1}{2}U_d$	0
Δt_{12}	VT3, VT4, VT5, VT6, VT9, VT10	-	+	-	$-\frac{1}{3}U_d$	$\frac{2}{3}U_d$	$-\frac{1}{3}U_d$

б)

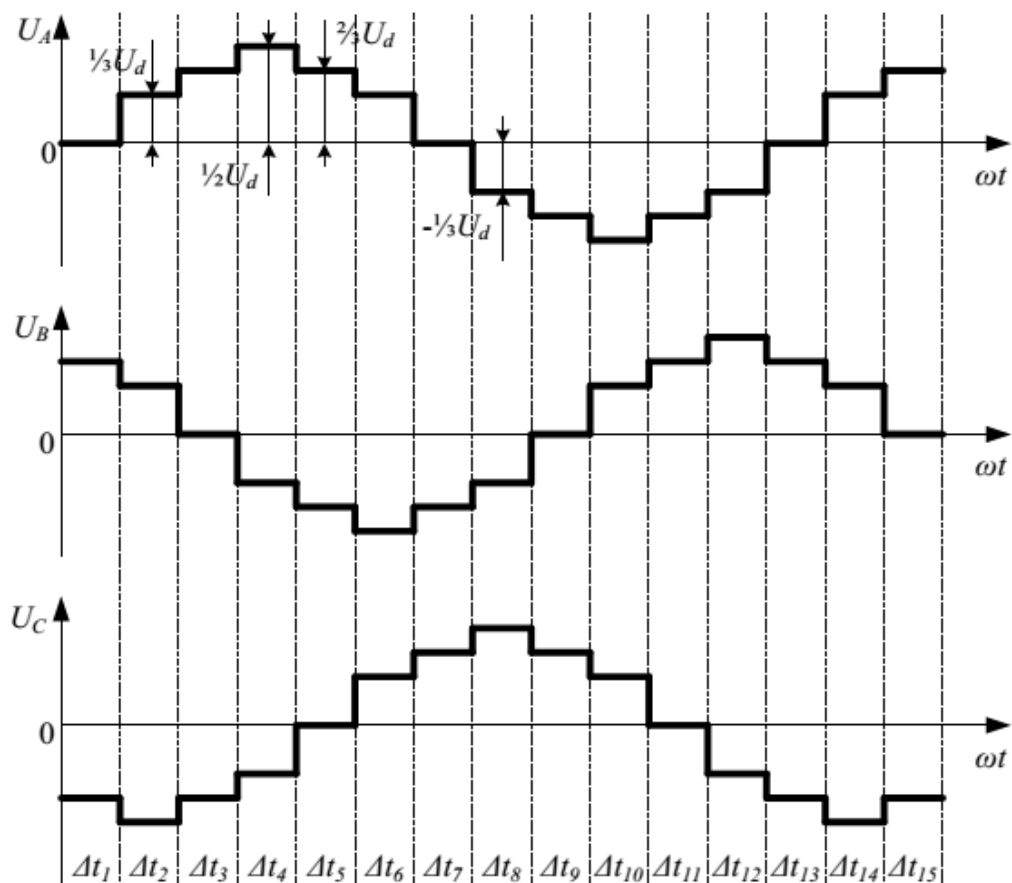


Рисунок 2.14 – Точки підключення фаз і їх напруга (а) та осцилограми напруги на виходах трирівневих АІН (б)

Автономні інвертори напруги в діапазонах Δt_{13} і Δt_{14} працюють аналогічно діапазонам Δt_1 і Δt_2 . Поінтервальне з'єднання обмоток ТАЕД за умови енергоживлення трирівневим АІН наведено на рисунку 2.15. У порівнянні трирівневих АІН з дворівневими, вони позитивно впливають на роботу ТАЕД та забезпечують застосування транзисторів більш нижчого класу, проте АІН вимагає в два рази більше IGBT-транзисторів і входних конденсаторів. Також при його експлуатації виконується в два рази більше комутацій струму в транзисторах, викликаючи таким чином значні енерговитрати в АІН. Тоді при розробці систем керування ЕРС і вибору конкретного АІН потрібно шукати компроміс між вартістю перетворювача та енерговитратами в перетворювачі і ТАЕД [17-19].

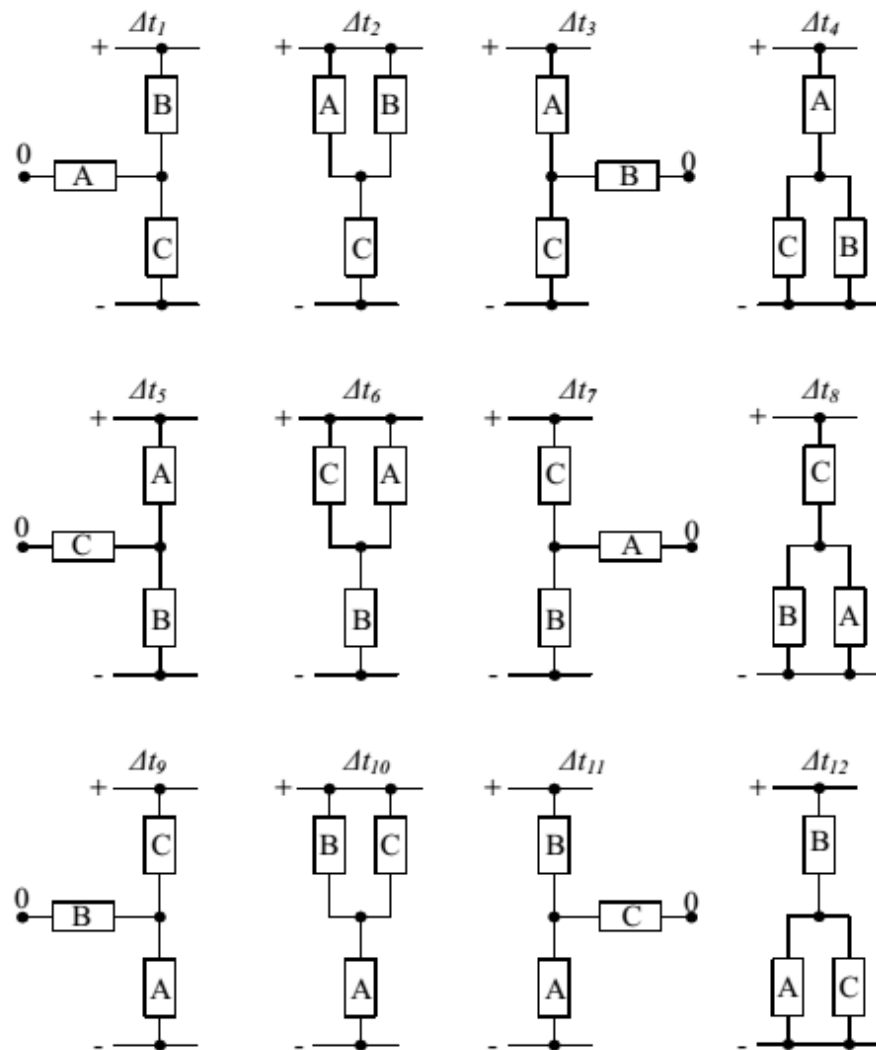


Рисунок 2.14 – Схеми з'єднання обмоток ТАЕД за умови енергоживлення трирівневим АІН

Також для енергоживлення тягових асинхронних електродвигунів використовують автономні інвертори струму (АІС), схема яких наведена на рисунку 2.15.

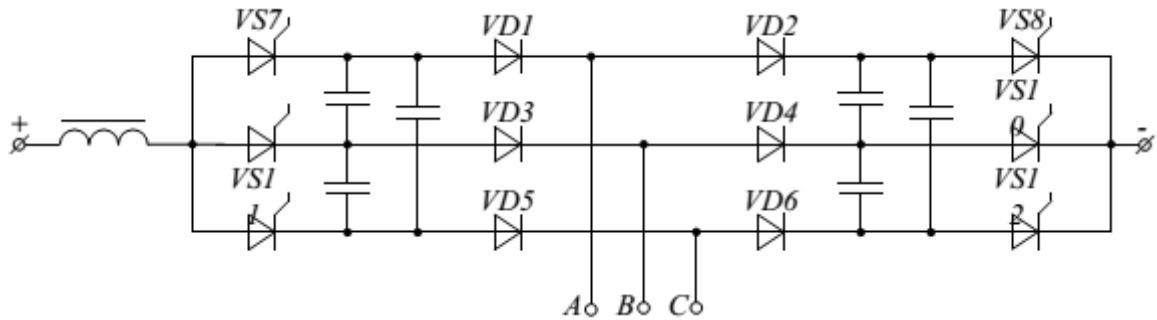


Рисунок 2.15 – Схема АІС з діодами, що відсікаються

При такій будові на вході АІС, в першу чергу, встановлюють дросель з великою індуктивністю, тоді як на його виході створюється трифазна система струмів з прямокутною формою, причому амплітуда струму на виході дорівнює значенню вхідного струму інвертора (рис. 2.16) [18].

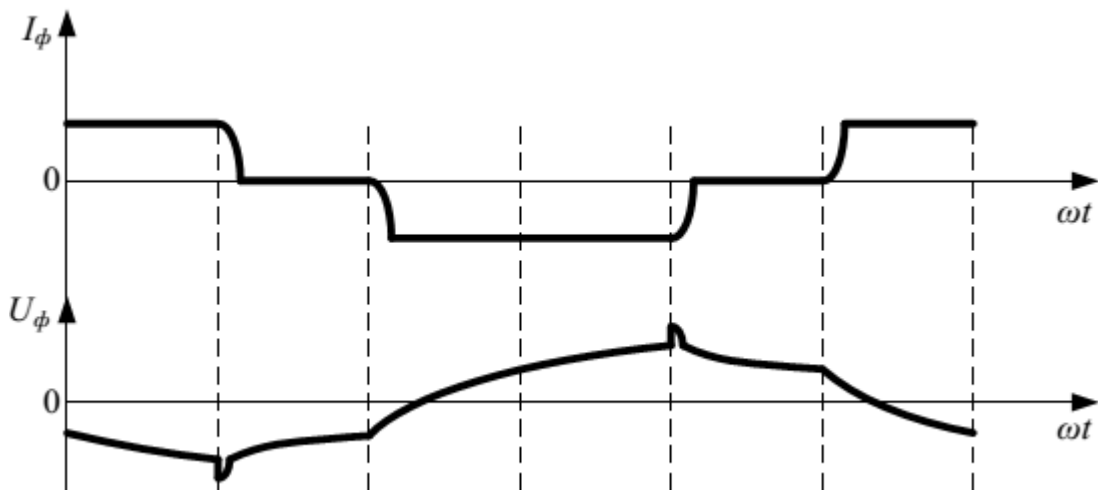


Рисунок 2.15 – Динаміка змін струму та напруги в одній фазі на виході АІС

Проте АІС є вже морально застарілими та не використовуються задля розробки нових видів ЕРС. Також вони мають значні недоліки: по-перше, не можливо регулювання величини струму на виході, по-друге, складність

переходу в режим рекуперативного гальмування; по-третє, значні коливання струму і напруги в обмотках ТАЕД.

