

**Міністерство освіти і науки України**

**Криворізький національний університет**

**Електротехнічний факультет**

# **Пояснювальна записка**

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

## **ТЕМА РОБОТИ:**

**Модернізація тягового електромеханічного комплексу міського трамвая  
за системою «широотно-імпульсний перетворювач – двигун постійного  
струму»**

**Виконав: студент групи ЕЕМ-22ск**

**Євгеній ЧУДНИЙ**

**Керівник випускної роботи \_\_\_\_\_ д.е.н., проф. Тетяна БЕРІДЗЕ**

**Нормо контролер \_\_\_\_\_ д.е.н., проф. Тетяна БЕРІДЗЕ**

**Декан ЕТФ \_\_\_\_\_ к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ**

**Гарант освітньої програми \_\_\_\_\_ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО**

**Кривий Ріг 2025 р.**

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка

**ЗАВДАННЯ**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

ЧУДНИЙ Євгеній Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Модернізація тягового електромеханічного комплексу міського  
трамваю за системою «широотно-імпульсний перетворювач – двигун  
постійного струму»

1. Термін подання студентом роботи: 16 червня 2025 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є модернізація тягового  
електромеханічного комплексу міського трамваю. Завданням є розрахунок  
характеристик та дослідження роботи електромеханічного комплексу  
міського трамваю за системою «широотно-імпульсний перетворювач –  
двигун постійного струму».
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I.  
Характеристика електромеханічної системи міського трамвая; II. Система  
керування електроприводом трамвая; III. Моделювання динамічних режимів  
роботи електроприводу трамвая.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових  
креслень) I. ЗАГАЛЬНИЙ ВИД ТРАМВАЙНИХ ВАГОНІВ; II. СХЕМА  
ПРОХОДЖЕННЯ СТРУМУ НА ПОЗИЦІЯХ ТЯГОВОГО ПРИВОДА  
ТРАМВАЮ; III. ПРИНЦИПОВА ЕЛЕКТРИЧНА СХЕМА СИЛОВИХ КІЛ  
ТРАМВАЙНОГО ВАГОНУ; IV. СХЕМА ФАЗИ ПЕРЕТВОРЮВАЧА НА IGBT  
ТРАНЗИСТОРАХ.

5. Консультанти розділів роботи

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

6. Календарний план

| №  | Етапи роботи                               | Термін   |
|----|--------------------------------------------|----------|
| 1  | Характеристика електромеханічної системи   | 15.05.25 |
| 2  | Система електропривода трамвая             | 17.05.25 |
| 3  | Силові елементи електроприводу трамвая     | 19.05.25 |
| 4  | Вибір перетворювача електропривода трамвая | 21.05.25 |
| 5  | Статичні та енергетичні характеристики     | 24.05.25 |
| 6  | Вибір структури системи керування          | 26.05.25 |
| 7  | Елементи системи керування                 | 31.05.25 |
| 8  | Алгоритми роботи системи керування         | 04.05.25 |
| 9  | Принципова схема електроприводу трамвая    | 10.06.25 |
| 10 | Моделювання динамічних режимів роботи      | 14.06.25 |
|    |                                            |          |
|    |                                            |          |
|    |                                            |          |
|    |                                            |          |
|    |                                            |          |

Дата видання завдання 12.05.2025 р.

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

Євгеній ЧУДНИЙ  
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Тетяна БЕРІДЗЕ  
(Ім'я, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової атестаційної роботи бакалавра на тему: «Модернізація тягового електромеханічного комплексу міського трамваю за системою «широтно-імпульсний перетворювач – двигун постійного струму»»

42 с., 12 рис., 11 літературних джерел

У першому розділі була розглянута інформація та параметри й характеристики електромеханічної системи трамвайного вагону. Була розроблена кінематична схема розраховані навантаження та визначено потужність тягового електричного двигуна. Також була запропонована модернізація тягової електромеханічної системи трамвайного вагону з використанням транзисторного перетворювача. Розраховано силові кола перетворювача та обрану елементи які його складають. Також було розраховано та обрано елементи захисту та керування. Регулювання параметрів тягового електроприводу трамвайного вагону було вирішено здійснювати за законом широтно-імпульсної модуляції. Були розраховані статичні та енергетичні характеристики модернізованої системи електроприводу. Слід зазначити що отримані статичні характеристики при використанні у якості джерела живлення імпульсного транзисторного перетворювача відрізняються особливою жорсткістю та стійкістю до перевантаження.

У другому розділі були представлені розрахунки системи керування тяговим електроприводом трамвайного вагону. Було запропоновано виконувати регулювання параметрів тягової електромеханічної системи за принципами підлеглого керування. У якості контурів регулювання використовувались випрямлений струм та частота обертання тягового

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-11 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 4    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

електричного двигуна. Налаштуванням контурів регулювання цих параметрів дозволило суттєво підвищити якість перехідних процесів. Для контролю параметрів у зазначених колах було обрано та встановлено датчики що забезпечують зворотний зв'язок за вказаними величинами. Для обчислення керуючих впливів було запропоновано використовувати мікропроцесорну систему керування яка містить обчислювальний пристрій та систему зв'язків керуючих модулів.

У третьому розділі було досліджено динамічні режими роботи тягової електромеханічної системи трамвайного вагону та отримано графіки перехідних процесів зазначеної системи. Вигляд графіків та характер протікання перехідних процесів свідчать про підвищення надійності роботи електромеханічного обладнання трамвайного вагону в усіх режимах його функціонування. Якісні показники регулювання були визначені для контуру стабілізації швидкості.

МІСЬКИЙ ТРАМВАЙ, ТЯГОВИЙ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИЙ КОМПЛЕКС,  
ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ДВИГУН ПОСТІЙНОГО  
СТРУМУ

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-11 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 5    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

## Зміст

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| Вступ.....                                                                    | 7  |
| Розділ 1. Характеристика електромеханічної системи міського трамвая .....     | 9  |
| 1.1. Характеристика міського трамвая .....                                    | 9  |
| 1.2. Система електропривода трамвая .....                                     | 15 |
| 1.3. Силові елементи електроприводу трамвая .....                             | 19 |
| 1.4. Вибір перетворювача електропривода трамвая .....                         | 20 |
| 1.5. Статичні та енергетичні характеристики електропривода трамвая.....       | 22 |
| Розділ 2. Система керування електроприводом трамвая .....                     | 25 |
| 2.1. Вибір структури системи керування електроприводом трамвая .....          | 25 |
| 2.2. Елементи системи керування електроприводом трамвая .....                 | 28 |
| 2.3. Алгоритми роботи системи керування електроприводом трамвая .....         | 30 |
| 2.4. Принципова схема електроприводу трамвая.....                             | 33 |
| Розділ 3. Моделювання динамічних режимів роботи електроприводу трамвая .....  | 37 |
| 3.1. Моделювання динамічних режимів роботи електроприводу трамвая .           | 37 |
| 3.2. Аналіз показників якості системи керування електроприводом трамвая ..... | 39 |
| Висновки .....                                                                | 40 |

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-11 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 6    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

## Вступ

Комунальний транспорт є важливою складовою для забезпечення належних умов життєдіяльності людини.

Від надійності та безперебійності його роботи залежить можливість динамічного розвитку суспільства та реалізація його потреб.

Соціально спрямовані проекти дозволяють залучити велике коло споживачів, які проявляють не аби яку зацікавленість у його розвитку та поширенні.

Тому важливим є забезпечення таких потреб як найбільш економічним методами.

Особливо це стосується підприємств комунальної інфраструктури.

Важливою особливістю функціонування такого виду транспорту є забезпечення високого рівню екологічності.

Оскільки забруднення, що спричиняють продукти згорання вуглецевих сполук, у міських умовах необхідно зменшувати, то як один з варіантів екологічно заощадливих рішень можна розглянути використання електричного транспорту, який у подальшому має повністю витіснити міські пасажирські перевезення із застосуванням двигунів внутрішнього згорання.

Необхідно також відзначити, що важливим для функціонування міського комунального транспорту є забезпечення комфорту пересування пасажирів.