2.5 Аналіз енергоживлення ТАЕД від статичного перетворювача

Задля енергоживлення ТАЕД за умови частотного керування застосовують трифазні статичні перетворювачі (рис. 2.16), на вхід яких завжди подається постійна згладжена напруга, тоді як на виході вони формують трифазну змінну напругу певної регульованої величини і частоти [20].

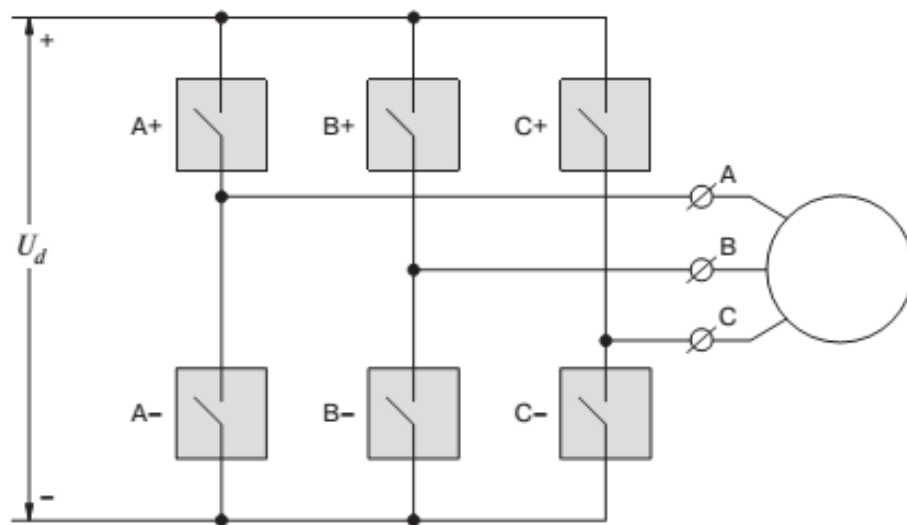


Рисунок 2.16 – Спрощена будова трьохфазного статичного перетворювача

Згідно рис. 2.16 напівпровідникові прилади позначені шістьма ключами $A +$, $A -$, $B +$, $B -$, $C +$, $C -$ та на виході фазами A , B і C , тобто складається з трьох однакових ланцюгів, що підключені паралельно до джерела постійної вхідної напруги U_d . Середня точка кожного з ланцюгів вважається вихідною клемою фази, тоді два ключі однієї фази, «плюсової» і «мінусової», дозволяють [20]: по-перше, підключення вихідної клеми фази до «+» вхідної

постійної напруги U_d за умови замкненого «+» ключа; по-друге, підключення вихідної клеми фази до «-» вхідної постійної напруги U_d за умови замкненого «-» ключа; по-третє, повна ізоляція вихідної клеми фази від джерела живлення за умови розімкнення «+» і «-» ключів.

На рисунку 2.17 представлена послідовність з шести варіантів замикання «+» і «-» ключів 3-х фаз, що дозволяє отримати трифазну змінну напругу заданої частоти на виході інвертора. Ступінчата зміна фазної напруги з рівнем по модулю $\frac{1}{3}U_d$ і $\frac{2}{3}U_d$ за умови алгоритму функціонування інвертора формується таким чином, що в будь-який момент часу трифазні обмотки електродвигуна ввімкнені згідно однієї з двох схем (рис. 2.18). Видно, що частота трифазної вихідної напруги інвертора теоретично може бути різною, проте практично обмежена властивостями напівпровідникових пристроїв, що застосовуються в якості ключів, та можливостями системи охолодження перетворювача. Останній момент пов'язаний з тим, що енерговитрати в силових напівпровідникових пристроях та будь-яких елементах самого перетворювача значно підвищуються зі збільшенням частоти перемикань струму в фазах. Сам режим формування трифазного напруги на обмотці статора ТАЕД є одноімпульсним. В даному випадку виконується забезпечення максимально можливого діючого значення вихідної фазної напруги інвертора за умови фіксованого U_d на вході інвертора, тобто величина даного значення основної гармоніки фазної напруги на виході інвертора U_a пов'язана з величиною постійної напруги на вході інвертора U_d і становить $U_a \approx 0,451 U_d$. Задля регулювання величини фазної напруги, що прикладена до обмотки статора ТАЕД, застосовують різноманітні варіанти модуляції, основна суть яких зводиться до накладання на процес перемикання фаз інвертора додаткового процесу імпульсного переривання підключення вхідної напруги інвертора U_{dk} фаз[20].

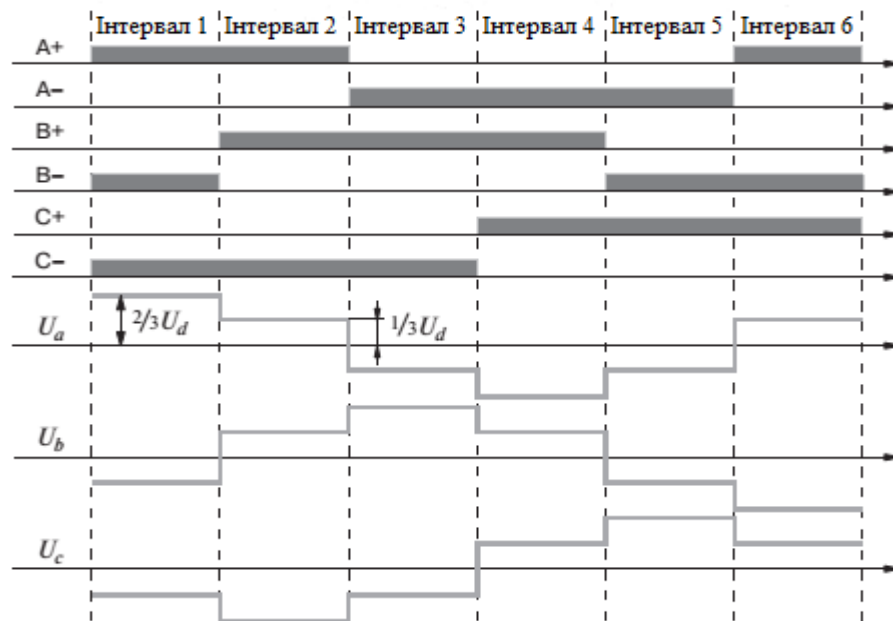


Рисунок 2.17 – Послідовність з шести комбінацій замикання ключів інвертора при формуванні трьохфазної напруги

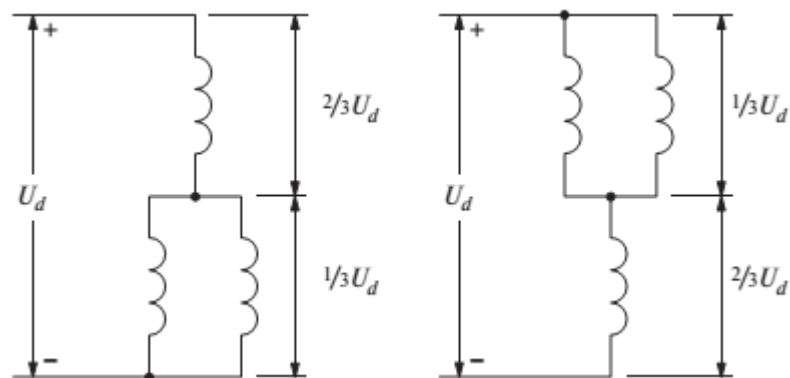


Рисунок 2.18 – Два варіанти миттєвих схем підключення фазних обмоток ТАЕД до джерела постійної напруги

2.6 Аналіз принципів керування тяговими асинхронними електродвигунами

До основних принципів керування тяговими асинхронними електродвигунами відносять наступні [12-16]: керування за абсолютною частотою ковзання, керування за кутом моменту та пряме керування

моментом.

Перший метод керування базується на залежностях струму статора і обертаючого моменту від частоти ковзання (рис. 2.19). В даному випадку частота ковзання за умови пуску обирається в залежності від $I_1(f_s)$ при $M = \text{const}$, що є U – подібний характер, і $M(I_1)$ [12-13].

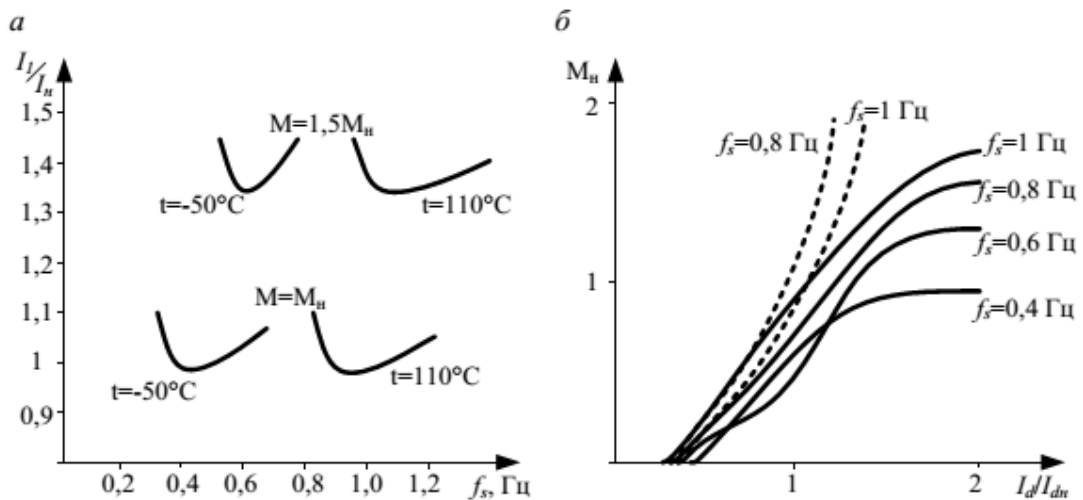


Рисунок 2.19 – Динаміка змін в залежності від частоти ковзання ТАЕД:
а – струм статора; б – обертовий момент

Згідно рисунку 2.19 можна побачити, що: по-перше, мінімум струму статора за умови різної температури відповідає різним абсолютним значенням ковзання, що відрізняються в 1,5 – 2 рази згідно зміни температури; по-друге, пускова частота обирається в залежності від значення струму задля досягнення максимального пускового моменту; по-третє, за умови підвищення температури ротора ТАЕД мінімальний струм статора зміщується в зону більших швидкостей, при цьому крива $I_1(f_s)$ становиться більш пологою.

До переваг керування за абсолютною частотою ковзання відносять просту будову системи керування. Наряду з перевагами, є незначні недоліки, а саме застосування параметричних залежностей $I_1(f_s)$ та $M(I_1)$, що відрізняються у різних двигунів однієї серії; необхідність в коригуванні частоти ковзання в залежності від температури ротора; неможливість

безпосереднього вимірювання температури обмотки короткозамкнутого ротора.

Наступний метод регулювання по куту моменту базується на визначенні кута між векторами струму статора I_1 і потокозчеплення ψ_2 . Даний кут визначається наступним чином [12]:

$$\theta = \arctg \frac{2 M_e \cdot L_2}{3 p \cdot \psi_2} \quad (2.15)$$

Даний метод є більш ефективним, ніж попередній, бо даний кут моменту не залежить від змін температури обмотки ротора ТАЕД, а через те, що не має можливості його визначення, то [12]:

$$\theta = \arctg \frac{\psi_{1\alpha} i_{1\beta} - \psi_{1\beta} i_{1\alpha}}{\psi_{1\alpha} i_{1\alpha} + \psi_{1\beta} i_{1\beta} - (L_{\sigma 1} - L_{\sigma 2})(i_{1\alpha}^2 + i_{1\beta}^2)} \quad (2.16)$$

Причому α – нерухома вісь, яка збігається з віссю фази А;

β – вісь, що зміщена на половину полюсного поділу у відповідності до осі α ;

$\psi_{1\alpha}$, $\psi_{1\beta}$, $i_{1\alpha}$, $i_{1\beta}$ – певні проекції векторів ψ_1 і I_1 на осі α і β .

Момент в даному випадку визначається за виразом [12]:

$$M_e = \frac{3}{2} p (\psi_{1\alpha} i_{1\beta} - \psi_{1\beta} i_{1\alpha}) \quad (2.17)$$

На рисунку 2.20 приведена функціональна система автоматичного керування згідно даного методу, згідно до якої автономний інвертор (АІ) необхідний задля регулювання частоти струму ТАЕД, тоді як вхідний перетворювач (ВП) застосовується задля регулювання вхідної постійної напруги АІ і струму ТАЕД. СК складається з двох контурів регулювання: до першого відносять контур регулювання кута моменту ТАЕД з підлеглим контуром регулювання частоти АІ; до другого – контур регулювання

моменту з підлеглими контурами регулювання постійної напруги і струму між ВП і АІ [14].

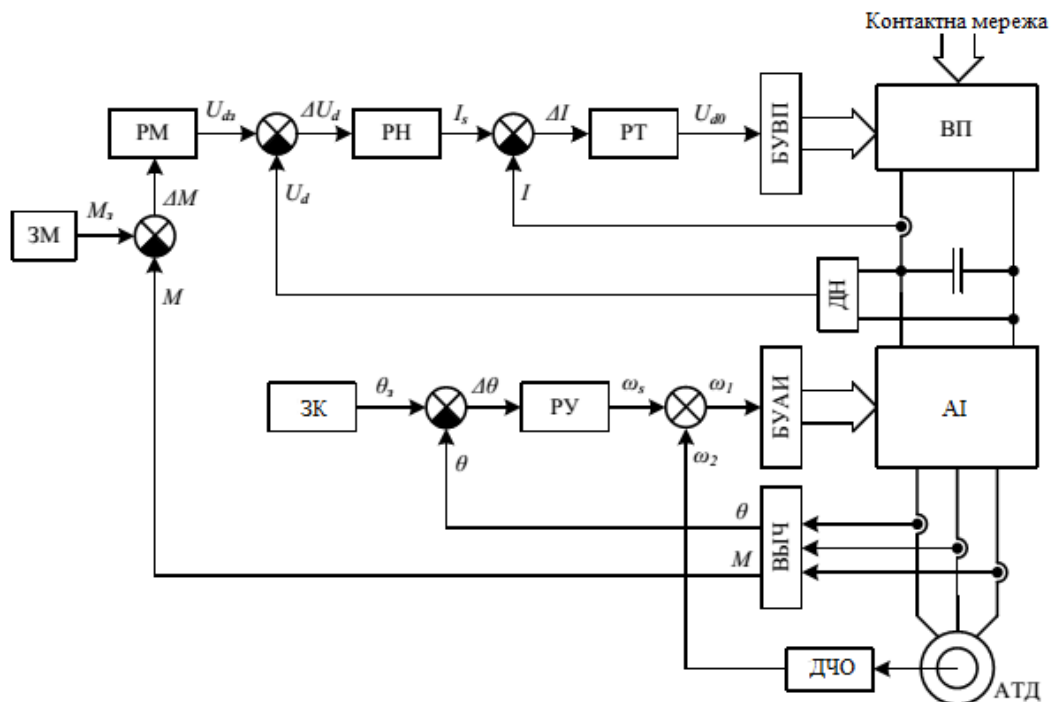


Рисунок 2.20 – Схема системи автоматичного керування за кутом моменту

Згідно рис. 2.20 основні позначення наступні: ВП – вхідний перетворювач; АІ – автономний інвертор; БУВП, БУАІ – блоки керування вхідним перетворювачем та автономним інвертором; РМ, РН, РІ, РЧ – регулятори моменту, напруги, струму та кута; ДС, ДН, ДЧО – датчики струму, напруги та частоти обертання; ЗМ, ЗК – датчик моменту та кута; ОП – обчислювальний пристрій [14].

До недоліку цього методу відносять наявність значної кількості датчиків та складність системи керування.

У випадку системи прямого керування моментом, сам обертаючий момент ТАЕД є пропорційним векторному добутку потокозчеплення статора ψ_1 і ротора ψ_2 . На рисунку 2.21 представлений метод прямого керування електромагнітним моментом ТАЕД, що забезпечує комутацію ключів інвертора таким чином, щоб перехід від одного певного положення вектору напруги статора ТАЕД до наступного забезпечував потрібні значення потокозчеплення статора ψ_1 і кута γ між векторами потокозчеплення ψ_1 і

струмом ротора I_2 [14].

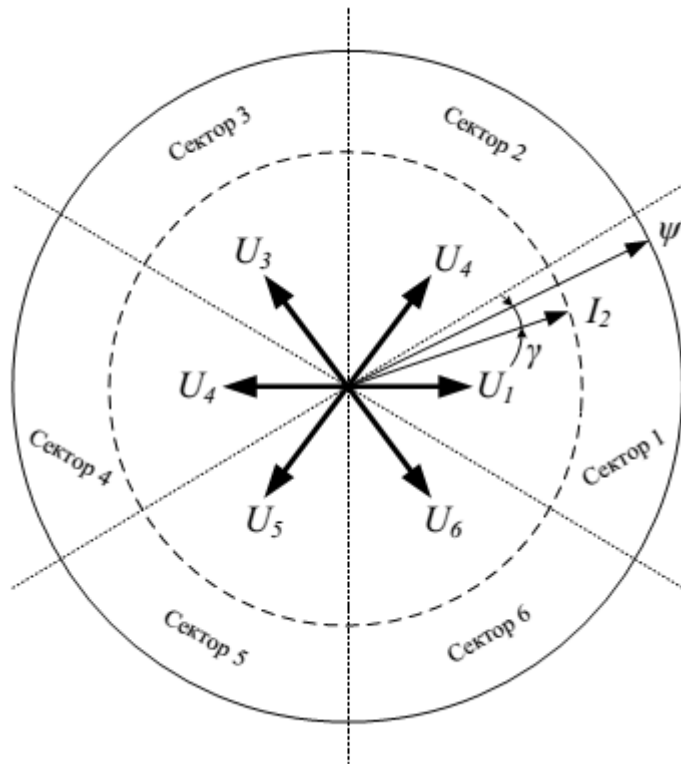


Рисунок 2.21 – Певне положення вектора напруги статора ТАЕД

На рисунку 2.22 зображена узагальнена будова системи прямого керування моментом, згідно якої вказівник інтенсивності ЗІ виконує формування сигналу заданої частоти обертання ротора ω_{23} , який забезпечує розгін з постійним прискоренням та стабілізацію швидкості на потрібному рівні. Потім даний сигнал направляється через низькочастотний фільтр першого порядку Φ та виконується порівняння з фактичним значенням швидкості ротора ω_2 , який визначається блоком БВС. Пропорційно-інтегральний регулятор швидкості РС і ланка обмеження ЗО забезпечують задане значення моменту M_{o3} [16-17].

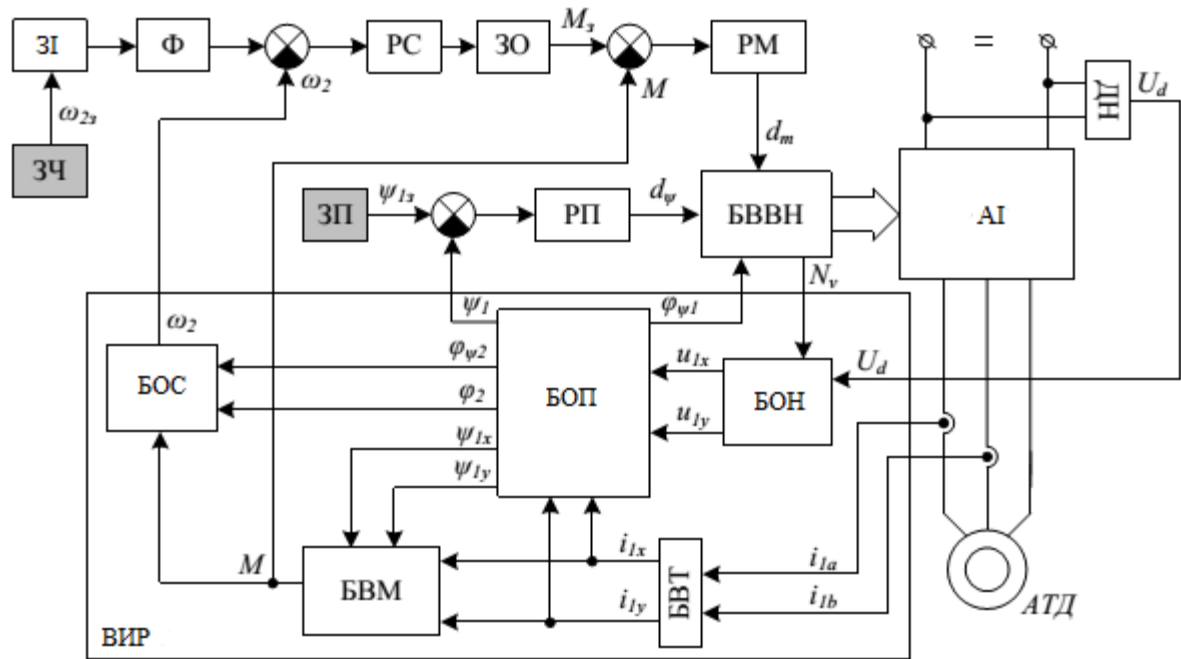


Рисунок 2.22 – Спрощена будова системи автоматичного керування за умови прямого керування електромагнітним моментом

Позначення схеми (рис. 2.22): ЗЧ, ЗМ, ЗІ – датчики частоти обертання ротора, моменту та інтенсивності; ЛО – ланка обмеження; БОШ, БОН, БОС, БОП, БОМ – блоки визначення швидкості, напруги, струму, потоку, моменту; БВВН – блок вибору вектора напруги; РМ, РП – релейні регулятори моменту та потоку статора [17].