Слід зазначити, що у цьому питанні рейковий транспорт відрізняється плавністю та швидкістю руху.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-11 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 7    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

Слід також додати, що для потреб рейкового транспорту у міських умовах доволі часто виділяють окрему смугу пересування, що забезпечує безперешкодне просування у міській забудові.

Одним з представників міського електричного рейкового транспорту є трамвай.

Сучасні міські комунальні транспортні господарства містять розгалуженні мережі трамвайних колій та налічують велику кількість рухомих одиниць у своєму складі, різних типів та призначення.

Сучасні трамвайні вагони відрізняються підвищеною комфортабельністю та високим ступенем надійності.

Важливим є забезпечення економічності експлуатації трамвайних вагонів, тому слід приділяти також достатню увагу ефективності режимів їх функціонування.

Зниження витрат у кожному з циклів руху є важливим елементом забезпечення ефекту зниження собівартості перевезень.

Особливо це є важливим для комунальних підприємств, робота яких забезпечується за рахунок надходжень з міського бюджету.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-11 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 8    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

# Розділ 1. Характеристика електромеханічної системи міського трамвая

## 1.1. Характеристика міського трамвая

Для перевезення пасажирів на приміських маршрутах використовується зазвичай чотиривісні трамвайні вагони. Живлення трамвайних вагонів відбувається від контактної мережі. Зазвичай для цього використовується контактна мережа постійного струму напругою 550 В. До обладнання трамвайних вагонів можна віднести такі елементи: тягові електричні двигуни які використовуються для приведення у рух трамвайного вагону. Від двигунів крутний момент передається через карданний вал на редуктор від якого потім на приводні колеса.

Колеса розташовуються на колісних парах що містять спеціальну вісь на яких напресовано рухомі елементи.

Сполучення з двох вісей та чотирьох коліс розташовуються на спеціальних візках.

Одна вісь та два колеса утворюють колісну пару.

Сам візок складається з двох паралельно розташованих колісних пар.

Як вже зазначалося живлення трамвайного вагону здійснюється від контактної мережі.

Номінальна напруга контактної мережі 550 в постійного струму.

|           |                 |          |        |      |                          |                 |      |        |
|-----------|-----------------|----------|--------|------|--------------------------|-----------------|------|--------|
|           |                 |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-11 |                 |      |        |
| Зм.       | Лист            | № докум. | Підпис | Дата | Розділ 1                 | Літ.            | Лист | Листів |
| Розробив  | Чудний ЄВ       |          |        |      |                          |                 | 9    | 16     |
| Перевірів | Берідзе Т.М.    |          |        |      |                          | КНУ<br>ЕЕМ-22ск |      |        |
| Реценз.   |                 |          |        |      |                          |                 |      |        |
| Н. Контр. | Берідзе Т.М.    |          |        |      |                          |                 |      |        |
| Затвердив | Пересунько І.І. |          |        |      |                          |                 |      |        |

Безпосереднє живлення трамвайного вагону здійснюється через струмоприймач який ще називається пантографом.

На трамвайних вагонах застосовується напівавтоматична або автоматична система керування.

При цьому живлення на тягові електричні двигуни поступає за допомогою спеціальних контакторних елементів керування якими відбувається завдяки встановленим груповим контролерам.

Так наприклад для трамвайних вагонів доволі широко використовується безступінчасті кулачкові контролери.

Вони мають 17 позицій які фіксуються відповідним переміщенням керуючого елемента.

При цьому керування вагоном буде відповідати програмі яка закладена у кулачковий механізм.

Можна розрізнити режими руху та гальмування а також рух з прискоренням або уповільненням та застосуванням форсування за збудженням.

Електричне гальмування тягових електричних двигунів виконується завдяки переведенню останніх у відповідний режим.

Службове гальмування відтворюється за допомогою механічних гальм.

При цьому використовується як колодкове гальмо так і соленоїдний привід.

Соленоїдне гальмо використовується при гальмуванні відповідно з притисканням до рейки трамвайного шляху.

Для зв'язку на трамвайних вагонах використовується радіостанції.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-11 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 10   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

Для сигналізації використовується система світлових ліхтарів.

Основні параметри трамвайних вагонів можна звести у наступну таблицю.

Загальний вигляд трамвайного вагону можна переглянути на рисунку 1.1.



Рис.1.1. Загальний вигляд трамвайного вагону

Електричне обладнання трамвайного вагона розташовується зазвичай на верхній частині даху а також на візках під кузовом трамвайного вагону.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-11 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 11   |

На даху можна бачити такі конструктивні елементи як пантограф радіотранслятор і розрядний пристрій.

У салоні трамвайного вагону розташовується електричні лампи а також динаміки та стоп-крани.

Також можна бачити у салоні трамвайного вагону розташовану сигнальну систему та елементи обігріву вагону.

У кабіні можна бачити панель керування.

До її складу входять контролери кнопки переведення у автоматичний та напіваавтоматичний режим а також сигнальні елементи режимів руху.

Швидкість руху можна контролювати завдяки встановленому спідометру.

Також у кабіні розташовані реле та запобіжники.

Основне обладнання трамвайного вагону зосереджено на візках.

Тут можна спостерігати чотири тягові електричні двигуни а також гальмівну систему до них.

Електричне обладнання що встановлено на рамі вагону показано на рисунку 1.2.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-11 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 12   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

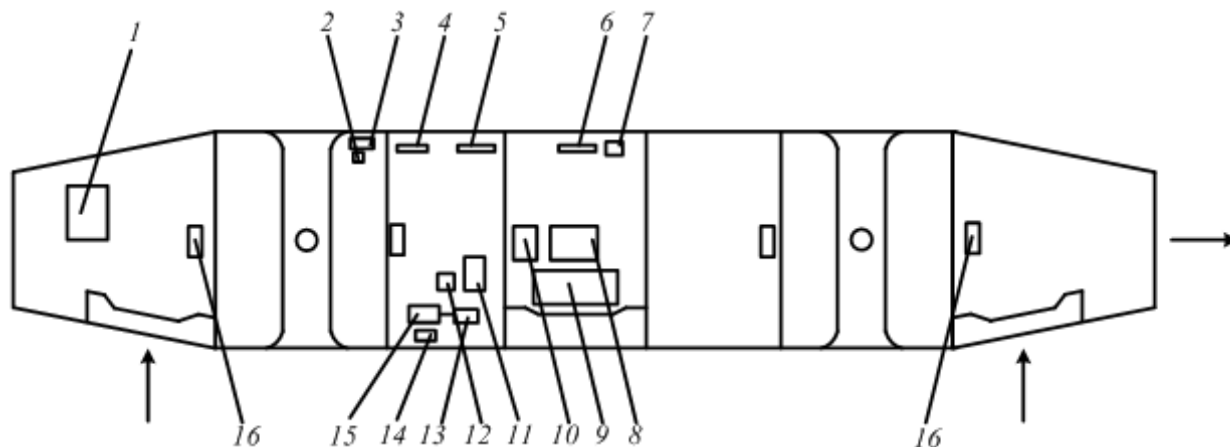


Рис.1.2. Електричне обладнання що встановлено на рамі вагону

До обладнання можна віднести акумуляторні батареї які розташовані у кузові комутаційне обладнання для тягових електричних двигунів реле та регулятори панелі з контакторами.

Також входять гальмівні та рухомі реостати а також ящик з реостатом для шунтування кіл якоря та збудження.

Довершує наявність допоміжного зарядного генератора та відповідної клемної коробки для його приєднання.

Розглянемо кінематичну схему трамвайного вагону.

До кінематичної схеми трамвайного вагона можна віднести такі елементи як колісні пари підшипникові вузли циліндричні шестерні ведучі шестерні шестерні конічні підшипники введених шестерней. ведуча конічна шестерня тяговий двигун карданний вал гальмівні елементи та підшипники ведучої шестерні.



Рис.1.3. Колісні пари трамвайного вагону

Принцип роботи кінематичної схеми буде розглянуто нижче.

Для відтворення руху конічна шестерня отримуємо обертальне зусилля від тягового електричного двигуна яке передається до неї через карданний вал який щільно посаджений на хвостову шестерню.

На проміжному валу при цьому знаходиться провідна циліндрична шестерня.

Зчеплення цих елементів утворює з'єднання яке передає обертовий момент від електричного тягового двигуна до колеса.

Таким чином при обертанні тягово-електричного двигуна здійснюється обертання провідного колеса і відповідно рух трамвайного вагону.

## 1.2. Система електропривода трамвая

Для реалізації можливості зміни швидкості руху трамвайного вагону використовується система регулювання його параметрів.

Зазвичай це система з контакторно-резисторними елементами які здійснюють почергове приєднання окремих опорів до елементів тягової електромеханічної системи.

При цьому відбувається зміна режимів руху або гальмування відповідно до застосованої програми.

Контакторно-резисторне керування може забезпечити плавність регулювання швидкості руху трамвайного вагону а також уповільнення його у необхідному діапазоні зміни швидкості.

Ступінчаста зміна швидкості досягається вибором відповідних опорів та комутації їх щодо з'єднання з елементами тягової електромеханічної системи.

Для комутації використовуються спеціальні контактори що забезпечують надійне з'єднання елементів електричної схеми.

Для запобігання аварійних режимів застосовуються блокувальні системи.

Автоматична система релейно-контакторного керування має містити у своєму складі низьковольтний сервопідвігун за допомогою якого здійснюється керування процесом комутації.

При цьому водій має визначити необхідну швидкість руху транспортного засобу при розгоні або гальмуванні.

Недоліком такої системи є висока вартість та необхідність здійснювати обслуговування серводвигунів.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-11 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 15   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

Схема релейно-контакторної системи керування трамвайним вагоном показана на рисунку 1.4.

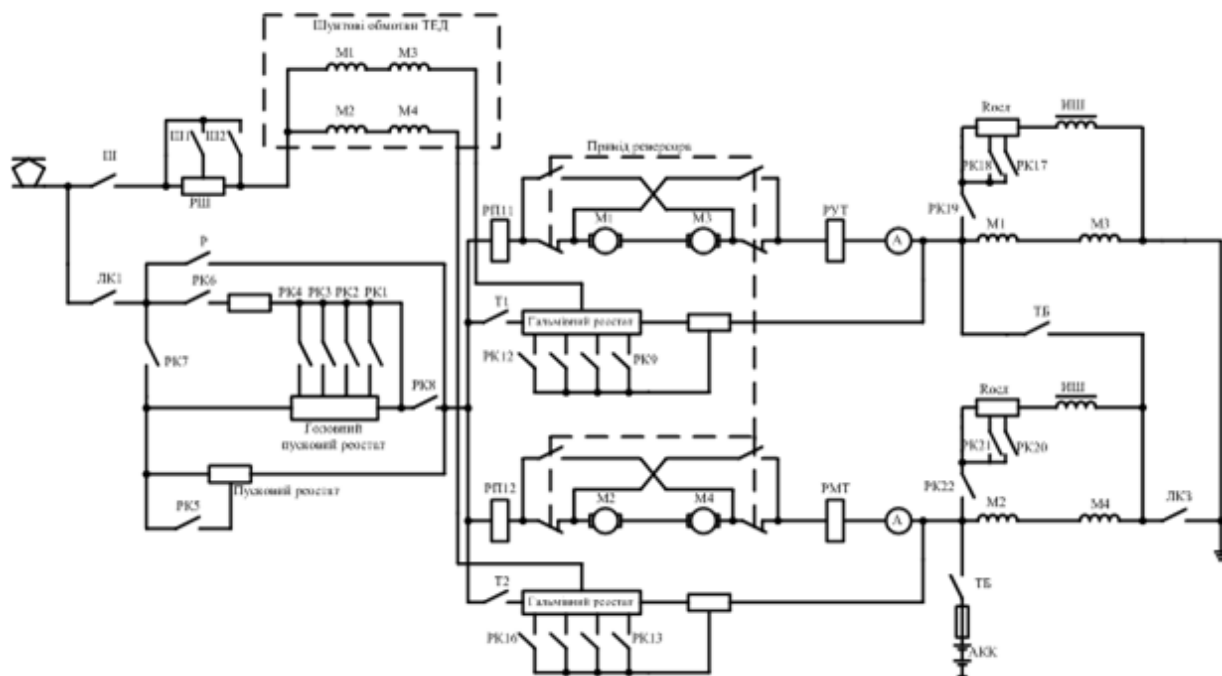


Рис.1.4. Схема релейно-контакторної системи керування трамвайним вагоном

Схема містить чотири тягові електричні двигуни які можуть бути приєднані попарно або послідовно до двох привідних вісей.

Ці тягові двигуни мають серієсні обмотки що забезпечують надійне збудження електричної машини.

Також можна бачити на схемі лінійний контактор за допомогою якого здійснюється живлення електротехнічного комплексу від тягової мережі.

Також можна бачити шунтовий контактор що забезпечує приєднання обмоток збудження.

Схема містить шунтовий резистор для обмеження струму.

Також можна бачити контактори ходу в прямому та зворотному напрямках.

Для регулювання збудження при здійсненні гальмування використовуються гальмівні контактори.

Прискорення руху відбувається з контролем від реле.

Ослаблення збудження відбувається за допомогою спеціального реостату.

Для захисту використовуються такі елементи як реле мінімального та максимального струмів.

Для зменшення пускового струму використовуються пускові реостати.

Для режиму гальмування передбачено спеціальне з'єднання з гальмівними реостатами.

Слід зазначити що використання релейно-контактної системи керування має ряд складнощів які необхідно подолати.

Наприклад таких як підгоряння контактів яке може призвести до поламок тягової електромеханічної системи.

Головним недоліком релейно-контактного керування є наявність великої кількості опорів які необхідні для здійснення регулювання.

Але їх наявність значно підвищує втрати електричної енергії при регулюванні швидкості руху трамвайного вагону.

Тому для підвищення економічної ефективності використання трамвайних вагонів слід переходити на більш ефективні методи керування.

Одним з таких методів може бути керування за допомогою широтно-імпульсного перетворювача.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-11 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 17   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

Розвиток перетворювальної техніки дозволяє використовувати у якості силових блоків IGBT-модулі які складають структуру перетворювального пристрою та здійснюють регулювання вихідної напруги тягових двигунів.

Дуже зручно виконувати регулювання вихідної напруги перетворювача за допомогою методу широтно-імпульсної модуляції.

Такий підхід дає можливість суттєво підвищити показники ефективності використання електротехнічного обладнання забезпечити надійність та безперебійність його роботи.

Головною перевагою тягових електромеханічних систем з широтно-імпульсними перетворювачами є економічність та плавність регулювання параметрів.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-11 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 18   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

### 1.3. Силові елементи електроприводу трамвая

Виконаємо вибір електромеханічного обладнання трамвайного вагону. Скористаємось попередніми розрахунками щодо визначення типу електроприводу та наявного джерела живлення трамвайного вагону.

Перш за все розрахуємо електричну потужність тягових двигунів. Враховуючи параметри тягової електромеханічної системи можна зробити попередній розрахунок потужності електричних машин.

$$P_{\text{дп}} \geq k_{\text{з}} \cdot \frac{m_{\text{ваг}} \cdot g \cdot \psi_{\text{к}} \cdot V}{r_{\text{тд}}}, \quad (1.1)$$

Таблиця 1.1. Характеристика двигуна трамвая

| Назва параметру                             | Одиниці виміру               | Величина |
|---------------------------------------------|------------------------------|----------|
| Номінальна потужність, $P_{\text{н}}$       | кВт                          | 45       |
| Номінальна напруга, $U_{\text{н}}$          | В                            | 275      |
| Номінальний струм, $I_{\text{н}}$           | А                            | 190      |
| Частота обертання, $n$                      | об/хв.                       | 1200     |
| Номінальний ККД, $\eta_{\text{н}}$          | %                            | 86,1     |
| Момент інерції двигуна, $J_{\text{дв}}$     | $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ | 12       |
| Опір якорного кола двигуна, $R_{\text{дв}}$ | Ом                           | 0,055    |

#### 1.4. Вибір перетворювача електропривода трамвая

Живлення тягових електричних двигунів будемо здійснювати від перетворювача який буде виконувати зміну амплітуди вихідної напруги заздалегідь розрахованим завданням відповідно до закону керування. Наведемо розрахункові рівняння за якими проведемо аналіз можливих рішень щодо вибору перетворювача.