Головною частиною прямого керування електромагнітного моменту вважається обчислювальний пристрій ОП, який містить блоки БОН, БОС, БОП, БОМ і БОШ. Дані блоки виконують розрахунки за наступними виразами [17]:

$$\psi_1 = \int (U_1 - I_1 r_1) dt \quad (2.18)$$

$$\psi_2 = \frac{L_2}{L_{12}} (\psi_1 - \sigma L_1 I_1) \quad (2.19)$$

$$\omega_2 = \omega_1 - \frac{3 r_2 M}{2 p \psi_2^2} \quad (2.20)$$

де L_1 , L_2 , L_{12} – відповідно індуктивність статора, ротора та взаємна індуктивність;

σ – відповідний коефіцієнт розсіювання [17].

Дана система застосовує тільки датчики струму і напруги та не потребує використання датчиків швидкості. Задовільна якість перехідних процесів забезпечується тільки тоді, коли похибка оцінок опорів обмоток статора і ротора ТАЕД не перевищує 5%. Таким чином у СК необхідно передбачити алгоритми адаптації у відповідності до нагрівання обмоток двигуна [17].

2.7 Обґрунтування переходу ТАЕД в генераторний режим

Тяговий асинхронний електродвигун переходить в генераторний режим за наступних умов [12, 14, 16]: по-перше, у випадку коли величина частоти обертання ротора f_{ep} більше за частоту f_1 обертового магнітного поля статора, а значення абсолютного ковзання f_s є негативним; по-друге, у випадку коли енергоживлення обмотки статора забезпечується реактивною складовою струму, що необхідна для утворення магнітного потоку.

Перша вимога забезпечується підвищенням частоти напруги енергоживлення, а друга – за умови певних переключень в силовому ланцюзі перетворювача [12].

Перехід ТАЕД до генераторного режиму відбувається як без відключення силової схеми електровозу від контактної мережі, так і з відключенням [16].

В першому випадку значення ковзання електродвигуна знижуються до нуля, тоді він переходить в режим холостого ходу, за яким шахтний електровоз експлуатується в режимі вибігу, тоді як ЕД споживає тільки

струм намагнічування. Далі виконавши зменшення показників ковзання до певного значення, виконують перехід ТАЕД в генераторний режим [14].

При переході до генераторного режиму фазовий кут зсуву струму φ в статорній обмотці підвищується до такого значення, при якому струм збігається за напрямом з ЕРС обмотки статора ТАЕД, причому вхідний струм інвертора напруги I_d також змінюється за напрямом. Динаміка коливань струму і напруги в одній фазі обмотки статора при переході з рухомого режиму в генераторний наведені на рисунку 2.23[14].

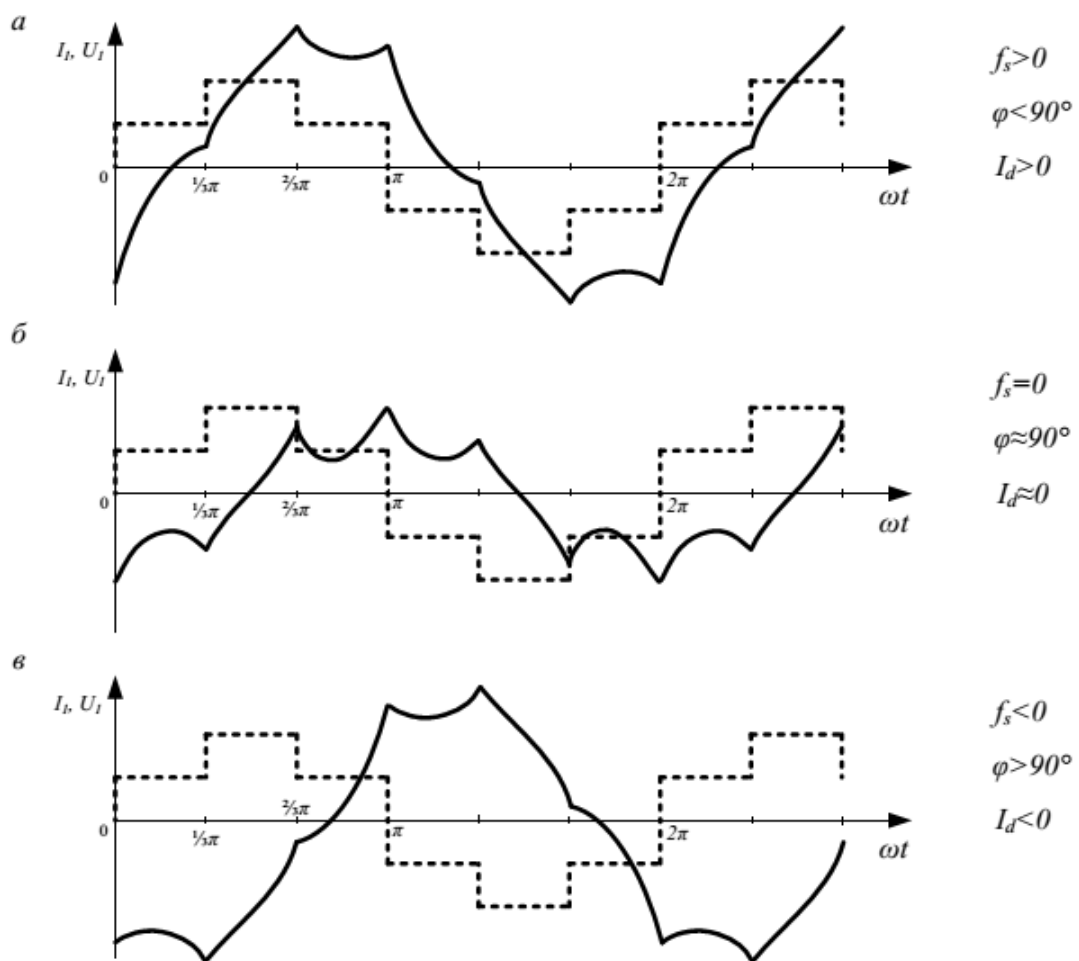


Рисунок 2.23 – Динаміка змін струму та напруги в одній фазі статорної обмотки: *a* – рухомий режим; *б* – режим холостого ходу; *в* – генераторний режим

З рисунку 2.23 видно, що струм в обмотці статора ТАЕД має значні спотворення, які обумовлені ступінчастим характером напруги

енергоживлення. Дані спотворення приводять до погіршення характеристик ЕД, тому форма напруги повинна бути більш синусоїдальною [14].

2.8 Обґрунтування вибору системи керування ЕРС змінного струму з ТАЕД

В системі керування ЕРС змінного струму з ТАЕД основним елементом вважається трансформатор, який забезпечує зниження напруги контактної мережі до певного рівня. Згідно цього відомо чотири структурних схеми (рис. 2.24) [14]:

1. схема з керованим випрямлячем і АІС (рис. 2.24, а);
2. схема з контактним перемикачем і АІН (рис. 2.24, б);
3. схема з випрямлячем, імпульсним регулятором і АІН (рис. 2.24, в);
4. схема з чотирьох квадрантним перетворювачем і АІН (рис. 2.24, г).

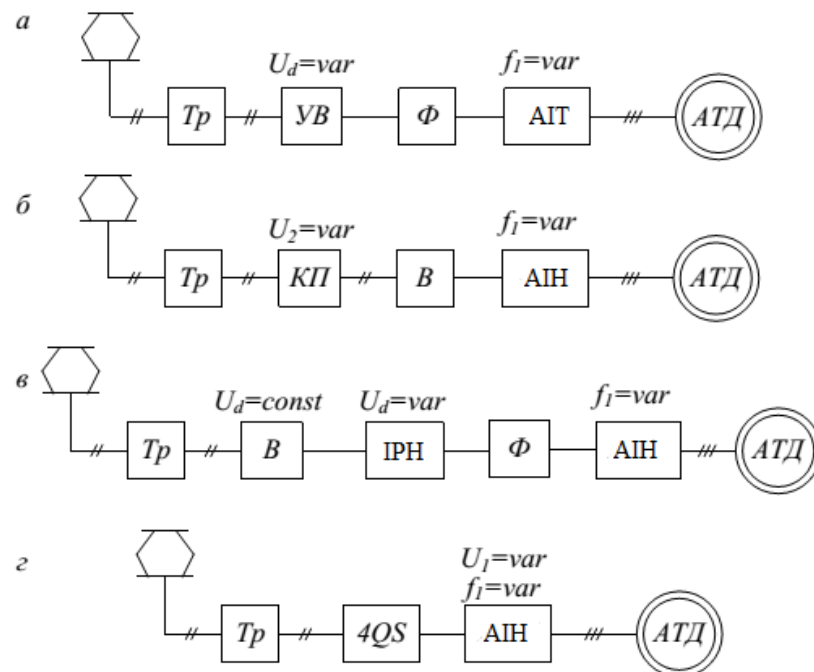


Рисунок 2.24 – Існуючі структурні схеми ТАЕД для ЕРС постійного струму:

Тр – трансформатор; KB – керований випрямляч; Ф – фільтр; В – випрямляч;

4QS – чотирьох квадрантний перетворювач; КП – контакторний перемикач

Наряду з існуючими схемами (рис. 2.24) є структурні схеми з неявно вираженим ланцюгом постійного струму, тобто в таких схемах даний ланцюг відсутній, тоді перетворення струму виконується з однофазного на трифазний. Ці структурні схеми мають складну систему керування і значні коливання струмів. Через ці недоліки вони не поширені [17].