Для керування рухом трамвайного вагону вибираємо імпульсний перетворювач який буде здійснювати керування зміною напруги живлення тягових електричних двигунів застосовуючи закон широтну імпульсного регулювання.

До переваг такої системи можна віднести можливість змінювати швидкість трамвайного вагону від 5 до 70 км/год а також виконувати прискорення та уповільнення трамвайного вагону. Слід також зазначити можливість плавного регулювання швидкості при русі трамваю а також можливість здійснювати рекуперацію електричної енергії у контактну мережу.

При пуску використовується занижене значення вихідної напруги імпульсного перетворювача що дає можливість плавного запуску електричних двигунів та руху зі швидкістю 1,5 км/год.

Також оберемо пристрої захисту та контролю параметрів системи керування та фізичних величин електричних машин що входять до складу електроприводу трамвайного вагону.

Проведемо розрахунок та вибір засобів контролю та керування електроприводом трамвайного вагону.

$$U_{min} \geq U_{дп}; \quad (1.2)$$

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-11 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 20   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

$$I_{\text{м.н}} \geq I_{\text{дв}}; \quad (1.3)$$

$$U_{\text{дв}} = 275 \text{ В};$$

$$I_{\text{дв}} = 190 \text{ А}.$$

Таблиця 1.2. Характеристика перетворювача електропривода трамвая

| Назва вузла(блоку)                                | Номінальне значення                                   |
|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 1. Блок імпульсного перетворювача<br>(Блок III)   | Номінальна входна напруга 550В                        |
|                                                   | Номінальний вихідний струм 200А                       |
|                                                   | Максимальний вихідний струм в пусковому режимі 300 А  |
|                                                   | Максимальний вихідний струм в гальмівному режимі 250А |
| 2. Блок керування                                 | Номінальна напруга живлення 24В                       |
|                                                   | Номінальний струм 5 А                                 |
|                                                   | Діапазон напруги живлення 16,8? 30В                   |
| 3. Блок контролера ходу<br>БКВХ(гальмування БКВТ) | Номінальна напруга живлення 24В                       |
|                                                   | Номінальний струм 10А                                 |
| 4. Роз'єднувач-заземлювач                         | Номінальна напруга головних контактів 550В            |
|                                                   | Номінальний струм головних контактів 630 А            |

## 1.5. Статичні та енергетичні характеристики електропривода трамвая

Складемо рівняння та розрахуємо параметри схеми заміщення системи імпульсних перетворювач напруги двигун постійного струму що приводить до руху привідні колеса трамвайного вагону.

$$\omega_{ном} = \frac{\pi \cdot n}{30}, \quad (1.4)$$

де,  $n$  – номінальна швидкість.

$$\omega_{ном} = \frac{3,14 \cdot 1200}{30} = 125,664 \text{ рад/с.}$$

$$L_{дв} = \frac{0,25 \cdot 275}{2 \cdot 125,664 \cdot 190} = 1,44 \text{ мГн.}$$

Тоді,

$$L_c = 1,44 \text{ мГн.}$$

Електромагнітна стала часу:

$$T_c = \frac{L_c}{R_e} = \frac{1,44 \cdot 10^{-3}}{0,055} = 0,026.$$

Зараз рахунковими рівняннями системи керування побудуємо статичні характеристики при зміні параметрів електроприводу.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-11 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 22   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

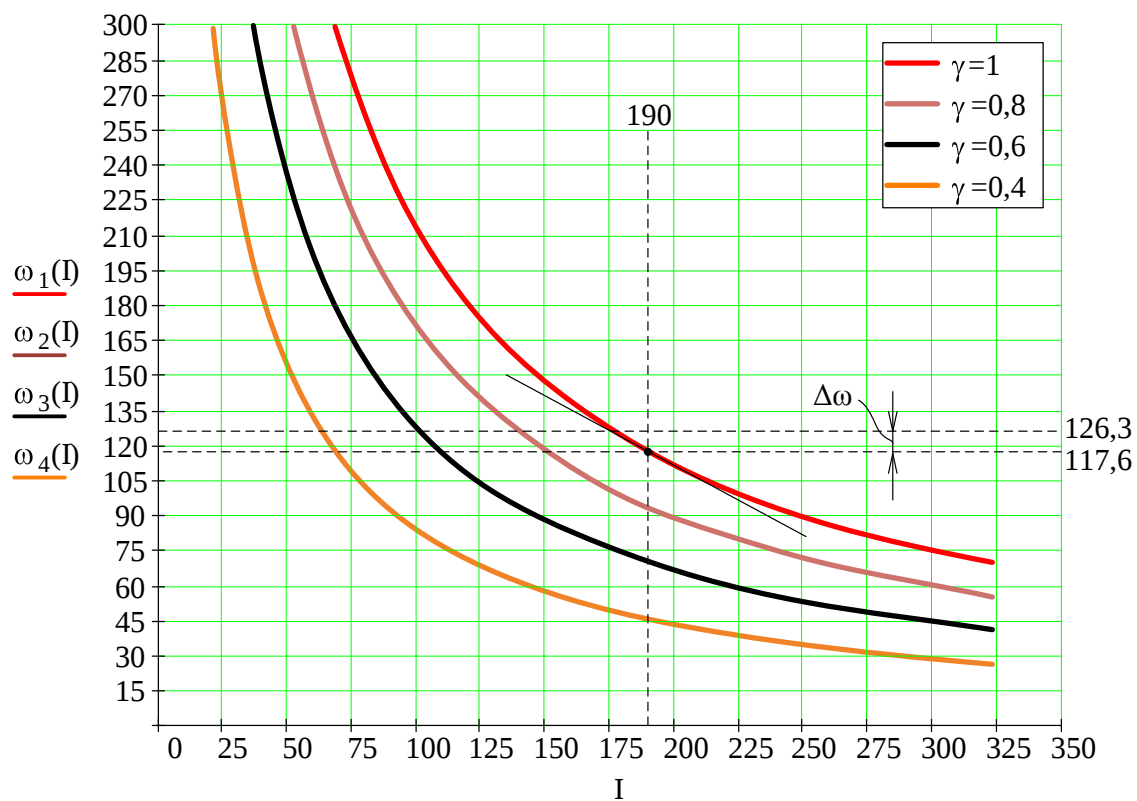


Рис.1.5. Статичні характеристики при зміні параметрів електроприводу

Також важливим для представлених розрахунків системи керування є визначення енергетичних характеристик системи електроприводу.

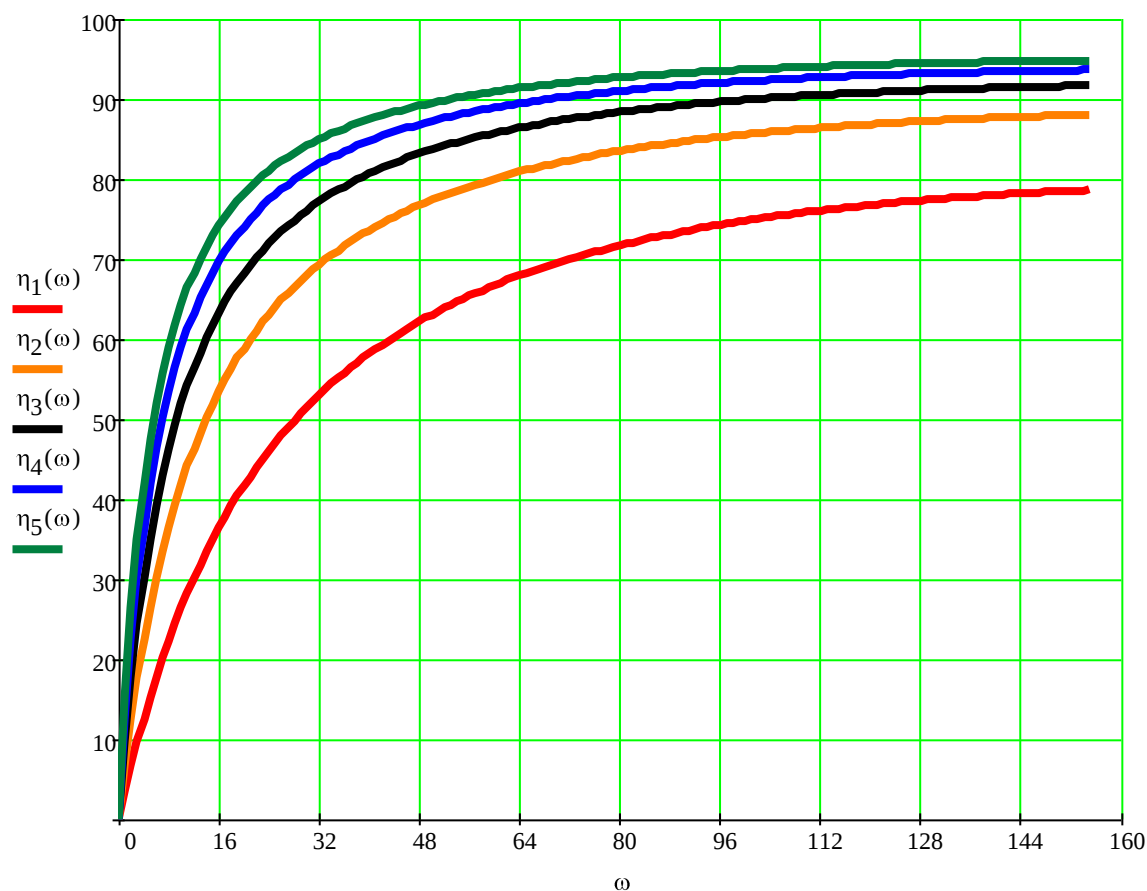


Рис.1.6. Графіки енергетичних характеристик системи електроприводу

Побудовані графіки статичних характеристик та енергетичних процесів що протікають в електроприводі трамвайного вагону показує що запропонована система з імпульсним перетворювачем є доволі ефективним рішенням що підвищує показники якості керування та перетворення електричної енергії.

## Розділ 2. Система керування електроприводом трамвая

### 2.1. Вибір структури системи керування електроприводом трамвая

Представимо деякі тлумачення щодо розрахунку та складання системи керування трамвайним вагоном за допомогою регульованого електроприводу.

Головним чинником у запропонованій системі будемо вважати можливість стабілізувати швидкість руху трамвайного вагону на заданому рівні.

При цьому рішенні важливим є можливість забезпечити необхідний момент на валу тягового електричного двигуна.

Складність процесом розвитку та створенням запропонованої системи керування електричними двигунами створює необхідність їх живлення імпульсним характером напруги.

Це ускладнює розрахунки та налаштування контурів регулювання у розглянутій системі керування.

Розглянемо декілька можливих структур систем керування що працюють за принципом стабілізації частоти обертання та моменту тягового електричного двигуна.

|           |                 |          |        |     |                          |                 |      |        |
|-----------|-----------------|----------|--------|-----|--------------------------|-----------------|------|--------|
|           |                 |          |        |     | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-11 |                 |      |        |
| Зм.       | Лист            | № докум. | Підпис | Дат |                          |                 |      |        |
| Розробив  | Чудний ЄВ       |          |        |     | Розділ 2                 | Літ.            | Лист | Листів |
| Перевірів | Берідзе Т.М.    |          |        |     |                          |                 | 25   | 12     |
| Реценз.   |                 |          |        |     |                          |                 |      |        |
| Н. Контр. | Берідзе Т.М.    |          |        |     |                          |                 |      |        |
| Затвердив | Пересунько І.І. |          |        |     |                          | КНУ<br>ЕЕМ-22ск |      |        |

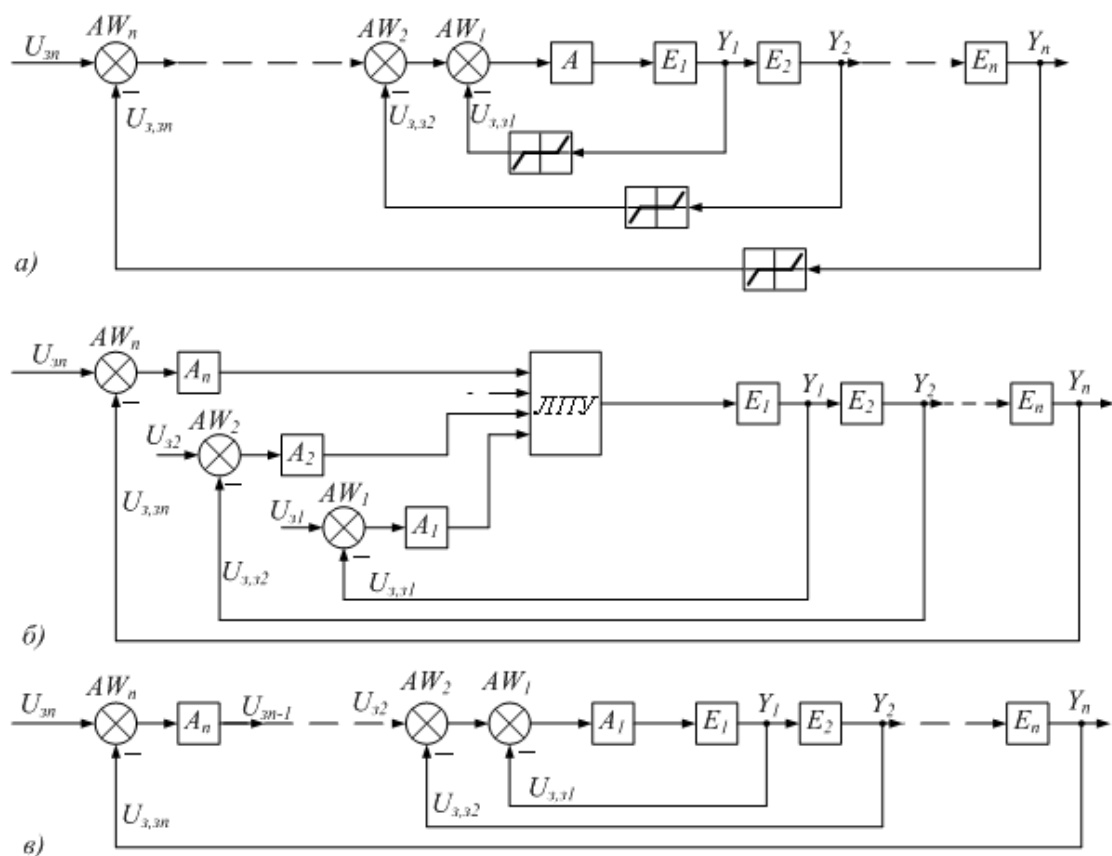


Рис.2.1. Структури системи керування

Можна розглянути системи з загальним суматором або з паралельним регулюванням контурів керування.

Системи із загальним суматором використовують контури зворотніх зв'язків які необхідно налаштовувати окремо. Кожен з контурів відповідає за певну величину системи електроприводу. Відповідні сигнали завдання коригуються за допомогою цих контурів. Для ефективності роботи таких систем необхідним є обмеження у регулюванні лише одного заданого параметру електроприводу.

У системах з паралельним регулюванням параметрів зазвичай використовується логічний перемикаючий пристрій. Таким чином

перемикання між каналами керування дозволяє використовувати лише один з заданих параметрів системи електроприводу.

Доволі широкого розповсюдження набули системи підлеглого регулювання параметрів з виділенням окремих контурів керування. Так у таких системах розрізняють декілька фізичних величин параметри і завдання яких контролюються одним з розроблених контурів регулювання.