Наступним етапом розглянемо *паралельну роботу чотирьох квадрантних перетворювачів*. На рисунку 2.25 наведена структурна схема тягового трансформатора з двома 4QS. Особливість тягового трансформатору(ТТ) вважається підвищена індуктивність розсіювання його обмоток, яка забезпечує нормальну роботу вхідної частини 4QS у поєднанні з підвищеною електромагнітною симетрією вторинних обмоток. За умови експлуатації ЕРС з промисловою частотою індуктивність розсіювання кожної з тягових обмоток (ТО) повинна бути приблизною до 2,5 мГн, яка забезпечує відповідність напрузі короткого замикання ТТ в межах 60-70%. Схематично 4QS представляє міст на IGBT-транзисторах, що шунтовані зворотними діодами, та керуються за принципом широтно-імпульсної модуляції [17].

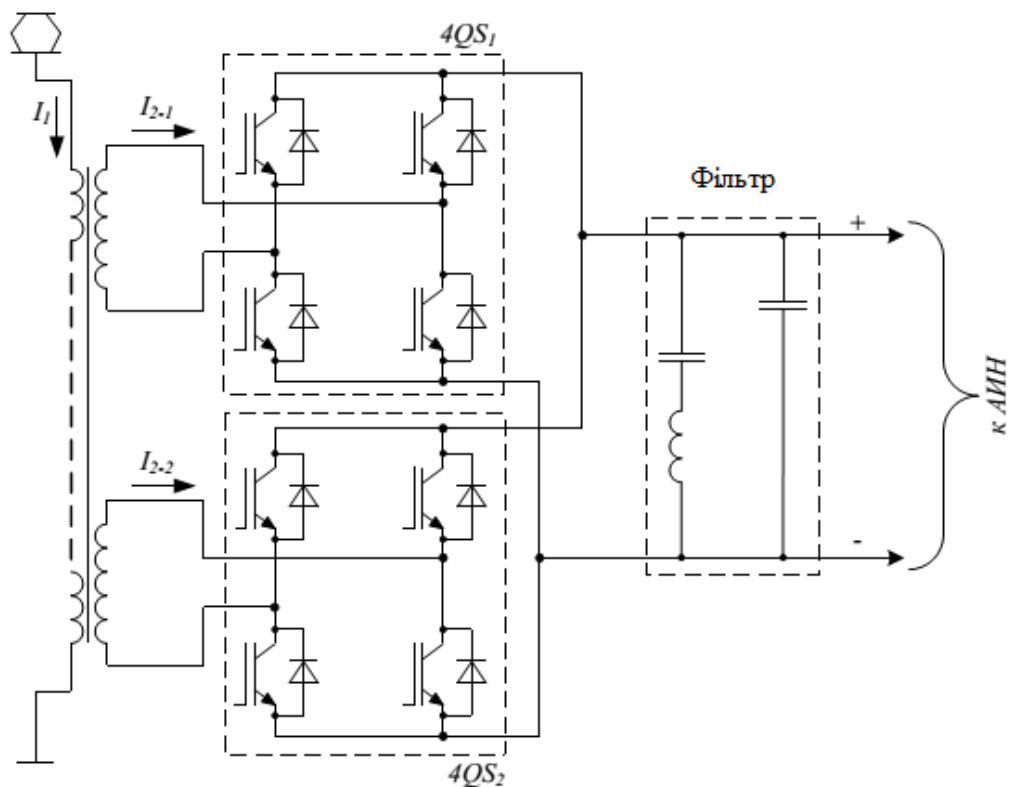


Рисунок 2.25 – Паралельне з'єднання чотирьох квадрантних перетворювачів

За умов використання вище зазначених схем (2.24, г) вхідний струм 4QS має значні коливання, які збільшують втрати в тяговому трансформаторі та тяговій мережі, тому задля їх використовують паралельне з'єднання 4QS. В даному випадку в іншому 4QS виконується фазовий зсув модуляції відносно першого на величину напів періоду частоти коливань вхідного струму [17].

На схемі рис. 2.25 струми I_{2-1} і I_{2-2} приймають значні значення коливань, що викликані певними особливостями роботи 4QS. Проте в наслідок фазового зсуву модуляції одного з 4QS коливання струмів взаємно компенсуються. Згідно рисунку 2.26 4QS працюють разом із зсувом фаз модуляції, в результаті чого в той момент, коли в першому 4QS створюється пік коливань вхідного струму, то у вхідному струмі другого 4QS створюються мінімальні коливання. Таким чином вони забезпечують компенсацію один одного, тобто при сумарних струмах вторинної обмотки ці коливання мінімальні. Також власний опір тягового трансформатора виконує згладжування коливань струму, які призводить до більш синусоїдального струму в первинній обмотці ТТ [18].

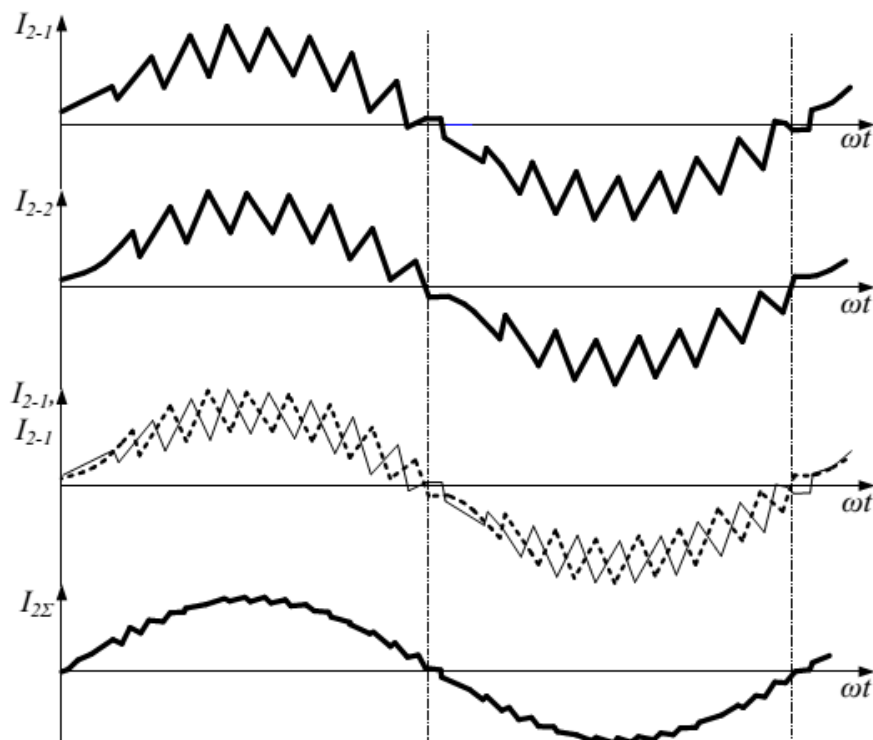


Рисунок 2.26 – Динаміка змін струмів за умови паралельної роботи чотирьох квадратних перетворювачів

При цьому необхідно враховувати, що в результаті роботи ЕРС більш критичним вважається амплітудне значення гармонійних складових вхідних струмів на частоті 25 Гц. В таблиці 2.1 результати дослідження за умови паралельної роботи 4QS.

Таблиця 2.1 – Отримані результати дослідження за умови паралельної роботи 4QS

Частота гармонійних складових вхідного струму	Відповідна амплітуда гармонійних складових вхідного струму, А	
	Сінфазна робота 4QS	Робота 4QS з фазним зсувом модуляції
25	0,454	0,161
75	0,72	0,155
175	0,25	0,15
420	0,065	0,019
480	0,088	0,027
580	0,093	0,042
720	0,039	0,033
780	0,098	0,054

Згідно цих даних (табл. 2.1) видно, що застосування фазового зсуву модуляції одного з паралельних 4QS досить ефективно знижує рівень впливу приладу на систему енергоживлення.

Головним чином на ЕРС з ТАЕД система керування приймає ієрархічну будову, яка містить три рівні (рис. 2.27). Верхній рівень забезпечує керування рухом електровозу, при якому вхідна інформація надходить безпосередньо з контролера машиніста команди та одержуються від системи контролю і діагностики дані про стан його обладнання, а також є можливість використовувати інформацію, що надходить від СЦБ і диспетчерської служби. Система керування ЕРС забезпечує визначення режиму роботи

обладнання, у функції якої входить формування завдань щодо керування 4QS перетворювачами, потокозчепленням та електромагнітний момент на валу ТАЕД від заданого режиму роботи, поточних параметрів руху і наявної інформацією про стан електровозу. Система керування рухом містить підсистему захисту від боксування, запобігання аварійних ситуацій, захисту від їх наслідків та індикації поточного стану систем і обладнання електровозу. Дана система є спільною для всього електровозу та забезпечує загальну роботу всіх підсистем [17-18].

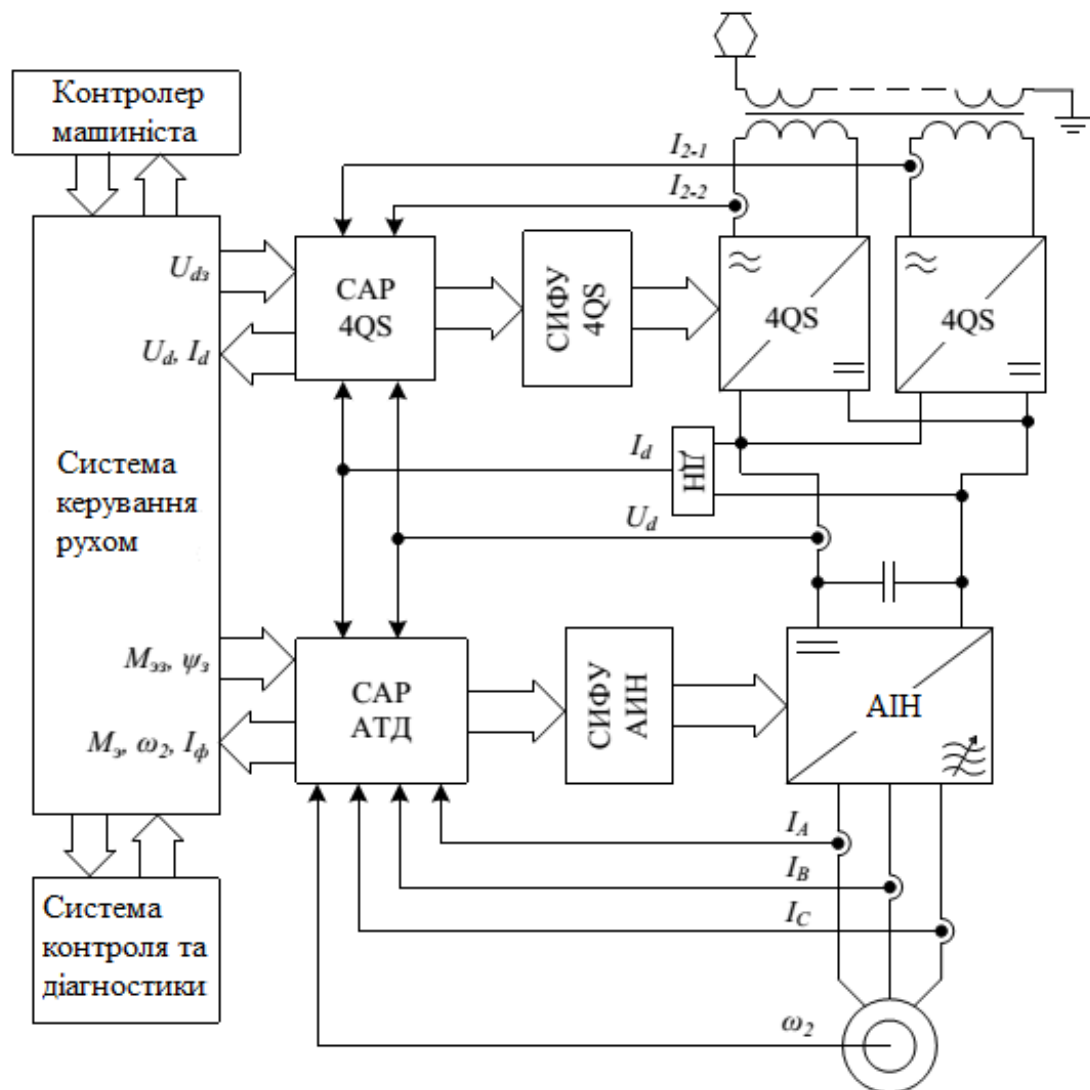


Рисунок 2.27 – Структура будови системи керування ЕРС змінного струму

Середній рівень включає системи автоматичного регулювання (CAP) окремих елементів ТАЕД (4QS перетворювач і система АІН-АТД). До їх

функцій належить за відомими параметрами режиму роботи даних пристроїв видавати існуючій системі імпульсно-фазового управління (СІФУ) вихідні дані задля формування послідовності імпульсів їх управління від відповідних перетворювачів, які містяться на нижньому рівні. В загальному випадку САР і СІФУ для ТАЕД, що споживають напругу від загального інвертора, об'єднуються з пристроями перетворення електричної енергії та утворюють систему керування електровозу. На наведеній схемі рис. 2.27 4QS замінюється тиристорним випрямно-інверторним випрямлячем, тоді як замість АІН енергоживлення ЕД здійснюється через АІС [21].

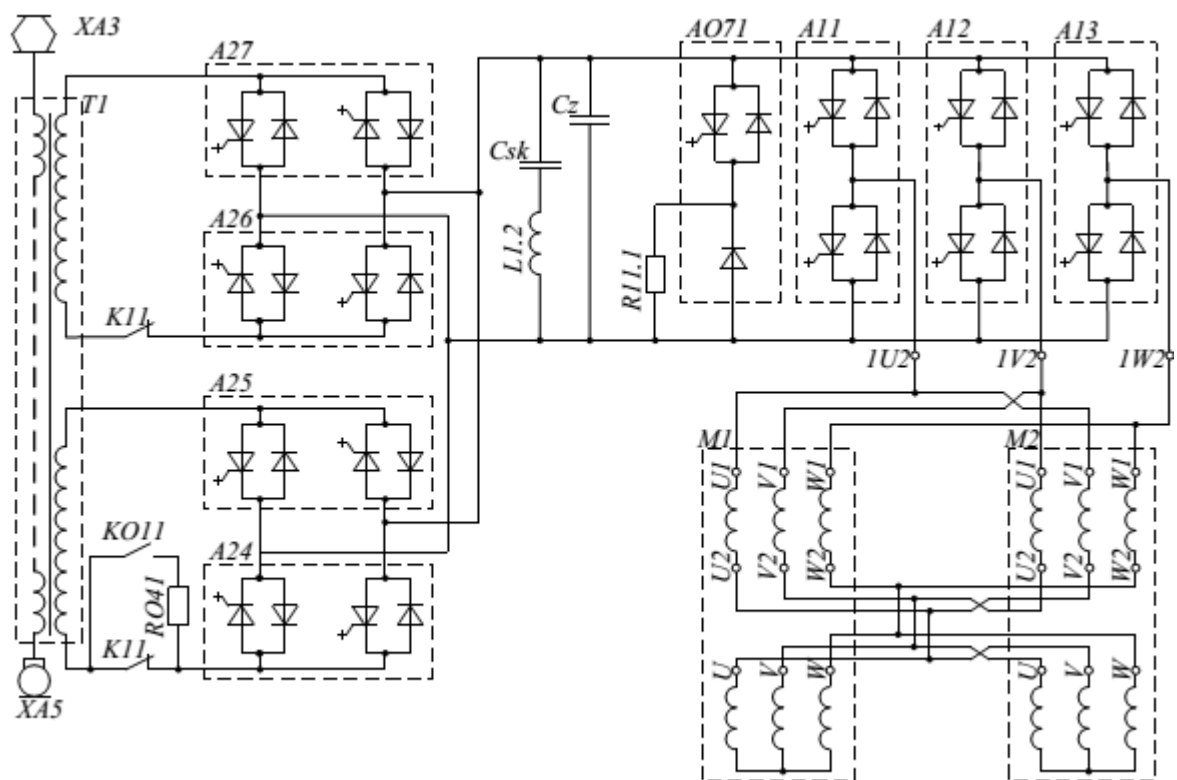


Рисунок 2.28 – Структурна схема шахтного електровозу за умови енергоживлення від контактної мережі змінного струму

На рисунку 2.28 надана силова схема шахтного електровозу за умови енергоживлення від контактної мережі змінного струму. Дана схема об'єднує такі елементи, як блоки A27 і A26 (перший 4QS) і A25 і A24 (другий 4QS). Енергоживлення 4QS забезпечується з вторинної обмотки тягового

трансформатора $T1$ за умови проходження по здвоєному лінійному контактору змінного струму $K11$. Напруга на вхід модулю $A24$ подається також через ланцюг попереднього заряду проміжної ланки, яка містить контактор $K011$ і резистор $R041$. До початку роботи перетворювача вмикається в першу чергу контактор $K011$, тоді через даний ланцюг потужна конденсаторна батарея певної проміжної ланки постійної напруги забезпечує плавну зарядку до амплітудного значення напруги вторинної тягової обмотки $ТТ$, а вже потім вмикається лінійний контактор $K11$, що дозволяє забезпечити уникнення значного кидка зарядного струму [21].

Блоки $A11$, $A12$, $A13$ об'єднуються в однорівневий АІН, що забезпечує енергоживлення від ланки постійного струму, яка складається з фільтрової конденсаторної батареї C_z і резонансного LC-фільтру з частотою 100 Гц. LC-фільтр побудований на основі конденсатора C_{sk} і дроселя $L1.2$. Наступний блок $A071$ з'єднаний з входом АІН паралельно та створює регулятор ланцюга гальмівного резистору $R11.1$. Через виходи змінного струму АІН по затискачам змінного струму $1U2$, $1V2$, $1W2$ перетворювача напруга мережі подається на кабельну мережу, яка поєднує тяговий перетворювач з обмотками ТАЕД за схемою «зірка». Так як 4QS електровозу АМ8Д виконують роботу за умови режиму широтно-імпульсної модуляції, то забезпечується підтримка коефіцієнту потужності на споживачах електровозу рівним майже одиниці згідно широкого діапазону навантажень в режимах тяги та електричного рекуперативного гальмування. Основне значення частоти широтно-імпульсної модуляції по кожному з випрямлячів складає 700 Гц. Всі комутації в 4QS забезпечують спотворення форми струму за умови формування високочастотних трикутних пульсацій, відносний розмах яких складає приблизно 10% від значення амплітуди основної гармоніки вхідного струму 4QS з промисловою частотою 50 Гц. Задля зниження цих коливань в загальному струмі мережі електровозу система керування забезпечує рівномірний зсув фази модуляції всіх шести 4QS відносно один до одного. В наслідок відносний розмах коливань знижується у 6 разів та не

перевищує 2% амплітудного значення основної гармоніки вхідного струму випрямляча з виробничою частотою 50 Гц. Завданням 4QS є підтримка стабільного середнього значення напруги 2800 В в проміжній ланці тягового перетворювача за умови незалежності від величини напруги в контактній мережі та поточної тягової чи гальмівної потужності, яке виконується з урахуванням одночасної дії додаткового алгоритму керування зі зворотним зв'язком за напругою в проміжній ланці. Задля виконання формування даного зворотного зв'язку застосовуються сигнали датчиків навантаження в проміжну ланку. В режимі тяги електроенергія в проміжну ланку поступає з мережі і одержується інверторами задля тяги та перетворювачами власних потреб для енергоживлення допоміжних машин і систем. В режимі електричного рекуперативного гальмування електроенергія в проміжну ланку поступає від інверторів і одержується випрямлячами задля повернення в мережу та перетворювачами власних потреб для енергоживлення допоміжних машин і систем. В режимі електричного реостатного гальмування енергія в проміжну ланку поступає від інверторів і одержується гальмівними резисторами та перетворювачами власних потреб для енергоживлення допоміжних машин і систем. Враховуючи існуючі режими роботи тягового перетворювача його керування базується на недопущенні дисбалансу потоків електроенергії. Існуюча підсистема керування 4QS виконує автоматичне забезпечення рівномірного розподілу навантаження між двома випрямлячами, які виконують паралельне живлення проміжної ланки. Таким чином виконуючи забезпечення оптимального теплового режиму експлуатації силових модулів перетворювача та вторинних обмоток тягового трансформатора. Експлуатація автономного інвертору напруги шахтного електровозу за умови зміни типу струму в контактній не змінюється. Відмітимо, що головною особливістю експлуатації шахтного електровозу за умови використання ТАЕД на змінному струмі вважається підтримка стабільної напруги в проміжній ланці, яка становить 2800 В. На рисунку 2.29 наведена динаміка зміни фазного струму ТАЕД електровозу в

залежності від швидкості його руху [21].