У структурах з імпульсним регулюванням напруги останньої системи набули широкого розповсюдження адже відрізняються своєю надійністю та простотою налаштовування контурів регулювання окремих величин.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-11 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 27   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

## 2.2. Елементи системи керування електроприводом трамвая

Складемо розрахункові рівняння щодо визначення параметрів контурів регулювання які використовуються у замкненій системі регулювання електроприводом трамвайного вагону.

Будемо відштовхуватись від внутрішнього контуру за показником струму тягової електричної машини.

Складемо розрахункові рівняння та визначимо придатну функцію у замкненому контурі струму тягової електричної машини.

$$G_{pc}(p) = \frac{R_e \cdot (T_e \cdot p + 1)}{2 \cdot T_{mc} \cdot p \cdot k_{en} \cdot k_{dc}},$$

За розрахунковими виразами складемо структурну схему регулятора струму та визначимо елементи для її функціонування.

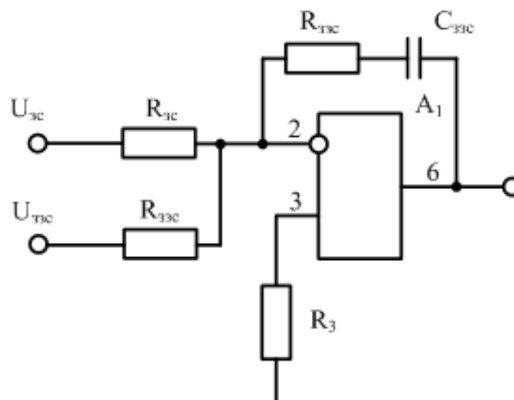


Рис.2.2. Структурна схема регулятора струму

Регулятор швидкості системи електроприводу трамвайного вагону виконаємо у пропорційному виконанні.

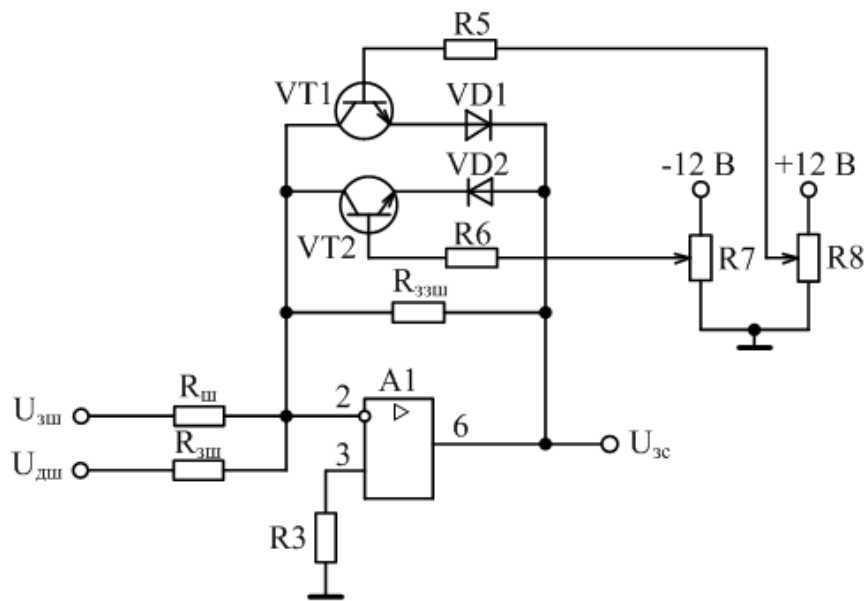


Рис.2.3. Структурна схема регулятора швидкості

Налаштування та визначення передатної функції регулятора швидкості можна здійснити за відомими виразами а також скласти схематичне представлення та визначити параметри елементів що її складають.

### 2.3. Алгоритми роботи системи керування електроприводом трамвая

Розглянемо алгоритм роботи замкненої системи керування трамвайним вагоном. Система містить тяговий реверсивний електропривод привідних колес трамвайного вагону. До складу електромеханічної системи входить тяговий електричний двигун який живиться від імпульсного перетворювача. Живлення імпульсного перетворювача здійснюється від контактної мережі постійного струму. Система розбудована за принципом підлеглого регулювання. Для відтворення режимів роботи використовуються датчики та регулятори електричних параметрів електроприводу. Розглядаються автоматичний та напіваавтоматичний режими роботи. Сигнали завдання виробляємо спеціально розроблений обчислювальний пристрій. Обчислювальний пристрій розбудовано на мікропроцесорній системі яка забезпечує необхідну швидкодію щодо розрахунків керуючих впливів та корекції сигналів завдання. Алгоритм роботи обчислювального пристрою розбудованого на базі мікропроцесорної системи підпорядковується спеціально створеним програмним рішенням.

Таблиця 2.1. Алгоритм роботи обчислювального пристрою розбудованого на базі мікропроцесорної системи

| $T$       | $T_{ec}$ | $\frac{T}{T_{ec}}$                | $k_{pc}$                                 | $k_{pm}$                            |
|-----------|----------|-----------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------|
| 0,00<br>3 | 0,62     | 0,0048                            | 0,04228                                  | 221,8                               |
| -         | -        | $\frac{2}{512} = \frac{2^1}{2^9}$ | $\frac{11}{256} = \frac{2^3 + 2^1}{2^8}$ | $2^7 + 2^6 + 2^4 + 2^3 + 2^2 + 2^1$ |

Живлення електромеханічної системи трамвайного вагону виконується від контактного дроту. Для запобігання аварійним режимом у схемі використовується автоматичний вимикач. Імпульсний перетворювач живить тяговий електричний двигун випрямленою напругою з амплітудою відповідною до сигналу завдання. Доволі суттєву увагу приділяється пуску тягових електричних двигунів оскільки при цьому спостерігається значне зростання статичного навантаження. Тому у режимі пуску суттєво обмежене прискорення, а швидкість руху трамвайного вагону буде змінюватись плавно завдяки присутності у системі керування задатчика інтенсивності. У режимі гальмування виконується приєднання тягового електричного двигуна до гальмівного резистору. Надлишки електричної енергії що утворюється у колі якоря тягового електричного двигуна розсіюються на гальмівному резисторі за допомогою імпульсного режиму гальмування.

Математичні рівняння що описують пуск та гальмування тягового електроприводу трамвайного вагону побудовані на основі безперервних передавальних функцій.

Таблиця 2.2. Математичні рівняння що описують пуск та гальмування тягового електроприводу трамвайного вагону побудовані на основі безперервних передавальних функцій

| Регулятор | Передавальна функція                                                  | Різницеве рівняння                                                                                                            |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Струму    | $W_{pc}(p) = k_{pc} + \frac{T}{T_{ec}} \cdot \frac{T \cdot z}{1 - z}$ | $U_{впк}^{pc}(n+1) = U_{впк}^{pc}(n) - \frac{2^4}{2^9} U_{вк}^{pc}(n+1) + \frac{11}{256} (U_{вк}^{pc}(n+1) - U_{вк}^{pc}(n))$ |
| Швидкості | $W_{pm}(p) = k_{pm}$                                                  | $U_{впк}^{pm}(n+1) = 221,8 \cdot U_{вк}^{pm}(n)$                                                                              |

Оскільки живлення тягового електричного двигуна здійснюється від імпульсного перетворювача який має у якості вихідної напруги перервну функцію то для подальшого розрахунку використовують перехід від безперервної до дискретної математичної моделі.

Отже представимо математичну модель тягового електроприводу трамвайного вагон у дискретній формі.

$$U_{\text{вих}}^{\text{pc}}(n+1) = U_{\text{вих}}^{\text{pc}}(n) - \frac{2^1}{2^9} U_{\text{вх}}^{\text{pc}}(n+1) +$$

$$+ \frac{11}{256} (U_{\text{вх}}^{\text{pc}}(n+1) - U_{\text{вх}}^{\text{pc}}(n))$$

$$U_{\text{вих}}^{\text{рш}}(n+1) = 221,8 \cdot U_{\text{вх}}^{\text{рш}}(n)$$

Представимо вирази регуляторів струму та частоти обертання у дискретному вигляді.

$$W_{\text{pc}}(p) = k_{\text{pc}} + \frac{T}{T_{\text{ec}}} \cdot \frac{T \cdot z}{1 - z}$$

$$W'_{\text{рш}}(p) = k_{\text{рш}}$$

## 2.4. Принципова схема електроприводу трамвая

Розглянемо принципову схему тягового електроприводу трамвайного вагону. Схема містить у своєму складі тягової електричній двигуни тяговий електричний перетворювач та систему керування ним. Можна бачити що силові кола та кола керування розділені між собою що унеможлиблює вплив силової частини на керуючі елементи. Живлення трамвайного вагону відбувається від мережі 550 В. Система керування а також допоміжні системи такі як освітлення сигналізація живляться від окремої мережі напругою 24 В. Також система керування містить спеціальні контролери завдяки яким відбувається регулювання швидкості руху трамвайного вагону. Контролери мають декілька фіксованих положень. Розрізняють режими усталеного руху з прискоренням та уповільненням. Для обмеження струмів та екстреного гальмування використовують спеціально зібрані схеми резисторів. Пускові струми обмежуються на рівні 100 А. Для здійснення екстреного гальмування використовуються спеціальні контактори які відокремлюють електричні кола тягових електричних машин та кола гальмування. Робоче гальмування від імпульсного перетворювача використовується із заздалегідь розрахованим прискоренням відповідно до умов пересування трамвайного вагону. При відриві пантографу або спрацьовуванні системи захисту живлення трамвайного вагону припиняється. Тому важливим є забезпечення живлення системи керування тяговим електроприводом трамвайного вагону від спеціально підготовлених акумуляторних пристроїв.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-11 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 33   |

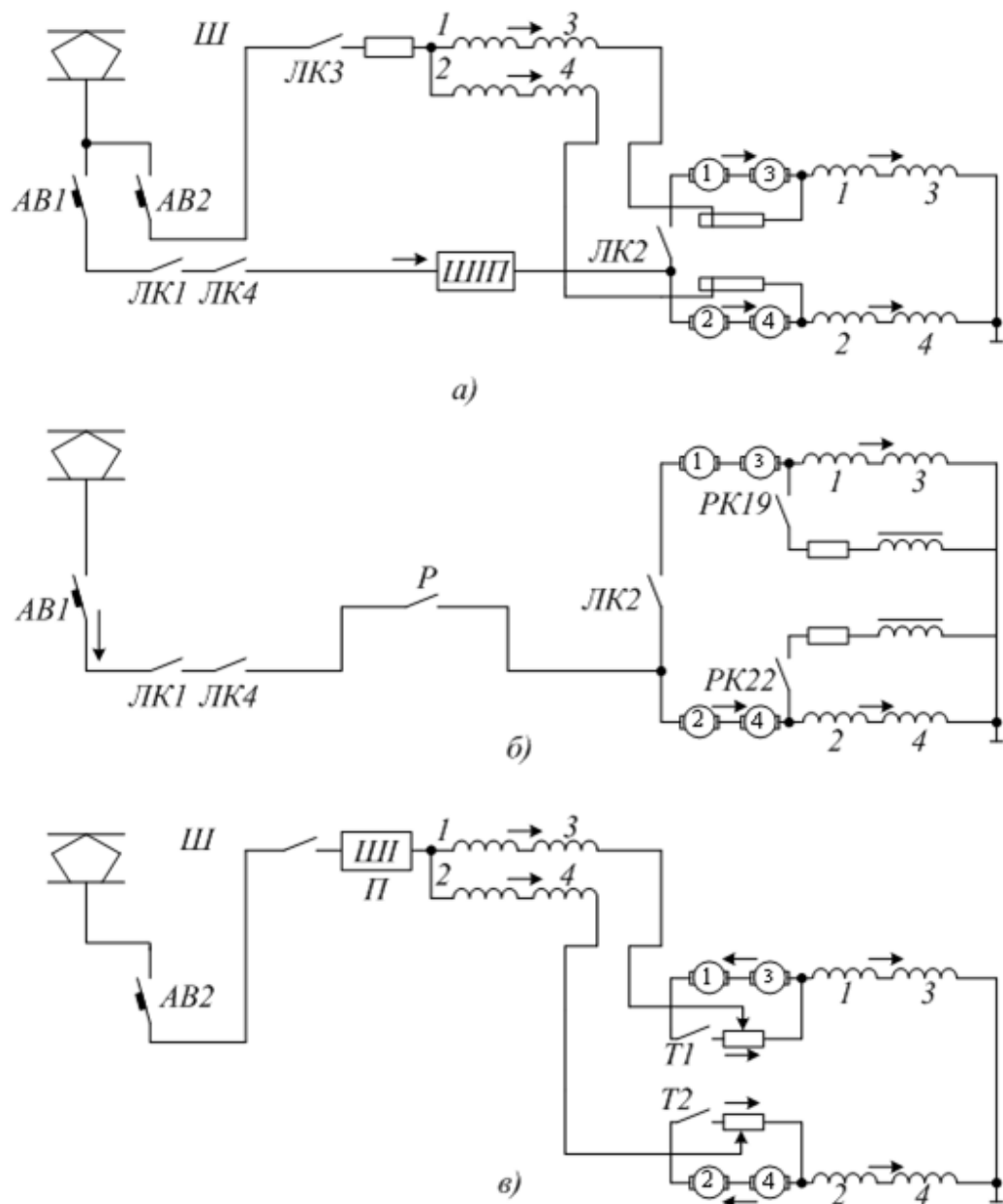


Рис.2.4. Принципова схема електроприводу трамвая

Транзисторний перетворювач який виконує роль джерела імпульсного живлення для тягових електричних двигунів зібрано як комплектний пристрій. Він також включає у свою структуру силові кола та кола системи керування. Транзисторний перетворювач зібрано на IGBT модулях за несиметричною схемою випрямлення. Система з транзисторним перетворювачем може виконувати два види гальмування. У режимі

динамічного гальмування використовується гальмівний резистор та спеціальний гальмівний транзистор який виконує роль імпульсного перемикача. У режимі рекуперативного гальмування використовуються зворотні діоди силових IGBT модулів. Для згладження пульсацій у силовому колі використовується індуктивний дросель. Для зменшення перенапруги на силових IGBT модулях застосовуються спеціальні конденсаторні схеми. Керування кожним з привідних тягових електричних двигунів погоджується через окремий перетворювач.

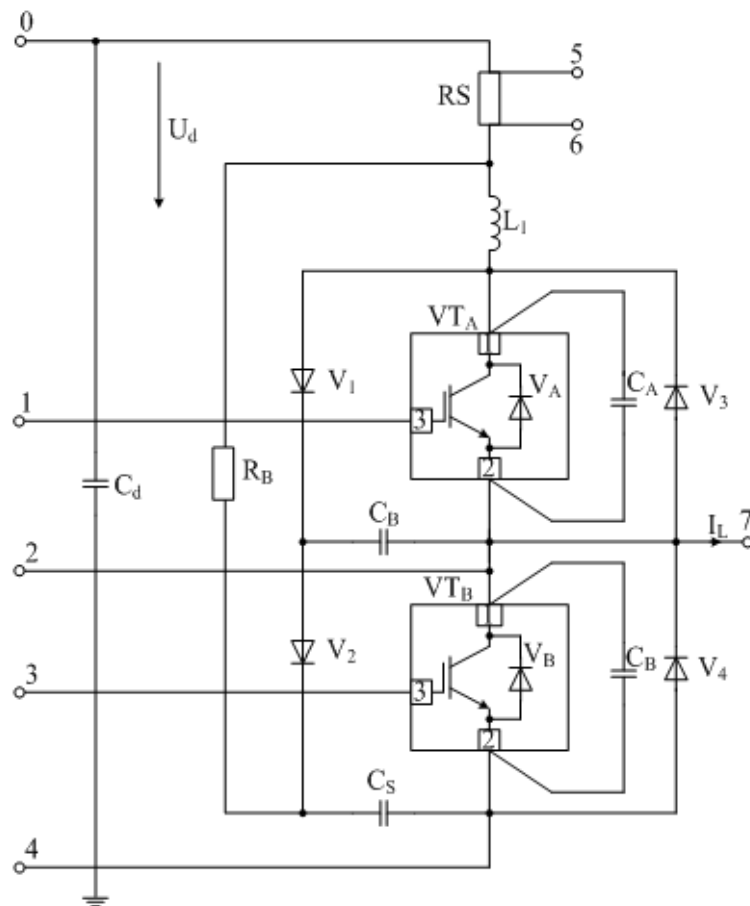


Рис.2.5. Принципова схема перетворювача на IGBT транзисторах

Таким чином при використанні транзисторних перетворювачів здійснюється регулюванням напруги та струму тягових електричних двигунів.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-11 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 36   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

## Розділ 3. Моделювання динамічних режимів роботи електроприводу трамвая

### 3.1. Моделювання динамічних режимів роботи електроприводу трамвая

Розглянемо динамічні режими роботи тягового електроприводу трамвайного вагону.