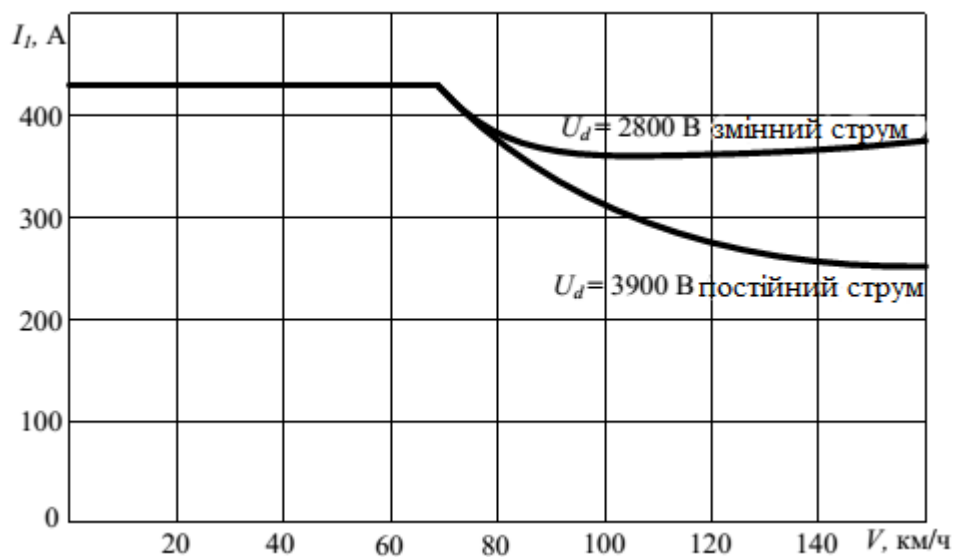


Рисунок 2.29 – Динаміка зміни показників фазного струму ТАЕД шахтного електровозу в залежності від швидкості руху

Різниця при зміні фазного струму ЕД в залежності від швидкості задля забезпечення різних значень напруги в проміжній ланці виникає при швидкості 5,7 км/год. Ця обставина пояснюється наступним чином: коли напруга в проміжній ланці становить $U_d = 2800$ В при швидкості 5,7 км/год, значення величини фазної напруги досягає найбільш можливої величини, рівної $U_a = 1262$ В, тоді при швидкості понад 5,7 км/год. подальша підтримка постійної максимальної потужності електровозу 26 кВт виконується за умови ослаблення магнітного потоку ЕД. Даний фактор формується в АД природним чином, коли частота f_1 продовжує збільшуватися, тоді як напруга U_1 остається постійною, звідки задля підтримування потужності електровозу 26 кВт в межах швидкостей від 5,7 до 10 км/год. значення фазного струму електродвигуна змінюється в діапазоні від 360 до 380 А [14].

Дані зміни обумовлені тим, що ослаблення магнітного потоку ТАЕД забезпечує зміну його коефіцієнту потужності, тобто спочатку підвищується, а потім вже зменшується. Зміни стосуються і енерговтрат в ТАЕД і тяговій передачі. Така зміна коефіцієнту потужності і енерговтрат забезпечуються за рахунок компенсації певним регулюванням фазного струму ЕД таким чином,

щоб механічна потужність на ободі колеса була незмінною. За умови зміни типу струму в тяговій мережі зміни в силовій схемі АТП відсутні, тоді як виконується зміна тільки вхідного перетворювача АІН, при чому відповідно до виду струму вхідний фільтр відповідає постійному струму, у випадку змінного – 4QS. Згідно силовій схемі АМ8Д один АІН живить два ТАЕД, принципова схема якої представлено на рисунку 2.30 [14].

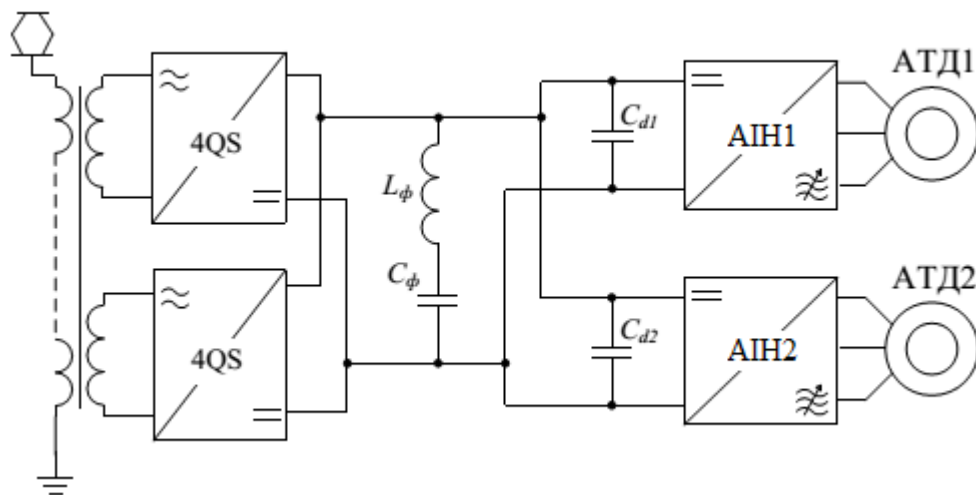


Рисунок 2.30 – Силова принципова схема електровозу на змінному струмі з поосним регулюванням сили тяги

В даній схемі (рис. 2.30) ланка ПС споживає енергію від двох паралельних 4QS та складається з фільтру гармонік струму, створений елементами L_ϕ і C_ϕ . Таким чином кожен ТАЕД споживає електроенергію від АІН, на вході на вході котрого розташовується накопичувальний конденсатор (C_{d1} , C_{d2}) [14].

2.9 Дослідження системи керування ТАЕД з короткозамкненим ротором за допомогою програмного продукту Simulink

На рисунку 2.31 наведена схема дослідження системи керування ТАЕД з короткозамкненим ротором, що зпроектована в пакеті MATLAB/Simulink [22]. Дана модель складається з блоків асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором; блоку живлення, від якого поступає трьохфазна напруга електродвигун; блок керування, що забезпечує формування необхідної залежності частоти обертання від моменту. Окрім цього на ній присутні зворотній зв'язок за моментом та вимірювальна апаратура.

Під час роботи ТАЕД блок керування виконує задавання частоти обертання ЕД в залежності від моменту, що ним розвивається, причому добуток частоти обертання на момент вважається постійним значенням рівним потужності електродвигуна.

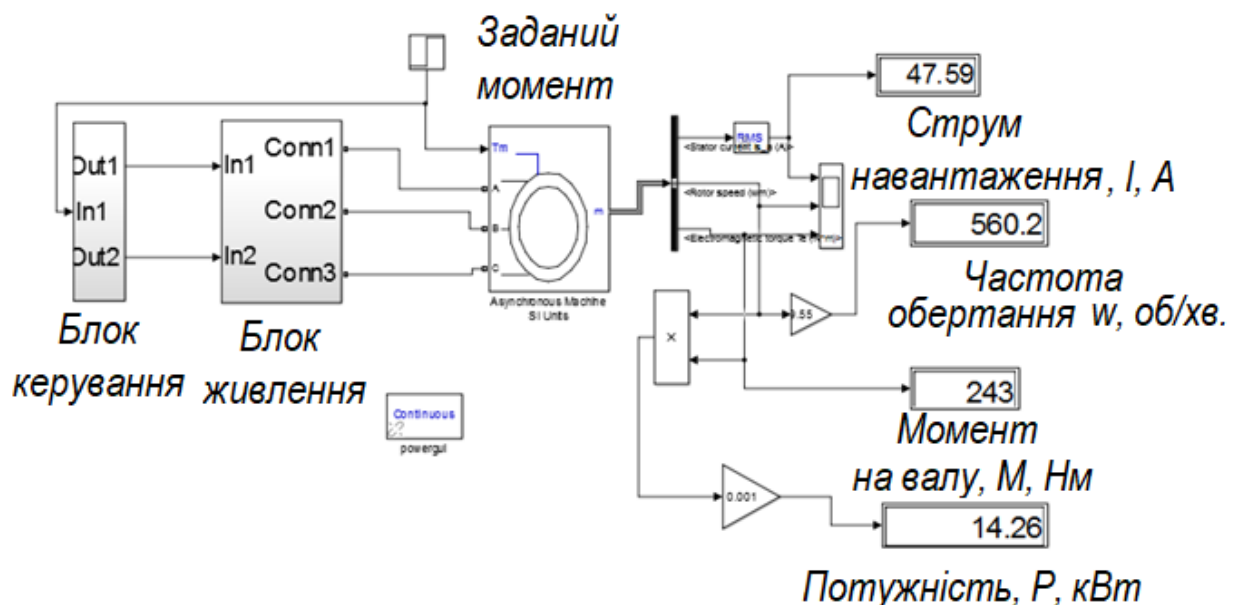


Рисунок 2.31 – Схема для дослідження системи керування ТАЕД з короткозамкненим ротором

Приведений блок керування (рис. 2.32) складається з блоку множення,

який забезпечує множення потужності на момент; перемикачів, які виконують запуск ЕД за умови номінальної частоти та напруги; блоку ділення, який забезпечує керування напругою в залежності від частоти заданого виразу [22].

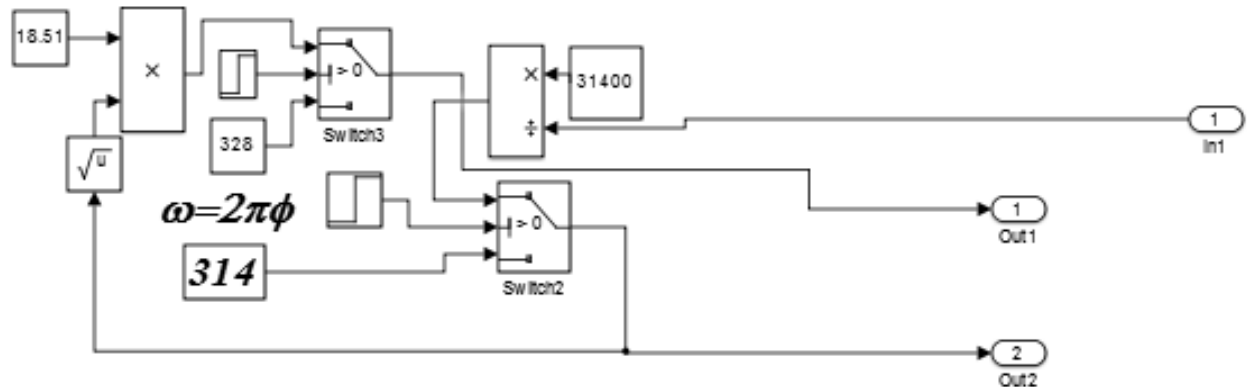


Рисунок 2.32 – Схематичне зображення блоку керування

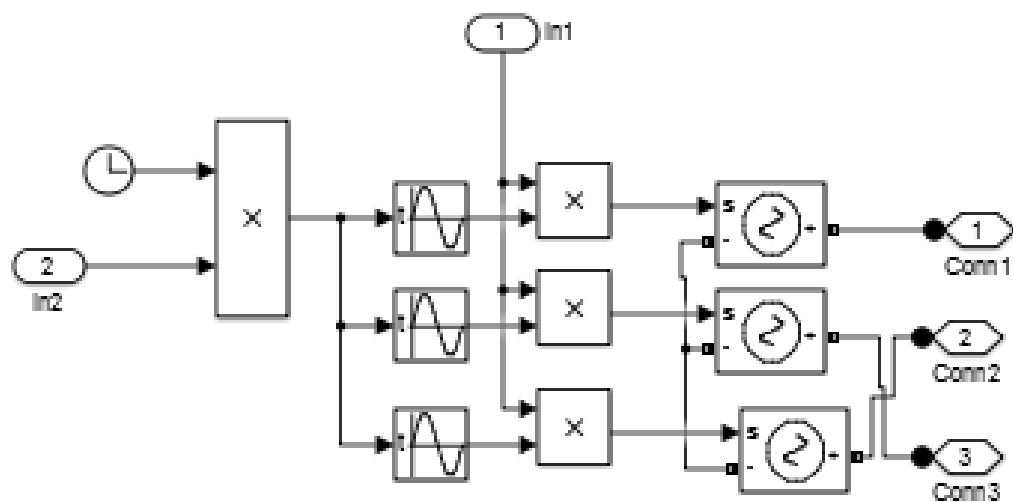


Рисунок 2.33 – Схематичне зображення блоку живлення

Результати дослідження наведені на рисунку 2.34.

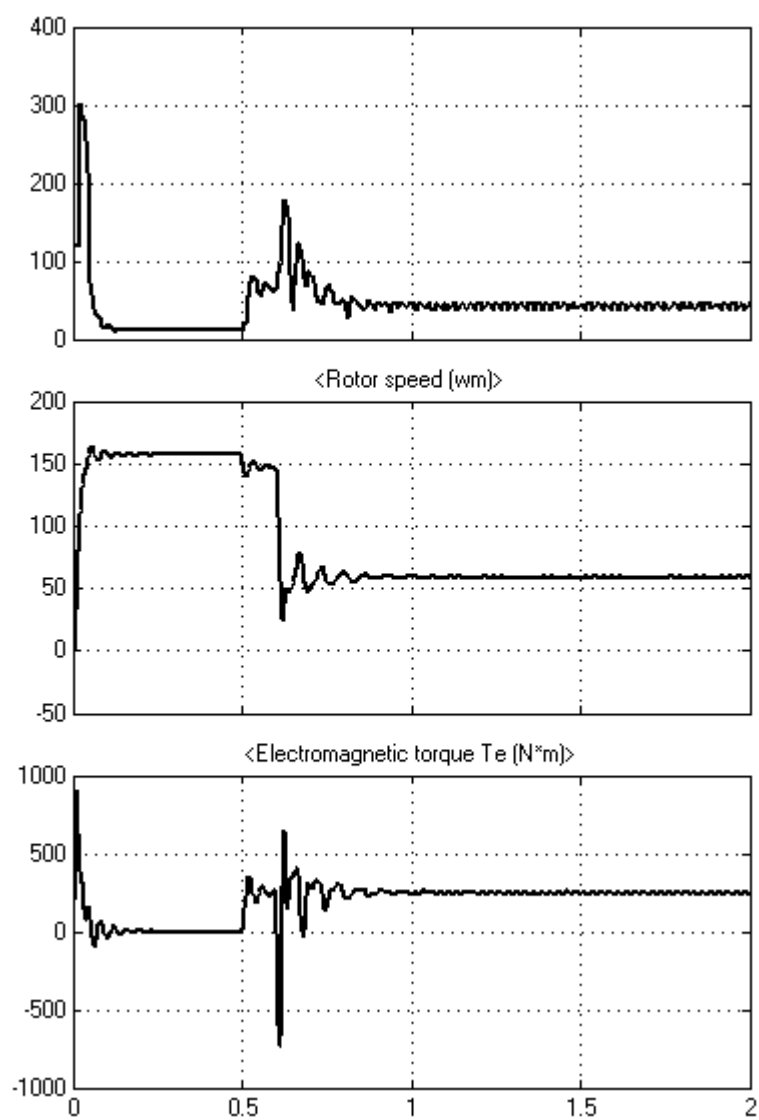


Рисунок 2.34 – Результати дослідження системи керування ТАЕД з короткозамкненим ротором

ВИСНОВКИ

В дипломній роботі розглянуто актуальне питання розробки схеми формування тягової характеристики електроприводу із використанням асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором на шахтних електровозів задля забезпечення підвищення його надійності. У відповідності до цього питання було виконано наступне:

- ❖ проаналізовано існуючі системи керування шахтних електровозів, в результаті чого виявлено, що сучасний тяговий привод має ряд недоліків до яких відносяться, ненадійність, великі габаритні параметри та велика вартість в виготовленні;
- ❖ визначено забезпечення керування тяговими асинхронними електродвигунами, в процесі якого запропоновано використання ТАЕД з КЗ ротором, задля забезпечення потрібних тягових характеристик якого живлення електроенергією здійснюється від інвертора за спеціальною схемою керування;
- ❖ проведено аналіз силових перетворювачів, що застосовуються для енергоживлення тягових асинхронних електродвигунів;
- ❖ виконано обґрунтований аналіз енергоживлення ТАЕД від статичного перетворювача;
- ❖ визначені основні принципи керування тяговими асинхронними електродвигунами;
- ❖ виконано обґрунтування переходу ТАЕД в генераторний режим;
- ❖ досліджено системи керування ТАЕД з короткозамкненим ротором за допомогою програмного продукту Simulink. В результаті дослідження визначено, що СК ТАЕД з КЗ ротором дозволяє отримати необхідні характеристики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Осташевський М. О. Електричні машини і трансформатори : навч. посібник / М. О. Осташевський, О. Ю. Юр'єва; за ред. В. І. Мілих. – Харків : ФОП Панов А. М., 2017. – 452 с.
2. Яцун М.А. Електричні машини. Підручник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 464 с.
3. Електричні машини і апарати: навчальний посібник / Ю.М. Куценко, В.Ф. Яковлев та ін. – К.: Аграрна освіта, 2013. – 449 с.
4. ВП «Шахта «Капітальна» ДП «Мирноградвугілля» [електронний ресурс]. Точка доступу: https://www.mvug.com.ua/?page_id=54 (дата звертання 11.05.2021)
5. ВП «Шахта «Капітальна» ДП «Мирноградвугілля» [електронний ресурс]. Точка доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A8%D0%B0%D1%85%D1%82%D0%B0_%C2%AB%D0%9A%D0%B0%D0%BF%D1%96%D1%82%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B0%C2%BB (дата звертання 11.05.2021)
6. Синчук О. Н. Синергетический тяговый асинхронный электротехнический привод для контактно-аккумуляторного двухосного электровоза / О. Н. Синчук, Д. А. Шокарев, Е. И. Скапа, Э. С. Гузов, Ф. И. Караманиц // Електромеханічні та енергозберігаючі системи. – Кременчук : КНУ, 2011. – Вип. 4/2011 (16). – С. 65 – 68.
7. Андріанов Р.В. Розробка тягового перетворювача для вантажного електровоза змінного струму з асинхронним тяговим приводом / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, 2021. – 69 с.

8. Сінчук І. О., Кальмус Д. О. До питання ефективності функціонування тягового електромеханічного комплексу шахтного електровозу в режимі гальмування. *ElectronCommun*, 2017, vol. 22, №4. – С. 38-43. DOI: 10.20535/2312-1807.2017.22.4.107103

9. *Смєнова Л. В.* Моніторинг електричних параметрів тягових асинхронних двигунів і акумуляторних батарей двовісних електровозів. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт. – Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків, 2019.

10. І.О. Сінчук., Д.О. Кальмус. Формалізація факторів що впливають на роботу тягового електромеханічного комплексу контактного електровозу в умовах залізничних шах. *Вісник Криворізького національного університету*, вип. 46, 2018. – С. 112-118

11. Анализ эксплуатации шахтных электровозов. / В.Г. Щербаков, М. Б. Бондаренко, И.К. Юренко, Ю. А. Самара // Сб. научн. тр. Всерос. науч. исслед. и проет.-конструкт. ин-т электровозостр. – Новочеркасск, 1997. №37. – С. 143 – 147.

12. Слепцов М.А., Прокопович А.В., Савіна Т.І., Тулупов В.Д. Основы тяги электротранспорта. – Москва: вид-во Академія, 2006. – 464 с.

13. Бутт Ю. Ф. Шахтный подземный транспорт: справочное издание. Шахтный локомотивный и рельсовый транспорт /Ю. Ф. Бутт, В. Б. Грядущий, В. Л. Дебелый, А. Н. Коваль, А. Л. Фурман, В. М. Щука, В. А. Яценко // Под общ. ред. Б. А. Грядущего. – Т.1. – Донецк : «ВИК», 2009. – 481 с.

14. Закладний О.М., Праховник А.В., Соловей О.І. Енергозбереження засобами промислового електропривода: Навчальний посібник. – К: Кондор, 2005. – 408 с.

15. Литвинов А.В. Развитие силовой преобразовательной техники как способ повышения эксплуатационной надежности электроподвижного

состава / А.В. Литвинов // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: материалы всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2012. С. 105-110.

16. А. А. Видмиш, Л. В. Ярошенко. Основы электропривода. Теорія та практика. Частина 1. / Навчальний посібник. – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 387 с.

17. Шпіка М. І. Силові перетворювачі для автоматизованого електроприводу: конспект лекцій для студентів усіх форм навчання освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма «Електромеханіка» / М. І. Шпіка, С. О. Закурдай, В. А. Герасименко. – Харків : Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова, 2019. – 82 с.

18. Шавьолкін О. О. Силові напівпровідникові перетворювачі енергії : навч. посібник / О. О. Шавьолкін ; Харків. нац. ун-т. міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015. – 403 с.

19. Перетворювальна техніка [Текст]: підручник / Ю. П. Гончаров, О. В. Будьонний, В.Т. Морозов [та ін.]; за ред. В. С. Руденка. – Харків: Фоліо, 2000. – Ч. 2. – 360 с.

20. Статичні перетворювачі тягового рухомого складу [Текст]: навч. посібник / Ю. П. Гончаров, М. В. Панасенко, О. І. Семененко, М. В. Хворост. – Харків: НТУ "ХПІ", 2007. – 192 с.

21. Системи електроживлення електронної апаратури. Конспект лекцій для студентів спеціальності 171 «Електроніка», спеціалізації 8(7).050802 «Електронні системи». - К.: НТУУ "КПІ", 2016. – 180 с.

22. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems И Simulink. - М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. - 288 с.

23. Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення: ДСТУ-3008-2015. – Держстандарт України, 2015. – 26 с.