Зручно виконувати дослідження динамічних режимів електромеханічних систем скориставшись математичним моделюванням.

Параметри математичної моделі мають відповідати реальним електричним схемам який застосовуються для електроприводу трамвайного вагону.

Налаштуванням контурів регулювання будемо виконувати відповідно до розрахованих параметрів системи керування.

Розглянемо динамічні режими роботи трамвайного вагону при пуску а також при здійсненні гальмування електромеханічної системи.

|           |                 |          |        |     |                          |                 |      |        |
|-----------|-----------------|----------|--------|-----|--------------------------|-----------------|------|--------|
|           |                 |          |        |     | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-11 |                 |      |        |
| Зм.       | Лист            | № докум. | Підпис | Дат |                          |                 |      |        |
| Розробив  | Чудний ЄВ       |          |        |     | Розділ 3                 | Літ.            | Лист | Листів |
| Перевірів | Берідзе Т.М.    |          |        |     |                          |                 | 37   | 3      |
| Реценз.   |                 |          |        |     |                          |                 |      |        |
| Н. Контр. | Берідзе Т.М.    |          |        |     |                          |                 |      |        |
| Затвердив | Пересунько І.І. |          |        |     |                          | КНУ<br>ЕЕМ-22ск |      |        |

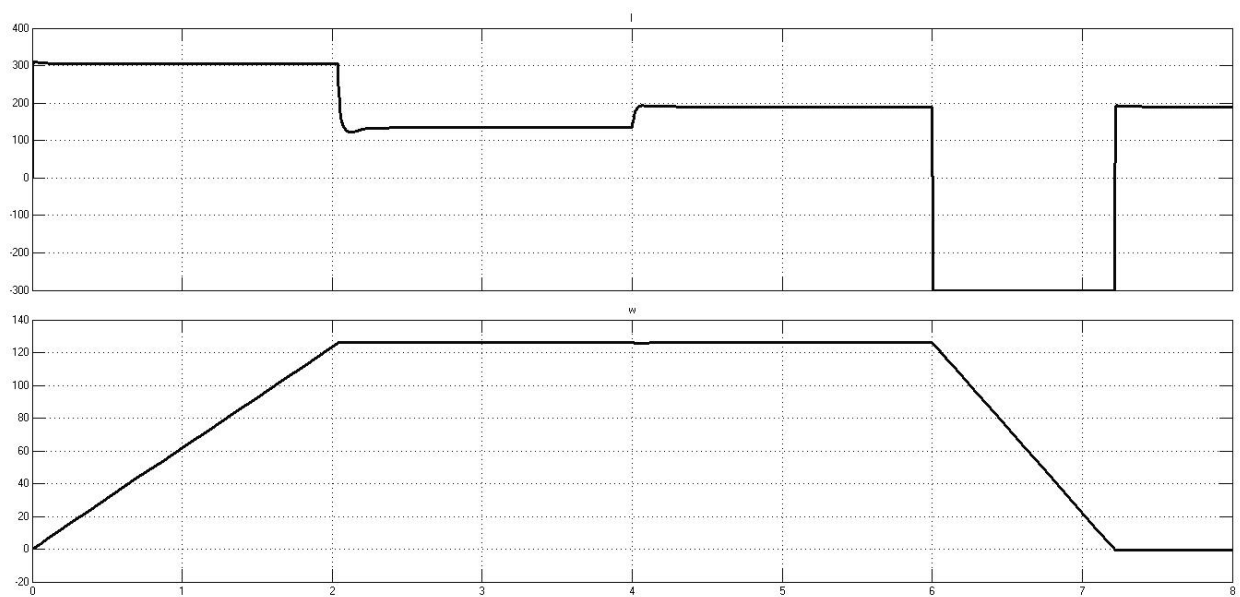


Рис.3.1. Моделювання динамічних режимів роботи електроприводу трамвая

За отриманими графіками можна зробити висновки щодо показників якості протікання перехідних процесів у тяговій електромеханічній системі трамвайного вагону.

### 3.2. Аналіз показників якості системи керування електроприводом трамвая

Оскільки головним параметром та критерієм якості перехідних процесів у тяговому електроприводі трамвайного вагону виступає стабілізація швидкості руху, то скористаймося графіком зміни частоти обертання тягового електричного двигуна при зміні параметрів електромеханічної системи.

З отриманих графіків можна бачити що показники якості перехідних процесів тягової електромеханічної системи трамвайного вагону залежать від правильності розрахованих передатних функцій регуляторів у контурах керування.

Розроблена система керування електроприводом трамвайного вагону відрізняється малим часом перехідних процесів у режимі пуску та гальмування. Можна також бачити що важливим моментом є наявність режиму холостого ходу при здійсненні зміни частоти обертання тяговим електричним двигуном. Статизм замкненої системи регулювання параметрів тягового електричного двигуна трамвайного вагону має нульові значення.

Таким чином можна стверджувати що представлено модернізована система тягового електроприводу трамвайного вагону з транзисторним перетворювачем суттєво покращує енергетичні та регулювання характеристики електроприводу.

## Висновки

У першому розділі була розглянута інформація та параметри й характеристики електромеханічної системи трамвайного вагону.

Була розроблена кінематична схема розраховані навантаження та визначено потужність тягового електричного двигуна.

Також була запропонована модернізація тягової електромеханічної системи трамвайного вагону з використанням транзисторного перетворювача.

Розраховано силові кола перетворювача та обрану елементи які його складають.

Також було розраховано та обрано елементи захисту та керування.

Регулювання параметрів тягового електроприводу трамвайного вагону було вирішено здійснювати за законом широтно-імпульсної модуляції.

Були розраховані статичні та енергетичні характеристики модернізованої системи електроприводу.

Слід зазначити що отримані статичні характеристики при використанні у якості джерела живлення імпульсного транзисторного перетворювача відрізняються особливою жорсткістю та стійкістю до перевантаження.

У другому розділі були представлені розрахунки системи керування тяговим електроприводом трамвайного вагону.

Було запропоновано виконувати регулювання параметрів тягової електромеханічної системи за принципами підлеглого керування.

У якості контурів регулювання використовувались випрямлений струм та частота обертання тягового електричного двигуна. Налаштуванням

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-11 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 40   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

контурів регулювання цих параметрів дозволило суттєво підвищити якість перехідних процесів.

Для контролю параметрів у зазначених колах було обрано та встановлено датчики що забезпечують зворотний зв'язок за вказаними величинами.

Для обчислення керуючих впливів було запропоновано використовувати мікропроцесорну систему керування яка містить обчислювальний пристрій та систему зв'язків керуючих модулів.

У третьому розділі було досліджено динамічні режими роботи тягової електромеханічної системи трамвайного вагону та отримано графіки перехідних процесів зазначеної системи.

Вигляд графіків та характер протікання перехідних процесів свідчать про підвищення надійності роботи електромеханічного обладнання трамвайного вагону в усіх режимах його функціонування.

Якісні показники регулювання були визначені для контуру стабілізації швидкості.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-11 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 41   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |