

**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:**

**Адаптивне по рівню потужності керування тяговим електроприводом  
рудничного електровозу у пуско-гальмівних режимах**

**Виконав: студент групи ЗЕЕМ-22ск**

**Дмитро САФОНЕНКО**

**Керівник випускної роботи \_\_\_\_\_ д.ф., ст. викл. Владислав БАРАНОВСЬКИЙ**

**Нормо контролер \_\_\_\_\_ д.ф., ст. викл. Владислав БАРАНОВСЬКИЙ**

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

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

**Кривий Рір 2025 р.**

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

---

САФОНЕНКО Дмитро Сергійович

---

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Адаптивне по рівню потужності керування тяговим  
електроприводом рудничного електровозу у пуско-гальмівних режимах

1. Термін подання студентом роботи: 16 червня 2025 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є модернізація  
електромеханічної системи рудничного електровозу. Завданням є розрахунок  
характеристик та дослідження роботи автоматизованого  
електромеханічного комплексу у пуско-гальмівних режимах
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I.  
Особливості експлуатації та вимоги до електроприводу електровозів у  
шахтних та гірничих умовах; II. Вибір типу тягового електроприводу  
рудничних електровозів; III. Система адаптивного керування тяговим  
електроприводом рудничного електровозу.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових  
креслень) I. Механічні характеристики асинхронного двигуна за різних законів  
частотного керування; II. Функціональна схема векторного способу керування  
за абсолютним ковзанням; III. Адаптивне по рівню потужності керування  
тяговим електроприводом рудничного електровозу; IV. Графічне відшукування,  
що показує центр ваги результуючої нечіткої множини; V. Узагальнена  
структура алгоритму нечіткого керування.

5. Консультанти розділів роботи

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

6. Календарний план

| №  | Етапи роботи                                     | Термін   |
|----|--------------------------------------------------|----------|
| 1  | Робота електровозів у шахтних та гірничих умовах | 15.05.25 |
| 2  | Технічні характеристики електровозів             | 17.05.25 |
| 3  | Машини постійного струму                         | 19.05.25 |
| 4  | Вентильні машини                                 | 21.05.25 |
| 5  | Вентильно-індукторні машини                      | 24.05.25 |
| 6  | Асинхронні машини з короткозамкненим ротором     | 26.05.25 |
| 7  | Закони керування тяговим електроприводом         | 31.05.25 |
| 8  | Класична система векторного керування            | 04.05.25 |
| 9  | Система прямого керування моментом               | 10.06.25 |
| 10 | Адаптивне керування по рівню потужності          | 14.06.25 |
|    |                                                  |          |
|    |                                                  |          |
|    |                                                  |          |
|    |                                                  |          |
|    |                                                  |          |

Дата видання завдання 12.05.2025 р.

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

Дмитро САФОНЕНКО  
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Владислав БАРАНОВСЬКИЙ  
(Ім'я, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової атестаційної роботи бакалавра на тему: «Адаптивне по рівню потужності керування тяговим електроприводом рудничного електровозу у пуско-гальмівних режимах»

49 с., 5 рис., 11 літературних джерел

У першому розділі було зазначено, що тягові приводи постійного струму перестають відповідати сучасним експлуатаційним вимогам із таких причин: великі масогабаритні показники, низька надійність щітково-колекторного масогабаритні показники, низька надійність щітково-колекторного механізму, висока початкова вартість, зумовлена складністю виготовлення і великим вмістом кольорових металів. виготовлення та великим вмістом кольорових металів, значні експлуатаційні витрати. експлуатаційні витрати. Також можна сказати, що незважаючи на розвиток силової перетворювальної техніки переважна більшість рудничних електровозів оснащена реостатною системою управління. реостатною системою управління, а отже, існує значна перевитрата енергії. перевитрата енергії. Крім того, тягові електроприводи рудничних електровозів на базі колекторних машин можуть вважатися вибухобезпечними умовно, через іскріння в щітково-колекторному вузлі.

У другому розділі показано, що завдяки бурхливому розвитку силової електроніки та мікропроцесорної техніки і мікропроцесорної техніки, що дає змогу реалізовувати найскладніші алгоритми керування, асинхронний частотно-регульований електропривод знаходить широке застосування в різних галузях промисловості, зокрема, і в електричній тязі. зокрема, і в електричній тязі. Асинхронний короткозамкнений двигун позбавлений

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-09 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 4    |

головних недоліків притаманних колекторним машинам – наявності щітково-колекторного механізму, він простий за конструкцією і виготовленням, практично не потребує обслуговування, має приблизно на третину менші масу і габарити. Позитивний досвід впровадження АТД на промислових електровозах у нашій країні та за кордоном дає підставу вважати, що заміна тягових приводів з МПТ на приводи з АТД на рудникових електровозах дасть змогу підвищити експлуатаційні показники таких як: енергоспоживання, надійність, вибухобезпечність, масогабаритні показники та тягові характеристики.

У третьому розділі відзначено, що найкраща якість регулювання безконтактними безконтактними електроприводами забезпечують алгоритми векторного керування, однак такі алгоритми не забезпечують інваріантність до зовнішніх і параметричних збурень. Нині розробляють нові алгоритми керування. Релейна система вибору стандартного вектора напруги статора (DTC) дає змогу регулювати електромагнітний момент двигуна зміною кута  $\alpha$ , має підвищену швидкодію і низькою чутливістю до змін параметрів об'єкта керування. Однак така система не може забезпечити перерозподіл навантаження між тяговими двигунами в разі змін умов роботи рудничних електровозів, які мають випадковий характер.

Отже, система векторного керування асинхронним частотно-регульованим тяговим електроприводом рудничних електровозів інваріантна до зовнішніх збурень і така, що розв'язує задачу розподілу навантаження між тяговими двигунами може бути побудована з використанням апарату нечіткої логіки.

ДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ, ТЯГОВИЙ КОМПЛЕКС, РУДНИЧНИЙ ЕЛЕКТРОВОЗ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-09 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 5    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

## Зміст

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Вступ.....                                                                                                                     | 7  |
| Розділ 1. Особливості експлуатації та вимоги до електроприводу електровозів у шахтних та гірничих умовах .....                 | 8  |
| 1.1. Робота електровозів у шахтних та гірничих умовах .....                                                                    | 8  |
| 1.2. Технічні характеристики електровозів для шахтних та гірничих умов роботи.....                                             | 9  |
| Розділ 2. Вибір типу тягового електроприводу рудничних електровозів.....                                                       | 11 |
| 2.1. Машини постійного струму .....                                                                                            | 11 |
| 2.2. Вентильні машини .....                                                                                                    | 16 |
| 2.3. Вентильно-індукторні машини.....                                                                                          | 19 |
| 2.4. Асинхронні машини з короткозамкненим ротором .....                                                                        | 22 |
| Розділ 3. Система адаптивного керування тяговим електроприводом рудничного електровозу .....                                   | 29 |
| 3.1. Закони керування тяговим електроприводом рудничного електровозу з асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором ..... | 29 |
| 3.2. Класична система векторного керування тяговим асинхронним частотно-регульованим електроприводом .....                     | 32 |
| 3.3. Система прямого керування моментом тягового асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.....                          | 34 |
| 3.4. Адаптивне по рівню потужності керування тяговим електроприводом рудничного електровозу у пуско-гальмівних режимах .....   | 36 |
| Висновки .....                                                                                                                 | 46 |
| Список використаних джерел .....                                                                                               | 48 |

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-09 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 6    |

## Вступ

Асинхронний частотно-регульований електропривод із системою векторного керування, завдяки своїм перевагам перед іншими системами, одержує все більше поширення в різних галузях промисловості, у тому числі й в електричній тязі, однак реалізація системи керування тяговим електроприводом змінного струму зустрічає ряд проблем, а саме:

- відомі моделі роботи тягового електропривода не дають достатньої інформації для побудови й реалізації необхідного алгоритму керування й налаштування регуляторів системи керування;
- великий обсяг обчислень у реальному масштабі часу для відшукування неспостережуваних параметрів керування за допомогою математичної моделі об'єкта керування утрудняє практичну реалізацію мікропроцесорного керування;
- наявність помилки параметрів, що обчислюються, у математичній моделі роботи тягового електропривода, здатної викликати збій роботи системи керування;
- корекція обчислених параметрів асинхронного тягового двигуна додатково вимагає значного обсягу обчислювальних операцій.

Отже, удосконалювання тягових електроприводів змінного струму є актуальним завданням.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-09 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 7    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

# Розділ 1. Особливості експлуатації та вимоги до електроприводу електровозів у шахтних та гірничих умовах

## 1.1. Робота електровозів у шахтних та гірничих умовах

У цей час тягові електроприводи рудничних електровозів - це, як правило, електроприводи постійного струму, які уступають по ряду показників електроприводам змінного струму на основі асинхронних, вентильних і вентильно-індукторних машин.

Умови експлуатації тягових електроприводів мають специфічні особливості, а саме:

- тяговий двигун повинен мати велику перевантажувальну здатність і створювати значну силу тяги під час пуску, а також у шляху при подоланні великих підйомів;
- підведена до тягового електропривода напруга нестабільна й допускає відхилення до 20% від номінального значення.

Позитивною стороною електровозного транспорту є висока швидкість руху на керівному підйомі й здатність подолання підйомів до 40 проміле. Електровози прості в обслуговуванні й надійні при роботі в суворих кліматичних умовах. Недоліком електровозного відкочування контактними електровозами є залежність від джерела енергії й значні первісні витрати на будівництво контактної мережі й тягової підстанції. Наявність контактної мережі на забійних шляхах ускладнює організацію підривних і видобувно-завантажувальних робіт.

|           |                   |          |        |     |                          |  |  |                  |      |        |  |
|-----------|-------------------|----------|--------|-----|--------------------------|--|--|------------------|------|--------|--|
|           |                   |          |        |     | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-09 |  |  |                  |      |        |  |
|           |                   |          |        |     |                          |  |  |                  |      |        |  |
| Зм.       | Лист              | № докум. | Підпис | Дат |                          |  |  |                  |      |        |  |
| Розробив  | СафоненкоДС       |          |        |     | Розділ 1                 |  |  | Літ.             | Лист | Листів |  |
| Перевірів | Барановський В.Д. |          |        |     |                          |  |  |                  |      |        |  |
| Реценз.   |                   |          |        |     |                          |  |  | КНУ<br>ЗЕЕМ-22ск |      |        |  |
| Н. Контр. | Барановський В.Д. |          |        |     |                          |  |  |                  |      |        |  |
| Затвердив | Пересунько І.І.   |          |        |     |                          |  |  |                  |      |        |  |

## 1.2. Технічні характеристики електровозів для шахтних та гірничих умов роботи

Тяговий електропривод рудничних електровозів по конструкції й умовам експлуатації має ряд специфічних особливостей. До них слід віднести:

- одержання живлення від автономного джерела електроенергії, для рудничних акумуляторних електровозів, причому потужність джерела може бути порівнянна з потужністю тягового електропривода;
- можливість одержання живлення від двох джерел електроенергії (основного й резервного), причому ці джерела можуть мати різні параметри вихідної напруги, наприклад, контактні мережі постійної напруги й однофазної змінної напруги;
- значні відхилення амплітуди напруги живлення від номінального значення (до 20% і більш), наприклад, для магістральних електровозів;
- необхідність створення пускового моменту, у кілька разів перевищуючого номінальний, для забезпечення рушання з місця в складних умовах, наприклад, при русі на підйом. Однак при цьому система керування тяговим приводом, повинна виключати можливість виникнення буксування;
- забезпечення двох режимів електричного гальмування (рекуперативного й динамічного), оскільки джерело живлення не завжди допускає рекуперацію енергії, причому можлива одночасна робота в обох гальмових режимах. У той же час при тривалій роботі в режимі електричного гальмування, наприклад, при русі під ухил, система керування повинна виключати можливість виникнення юза;
- при русі состава на підйомі або на ухилі складові ваги електровоза на провідні осі розподіляються нерівномірно й система керування повинна

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-09 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 9    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

забезпечувати розподіл навантаження на тягові двигуни, як і у випадку нерівності діаметрів коліс або зміни коефіцієнта зчеплення.

Установка тягових двигунів електровоза в обмеженому просторі вимагає значного зменшення їх розмірів. У той же час вони повинні бути досить доступними й зручними для огляду, ремонту й обслуговування. Тяговий двигун повинен бути економічним, і мати певні характеристики, що забезпечують максимальне використання його потужності при різних умовах руху з мінімальною витратою енергії.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-09 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 10   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

## Розділ 2. Вибір типу тягового електроприводу рудничних електровозів

### 2.1. Машини постійного струму

Донедавна вважали, що для електричної тяги, зокрема для і рудничних електровозів, з усіх наявних типів електричних двигунів найбільше підходить машина постійного струму (МПС) з послідовним збудженням завдяки своїм перевагам послідовним збудженням завдяки своїм перевагам [3]:

- За однакових умов руху й однакового навантажувального струму двигун послідовного збудження розвиває більший обертальний момент, тому при змінах навантаження він буде викликати менші коливання потужності, споживаної з мережі;
- На роботі двигуна послідовного збудження майже не відображаються коливання напруги в контактній мережі, тому що при цьому змінюється швидкість двигуна, сила тяги залишається практично незмінною;
- Перехідні процеси пуску і гальмування в двигунах послідовного збудження протікають у сприятливіших умовах, що забезпечують підвищену експлуатаційну надійність у важких режимах роботи;
- Навантаження між двигунами послідовного збудження, які працюють паралельно на загальну механічну систему, що складається з колісних пар, пов'язаних між рейками, розподіляється більш рівномірно, і робота двигунів у цих умовах протікає більш стійко.

|           |                   |          |        |     |                          |                  |      |        |
|-----------|-------------------|----------|--------|-----|--------------------------|------------------|------|--------|
|           |                   |          |        |     | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-09 |                  |      |        |
| Зм.       | Лист              | № докум. | Підпис | Дат |                          |                  |      |        |
| Розробив  | Сафоненко ДС      |          |        |     | Розділ 2                 | Літ.             | Лист | Листів |
| Перевірив | Барановський В.Д. |          |        |     |                          |                  | 11   | 18     |
| Реценз.   |                   |          |        |     |                          | КНУ<br>ЗЕЕМ-22ск |      |        |
| Н. Контр. | Барановський В.Д. |          |        |     |                          |                  |      |        |
| Затвердив | Пересунько І.І.   |          |        |     |                          |                  |      |        |

- У разі нерівності діаметрів ведучих коліс двигун осі з меншим діаметром коліс матиме більшу частоту обертання якоря, що при паралельної роботи викличе різні навантажувальні струми двигунів. У цих умовах різниця навантажень двигуна послідовного збудження завдяки більшій крутизні швидкісних характеристик виходить незначною, у той час як у двигунів паралельного збудження вона може становити 30 - 40% і вище.

Зазначені властивості двигунів постійного струму послідовного збудження визначили їх виняткове поширення в збудження визначили їхнє виняткове поширення в електроприводах вітчизняних електровозів.

У роботі [5] показано ефективність застосування на рудничних електровозах тягових двигунів зі змішаним збудженням, які, у порівнянні з вище зазначеними, мають більш жорстку електромеханічну характеристику і мають кращі протибуксувальні властивості.

У таблицях 1 і 2 наведено технічні характеристики машина постійного струму для промислових і рудникових електровозів.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-09 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 12   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

## Технічні характеристики машин постійного струму для електровоза ВЛ85

| Електровоз постійного струму ВЛ85              |                  |       |
|------------------------------------------------|------------------|-------|
| Тип тягового двигуна                           |                  | ДТПП  |
| Потужність вісі (тривала), кВт                 |                  | 780   |
| Вага, кг                                       | перетворювача    | 695   |
|                                                | ФКУ              | 793   |
|                                                | тягового двигуна | 4288  |
|                                                | загальна         | 5776  |
| Об'єм, мЗ                                      | перетворювача    | 1,044 |
|                                                | ФКУ              | 0,508 |
|                                                | загальний        | 1,552 |
| Втрати, кВт                                    | перетворювач     | 6,750 |
|                                                | ФКУ              | 18,5  |
|                                                | тягового двигуна | 52,17 |
|                                                | загальні         | 77,42 |
| Коефіцієнт корисної дії %                      |                  | 90,97 |
| Коефіцієнт потужності, в.о.                    |                  | 0,90  |
| Питомі показники потужності, кВт/кг            |                  | 0,182 |
| Питомий об'єм обладнання, дм <sup>3</sup> /кВт |                  | 1,990 |

До переваг машин постійного струму можна віднести високий к.к.д., низький питомий обсяг обладнання. До недоліків - високі масогабаритні показники двигуна. Колекторні машини відрізняє складність конструкції, високі трудомісткість виготовлення і матеріаломісткість (особливо великі витрати на кольорові метали і дорогі ізоляційні матеріали).

Таблиця 2

Технічні характеристики деяких електровозів з машинами постійного струму

| Тип тягового двигуна            |                        | МПТ<br>130У1 | ДПТР12 | ДК<br>263БУ2 | ДТН<br>45/27Б | ЕДР<br>25П |
|---------------------------------|------------------------|--------------|--------|--------------|---------------|------------|
| Номінальна потужність<br>Р, кВт |                        | 118          | 12     | 80           | 45            | 25         |
| Частота<br>обертання,<br>хв? ?  | $\omega_{\text{ном}}$  | 570          | 615    | 1900         | 1640          | 900        |
|                                 | $\omega_{\text{макс}}$ | 1200         | 1845   |              | 4000          | 1800       |
| ККД, %                          |                        | -            | 82     | 88,5         | 88,5          | 85         |
| Момент<br>двигуна, Нм           | $M_{\text{ном}}$       | 207          | 186    | 402          | 262           | 265        |
| Маса т, кг                      |                        | 2300         | 370    | 470          | 580           | 460        |
| Питомі<br>показники             | М/т, Нм/кг             | 0,09         | 0,5    | 0,85         | 0,45          | 0,58       |
|                                 | Р/т, кВт/кг            | 0,051        | 0,13   | 0,17         | 0,078         | 0,054      |

Процес виготовлення таких машин містить у собі велику кількість технологічних операцій і вимагає різноманітного спеціалізованого обладнання. Продукти зносу щіток колекторної машини, що неминуче з'являються під час її роботи, осідають усередині машини і знижують опір ізоляції обмоток. Цим обумовлено часте профілактичне обслуговування двигунів. Ремонт колекторних машин ускладнений і майже завжди пов'язаний з повною заміною обмотки якоря і заміною або відновленням колектора. Якість відновленої машини часто знижена, а ресурс зменшено. Наявність щітково-колекторного механізму знижує експлуатаційну надійність двигуна, а іскріння між щітками і колектором накладає обмеження до застосування колекторних двигунів у рудниках і шахтах небезпечних за газом і пилом. Тому рудничні електровози вибухобезпечного виконання (РВ) хоч і відрізняються від електровозів рудникового нормального виконання (РН) і рудникових

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-09 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 14   |

електровозів підвищеної надійності проти вибуху (РП), підвищеної вибухобезпекою, вважатися вибухобезпечними можуть умовно.

Практика показує, що приводи рудничних електровозів мають низьку надійність через часті виходи з ладу тягових двигунів. На підставі тривалих хронометражних спостережень встановлено, що умовах рудників максимальний термін служби тягових двигунів типу ДТН 33/20 не перевищує 11-12 місяців [9]. В умовах підземних гірничих підприємств МЦМ Росії - Тирниаузький вольфрам-молібденовий, Алмаликський гірничо-металургійний, Ловозерський гірничо-збагачувальний комбінати було проведено експериментальні дослідження надійності роботи тягових двигунів. Встановлено, що середній термін служби тягових двигунів ДТН 33/20 і ДТН 45/27 становить 2 місяці. Експериментальними дослідженнями, проведеними в умовах шахт "Ленінградсланець", встановлено, що основною причиною виходу тягових двигунів з ладу є пробій обмоток, розпаювання бандажів. Це свідчить про підвищений нагрів тягових двигунів, що відбувається за досить короткий період часу. Величина середніх пускових струмів залежить від зміни завантаження (розвантаження) складу і перевершує годинне значення в 1.4-1.7 разів, що є неприпустимим (відповідно до ТУ з тягових двигунів допустиме перевищення струмів від годинного значення становить 1.5). на рудничному електровозі двигунів більшої потужності, а, отже, великих габаритів і маси в умовах обмеженого простору скрутна.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-09 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 15   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

## 2.2. Вентильні машини

Природною альтернативою колекторним приводам постійного струму є приводи з вентильними (електронно-комутованими) двигунами. є приводи з вентильними (електронно-комутованими) двигунами (ВД) зі збудженням від постійних магнітів або з електромагнітним збудженням для великих потужностей.

У нашій країні перші позитивні результати застосування ВД були отримані в 1970 - 1971 роках на вітчизняному електровозі ВЛ80.

У таблиці 3 наведено технічні характеристики вентильних тягових двигунів (ВТД), що застосовуються на вітчизняних промислових електровозах ВЛ87.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-09 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 16   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

## Технічні характеристик вентильних двигунів в електровозах ВЛ87

| Електровоз змінного струму ВЛ87                |                |        |
|------------------------------------------------|----------------|--------|
| Тип тягового двигуна                           |                | ВТД    |
| Потужність вісі (тривала), кВт                 |                | 940    |
| Маса, кг                                       | Перетворювач   | 885    |
|                                                | ФКУ            | 737    |
|                                                | Тяговий двигун | 3800   |
|                                                | Загальна       | 5422   |
| Об'єм, мЗ                                      | Перетворювач   | 1,01   |
|                                                | ФКУ            | 0,903  |
|                                                | Загальний      | 1,913  |
| Втрати, кВт                                    | Перетворювач   | 15,540 |
|                                                | ФКУ            | 27,1   |
|                                                | Тяговий двигун | 65,35  |
|                                                | Загальні       | 107,99 |
| Коефіцієнт корисної дії %                      |                | 89,7   |
| Коефіцієнт потужності , в.о.                   |                | 0,90   |
| Питомі показники потужності, кВт/кг            |                | 0,247  |
| Питомий об'єм обладнання, дм <sup>3</sup> /кВт |                | 2,035  |

Серійне виробництво електровоза ЕП200, розробленого на базі вентиального тягового двигуна (ВТД), мало розпочатися за планом у 1998 р. вентиального тягового двигуна (ВТД), мало розпочатися за планом у 1998 р, Однак, він досі непрацездатний. У звіті випробувань зазначено, що в ході них із восьми тягових двигунів були задіяні тільки чотири – через причини непрацездатності низки важливих вузлів [11]. Відзначено обмежені можливості вакуумного вимикача, струмоприймача. Виявлено сповзання шестерень із валів тягових двигунів по невстановлених причин, пробої

обмотки збудження, наявність перешкод на пристроях СЦБ, прорахунки у виборі згладжувальних реакторів і компенсаторів реактивної потужності. У режимі розгону інвертор зажадав використання примусової конденсаторної комутації тиристорів.

Продуктивність електровозів значною мірою визначається силою тяги. У годинному режимі для локомотива ЕП200 вона становить 24 тонни при восьми осях. Щоб запустити ЕП200 у серійне виробництво, необхідно усунути грубі прорахунки в проектуванні, заново провести випробування, два-три роки обкатати в експлуатації і тільки тоді пропонувати в серію. Питання про масове їх виробництво не стоїть, оскільки ВНДІЗТ вважає, що локомотиви ЕП200 зараз не потрібні.

Електровоз ЕП201 відрізняється від ЕП200 збільшеною силою тяги. Стоїть питання про серійне виробництво нової машини, однак воно може затягнутися на десяток років.

Приводи з ВД мають високі питомі показники потужності, малу масу і габарити, малі значення питомого об'єму обладнання. Недоліком ВД є чутливість постійних магнітів до температурних змін і механічних впливів, які призводять до зміни магнітних характеристик ротора. Необхідно здійснювати контроль і діагностику стану тягового електроприводу для коригування налаштувань системи управління. Виготовлення ВД відрізняється високою вартістю електромеханічної частини, що складається з вартості самих постійних магнітів із рідкоземельних матеріалів і вартості виготовлення складного за конструкцією ротора з постійними магнітами і магнітами або електромагнітним збудженням.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-09 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 18   |

### 2.3. Вентильно-індукторні машини

Приводом ХХІ століття за прогнозами багатьох фахівців стане привід на основі вентильно-індукторних двигунів (ВІД) [7, 1, 11]. Відмінними особливості ВІД від розглянутих вище типів двигунів є відносна простота конструкцій магнітної системи та обмоток, відсутність обмоток на зубчастому роторі з шихтованої електротехнічної сталі та живлення обмоток статора (полюсних котушок) однополярними імпульсами струму за сигналами датчика положення ротора. Двигун конструктивно простіший і технологічніший, має менші витрати міді та ізоляційних матеріалів, але більші витрати електротехнічної сталі. Відсутність природної механічної характеристики ВІД і можливість його роботи в області сімейства характеристик, обмежених граничною характеристикою, робить його привабливим для тягових приводів, тому що дає змогу забезпечити необхідні тягові властивості в усьому діапазоні зміни частоти обертання колісних пар електровоза.

Однак простота конструкції електромашинного перетворювача (ЕМП) і схем керування ВІД жодною мірою не спрощують розроблення електроприводу на їхній основі. Особливості електромеханічного перетворення енергії у ВІД полягають у несинусоїдальності струмів і магнітних потоків в ЕМП і нелінійній залежності між ними. Алгоритм управління силовою електронною частиною, необхідний для отримання високих технічних параметрів ВІД, досить складний і може бути реалізований тільки при використанні останніх досягнень мікропроцесорної техніки [5].

У нашій країні дослідження щодо застосування вентильно-індукторного тягового двигуна (ВІТД) на електрорухомому складі (ЕРЗ) ведуться ВЕЛНДІ спільно з ЮРГТУ (НПІ, м. Новочеркаськ). Результати

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-09 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 19   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

виконаних розрахунково-конструкторських опрацювань окремого обладнання і загалом тягового електроприводу з ВРІД потужністю 1000 кВт представлені в таб. 4.

Таблиця 4

Технічні характеристик вентильних двигунів в електровозах (ПРОЄКТ)

| Електровоз змінного струму (Проект) |                        |        |
|-------------------------------------|------------------------|--------|
| Тип тягового двигуна                |                        | ВІТД   |
| Потужність осьова (тривала), кВт    |                        | 1000   |
| Маса, кг                            | Перетворювача          | 1010   |
|                                     | Фільтрового обладнання | 1213   |
|                                     | Тягового двигуна       | 4800   |
|                                     | Загальна               | 7023   |
| Об'єм, м³                           | Перетворювача          | 2,029  |
|                                     | Фільтрового обладнання | 1,22   |
|                                     | Загальний              | 3,151  |
| Втрати, кВт                         | Перетворювача          | 32,736 |
|                                     | Фільтрового обладнання | 11,5   |
|                                     | Тягового двигуна       | 49,32  |
|                                     | Загальні               | 93,556 |
| Коефіцієнт корисної дії, %          |                        | 91,44  |
| Коефіцієнт потужності, безрозмірний |                        | 0,98   |
| Питомі показники потужності, кВт/кг |                        | 0,208  |
| Питомий об'єм обладнання, дм³/кВт   |                        | 3,151  |

Данні ККД електровоза на базі ВІТД приведені без урахування втрат в тяговому трансформаторі, параметри системи охолодження не враховувалися. Розрахункові питомі маси й обсяги обладнання електровозів з ВІТД, ВЛ85, ВЛ87 порівнянні, к.к.д. електроприводу з ВІТД вищий за інші.

Порівняння тягових характеристик показало, що для електровоза з ВІТД зона використання тягової області в межах обмежень за зчепленням і конструкційної швидкості істотно ширша, ніж у електровоза ВЛ85 з ДПТ.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-09 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 21   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

## 2.4. Асинхронні машини з короткозамкненим ротором

У нашій країні перші позитивні результати застосування асинхронних двигунів (АД) на електровозах ВЛВО було отримано в 1970-1971 роках (Тихменьов Б.М., Горін М.М., Кучумов В.А., Покровський СВ, Кондратов В.Д.), випробуваннями локомотива ВЛ80 керував Курбасов А.С. Ним були відзначені хороші тягові якості ВЛ80 прийнятна енергетика. Але через низьку надійність перетворювальних пристроїв того часу електровоз для експлуатаційної роботи не годився. На початку дев'яностих років з'являються замикаємі тиристори високих параметрів, які не потребують вузлів примусової комутації. Це дало змогу скоротити кількість приладів у перетворювачі, і асинхронний привід уже розглядається як єдино перспективний.

У Європі в 70-ті роки швейцарська фірма "BBC" приступила до стендових випробувань асинхронного тягового приводу, який потім було встановлено на макетному тепловозі. На початку 80-х з'являється магістральний локомотив потужністю 5600 кВт при чотирьох осях, що перевищує потужність наших серійних восьмивісних електровозів. Машини відразу ж запускаються в експлуатацію з добовим пробігом до 1000 кілометрів.

У листопаді 1998 р. на НЕВЗі (Новочеркаський електровозобудівний завод) відбулася презентація дослідного зразка нового пасажирського електровоза ЕП10 на два роди струму (3 кВ постійного і 25 кВ, 50 Гц змінного) з асинхронним електроприводом і мікропроцесорною системою управління, розробленого ВЕлНДІ та виготовленого НЕВЗом у співпраці з компанією *Adtranz*. Живлення двигунів здійснюється від статичних перетворювачів частоти і числа фаз із широтно-імпульсною модуляцією напруги, виконаних фірмою *Adtranz* на GTO-модулях.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-09 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 22   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

Дослідний електровоз ЕП10 до кінця 1999 р. пройшов усі необхідні випробування. Почався випуск партії цих локомотивів у розмірі 20 одиниць.

Департаментом локомотивного господарства МПС Росії головним напрямком удосконалення електровозів прийнято виробництво електровозів з асинхронними тяговими двигунами. Контрактом з компанією Adtranz передбачено створення в Росії спільних підприємств, на яких буде організовано випуск електрообладнання для асинхронного тягового електроприводу.

У 1999 р. за розробками ВЕЛНРШ, МРШТа і НРШЕП (м. Новосибірськ) було виготовлено на НЕВЗі вітчизняний електропоїзд ЕНЗ змінного струму з асинхронним частотно-регульованим тяговим електроприводом з інвертором струму, але на базі вітчизняних силових електронних перетворювачів і систем управління.

У табл. 5 подано характеристики тягових електроприводів з АД вітчизняних електровозів ВЛ86Ф [5].

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-09 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 23   |

Технічні характеристик асинхронних двигунів в електровозах змінного струму ВЛ86Ф

| Електровоз змінного струму ВЛ86Ф               |                        |        |
|------------------------------------------------|------------------------|--------|
| Тип тягового двигуна                           |                        | АТД    |
| Потужність осьова (тривала), кВт               |                        | 900    |
| Маса, кг                                       | Перетворювача          | 962    |
|                                                | Фільтрового обладнання | 1213   |
|                                                | Тягового двигуна       | 4060   |
|                                                | Загальна               | 6235   |
| Об'єм, м <sup>3</sup>                          | Перетворювача          | 1,598  |
|                                                | Фільтрового обладнання | 1,122  |
|                                                | Загальний              | 2,72   |
| Втрати, кВт                                    | Перетворювача          | 45,5   |
|                                                | Фільтрового обладнання | 11,5   |
|                                                | Тягового двигуна       | 58,47  |
|                                                | Загальні               | 115,47 |
| Коефіцієнт корисної дії, %                     |                        | 88,63  |
| Коефіцієнт потужності, безрозмірний            |                        | 0,98   |
| Питомі показники потужності, кВт/кг            |                        | 0,222  |
| Питомий об'єм обладнання, дм <sup>3</sup> /кВт |                        | 3,022  |

Питомий обсяг обладнання для тягового приводу з АТД трохи нижчий, а питома потужність дещо вища, ніж у приводу з ВІТД. Різниця к.к.д. становить майже три відсотки на користь ВІТД. У роботі [11]

викладено основні характеристики сучасного асинхронного тягового двигуна ТАД- 2У1 потужністю 55 кВт для низькопідлогового трамвая (табл. 6), коефіцієнт корисної дії якого вищий, ніж у ВІТД.

Таблиця 6

Основні характеристики сучасного асинхронного двигуна ТАД-2У1

|                                                               |             |      |
|---------------------------------------------------------------|-------------|------|
| Потужність (на валу), кВт                                     |             | 55   |
| Номинальна лінійна напруга, В                                 |             | 461  |
| Частота мережі, Гц                                            |             | 50   |
| Синхронна частота обертання, об/хв                            | Номинальна  | 1500 |
|                                                               | Максимальна | 4000 |
| Прокльзання, %                                                |             | 1,7  |
| Кратність максимального моменту, у.о.                         |             | 3,6  |
| Коефіцієнт потужності при номінальному навантаженні, не менше |             | 0,85 |
| ККД, %                                                        |             | 93   |
| Максимальний момент двигуна, Н·м                              |             | 800  |

Виконання двигуна - пилоблизко-захищене. Двигун ТАД-2У1 успішно витримав випробування з шести циклів у вологокамері за тривалості одного циклу - 24 години. Після закінчення випробувань опір ізоляції обмотки статора становив 3.0 МОм, при нормі 0.5 Мом, що робить привабливим застосування цих двигунів для тягових електроприводів рудничних електровозів.

Розроблена схема вентиляції дала змогу поліпшити інтенсивність охолодження охолодження і збільшити потужність двигуна до 70 кВт, при цьому перегрів окремих частин двигуна не перевищували допустимих значень.

Нині розроблено асинхронний двигун ТАД-2М, приєднувальні розміри якого відповідають приєднувальним розмірам тягового двигуна постійного струму. Головний двигун виготовлено і проходить випробування. Двигун планується використовувати для заміни двигунів постійного струму на наявному парку вагонів, а також на нових типах трамваїв.

У двигун вбудовані датчик швидкості обертання типу ДВ-Ф20-35-ЗР-15 і датчик температури. Це дасть змогу суттєво знизити кількість обчислювальних операцій системи керування тяговим електроприводом.

Наразі службою рухомого складу спільно з АТ "Вагонмаш" і фірмою "ЕПРО" ведеться робота зі створення акумуляторного електровоза з асинхронним тяговим приводом. З огляду на специфіку роботи електровоза з частими пусками і гальмуваннями, є можливість перевірки роботи режиму рекуперації енергії гальмування на тягову батарею і контактну мережу, з'являється можливість для відпрацювання питань оптимального вибору схеми, яка надалі буде прототипом тягового приводу серійного тягового приводу серійного електровоза. Крім того, створюваний електровоз не потребуватиме створення стаціонарної зарядної станції в депо, оскільки зарядна станція розміститься на самому електровозі й дасть змогу забезпечити його автономність роботи на віддалених об'єктах і об'єктах, що знову будуються.

Перевагами АТД є низькі масогабаритні показники, простота конструкції та виготовлення, відносна дешевизна. Відсутність колекторно-щіткового механізму в АД робить тягові електроприводи більш надійнішими, такими, що не потребують частого обслуговування, і, що немало важливо для рудничних електровозів, вибухобезпечними. До недоліку приводу такого рівня можна віднести його високу початкову вартість, однак, з огляду на економію на обслуговування приводу, його енергетичну економічність із можливістю рекуперації електроенергії назад у контактну мережу, або в

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-09 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 26   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

аккумуляторну батарею, надійність і високий ресурс роботи сучасної напівпровідникової техніки напівпровідникової техніки, можна припускати його швидку окупність. До непрямих витрат при застосуванні асинхронного тягового приводу слід віднести витрати на реорганізацію всієї системи обслуговування і ремонту, з вирішенням питань придбання необхідного діагностичного обладнання, підвищення рівня освіти обслуговуючого персоналу, розв'язання питань приймання - передавання рекуперованої енергії.

Висновок до розділу

Порівняльний аналіз типів тягових двигунів показав, що:

1. К.К.Д. АТД, ВТД, ВІТД і МПТ можна порівняти.
2. Найкращий показник питомої потужності у ВД, далі йдуть АД, ВІД і МПТ відповідно.
3. За питомим моментом на першому місці АД, далі ВД, ВІД і МПТ відповідно.
4. За питомим обсягом перетворювальних пристроїв і фільтрового найкращі показники у МПТ, потім ідуть ВД, АД і ВРІД відповідно [5].
5. За питомою масою двигуна найкращі показники у ВД, ВІД, АД, і МПТ відповідно.

Позитивний досвід впровадження АТД на вітчизняних електровозах ЕП10, ЕНЗ і Сокіл, а також аналіз продукції провідних світових виробників систем тягового приводу і матеріалів опублікованих наукових досліджень наукових досліджень у цій галузі [11] дає підставу під час вибору тягового електроприводу для рудничних електровозів, віддати перевагу безконтактним електроприводам на базі АТД, що дасть змогу підвищити їх експлуатаційні показники. До таких показників можна віднести: первісну

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-09 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 27   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

вартість, споживання електроенергії, надійність електромеханічної частини, витрати на ремонт і технічне обслуговування електроприводів на ремонт і технічне обслуговування електроприводів, масо-габаритні показники, масо-габаритні характеристики. показники та рівень вибухобезпеки.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-09 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 28   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

## Розділ 3. Система адаптивного керування тяговим електроприводом рудничного електровозу

### 3.1. Закони керування тяговим електроприводом рудничного електровозу з асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором

Узагальнення закону М.П. Костенка для будь-якої частоти ковзання дає змогу сформулювати для асинхронного тягового двигуна усі можливі окремі випадки його роботи:  $M\omega = const$ ,  $U = const$  - електровозна характеристика;  $M\omega = const$ ,  $U = va$  - тепловозна характеристика. тепловозна характеристика,  $M\omega^2 = const$ ,  $U = const$  - "серієсна" характеристика, тощо [3].

Під час реалізації частотних законів керування необхідно підтримувати поле ротора постійним, це знижує ймовірність насичення магнітної системи і визначає лінійність механічних характеристик асинхронного тягового двигуна з короткозамкненим ротором, а також покращує динамічні параметри електроприводу (ЕП) [5].

На рис. 1. показано залежність моменту асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором від абсолютного ковзання  $\beta$  для різних законів керування потокозчепленням двигуна.

|           |                   |          |        |     |                          |                  |      |        |
|-----------|-------------------|----------|--------|-----|--------------------------|------------------|------|--------|
|           |                   |          |        |     | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-09 |                  |      |        |
| Зм.       | Лист              | № докум. | Підпис | Дат |                          |                  |      |        |
| Розробив  | Сафоненко ДС      |          |        |     | Розділ 3                 | Літ.             | Лист | Листів |
| Перевірів | Барановський В.Д. |          |        |     |                          |                  | 29   | 17     |
| Реценз.   |                   |          |        |     |                          | КНУ<br>ЗЕЕМ-22ск |      |        |
| Н. Контр. | Барановський В.Д. |          |        |     |                          |                  |      |        |
| Затвердив | Пересунько І.І.   |          |        |     |                          |                  |      |        |

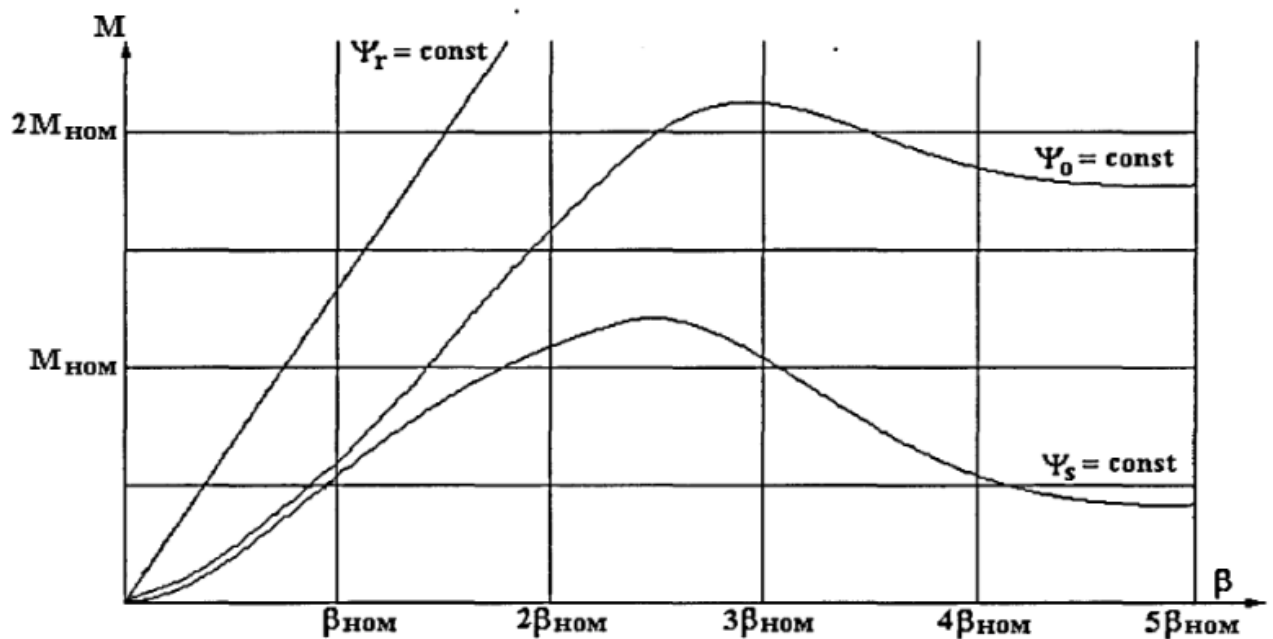


Рис 1 – Механічні характеристики асинхронного двигуна за різних законів частотного керування

У режимі  $\Psi_r = const$  електромагнітний момент, що розвивається, не має максимуму і зростає необмежено зі зростанням  $\beta$ . Однак, за більших величин ковзання підтримання незмінним  $\Psi_r$  неможливе через зростання потокозчеплення в повітряному зазорі і неминучого насичення мащини. При зміні ковзання в межах  $3\beta_{ном}$  ом збільшення  $\Psi_0$  незначне і реалізація  $\Psi_r = const$  цілком здійснена. Функціональна схема векторного способу керування за абсолютним ковзанням представлена на рис. 2.

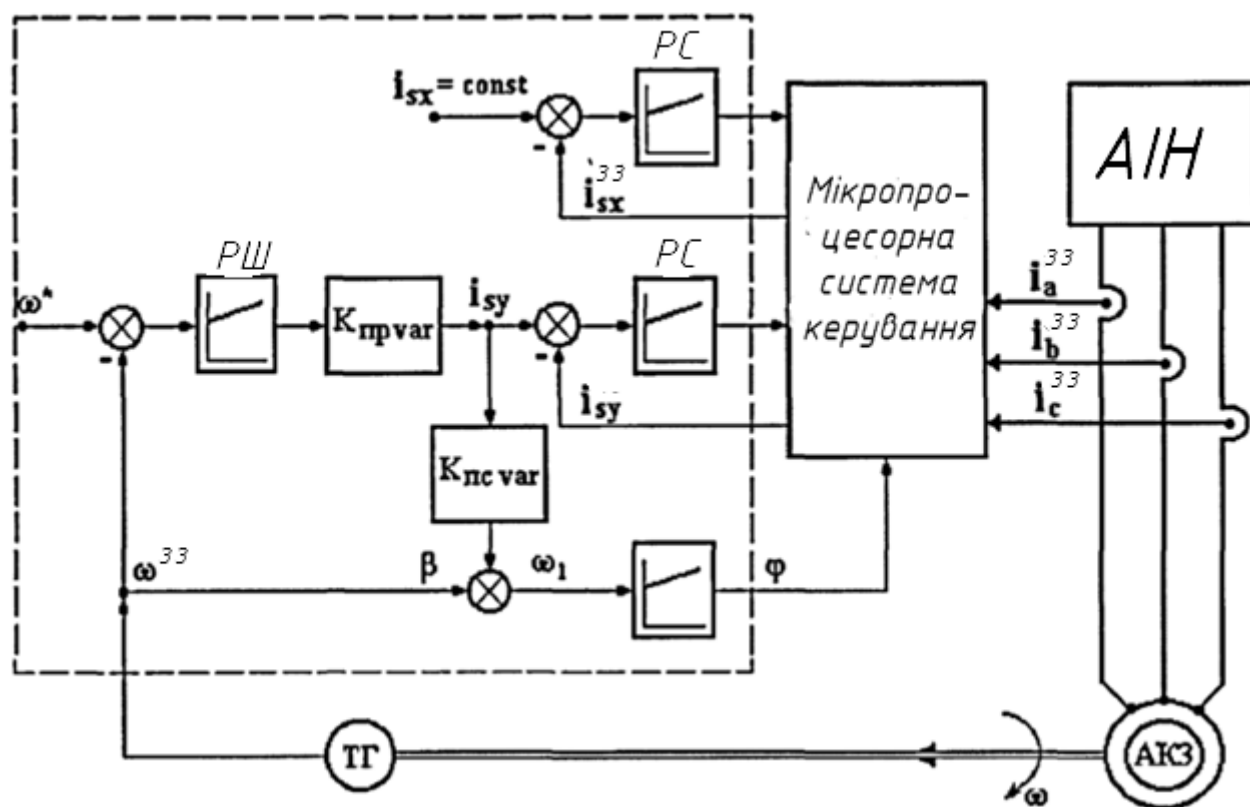


Рис 2 – Функціональна схема векторного способу керування за абсолютним ковзанню  $\beta$

Регулювання струму здійснюється за двома каналами, які відповідають проекціям вектора на осі обертової системи координат, суміщеної з вектором потокозчеплення  $\Psi_r$ . При цьому проекція на дійсну вісь  $i_{sx}$  може підтримуватися постійною або регулюватися залежно від швидкості обертання для організації двох залежностей від швидкості обертання для організації двозонного регулювання асинхронного двигуна. Проекція на уявну вісь  $i_{sy}$  змінюється пропорційно абсолютному ковзанню  $i_{sy}$ . У цьому випадку відсутній електромагнітний перехідний процес за потокозчепленням ротора, який спричиняє низькочастотні коливання в замкнутому за швидкістю електроприводі.

Таким чином, вибір закону керування електроприводом змінного струму з підтриманням  $\Psi_r = const$  можна вважати найбільш прийнятним, що використано в найбільш поширених системах «Transvektor» [4]

### 3.2. Класична система векторного керування тяговим асинхронним частотно-регульованим електроприводом

Асинхронний електропривод із частотним керуванням і системою векторного регулювання, завдяки своїм загальновідомим перевагам перед іншими системами перед іншими системами, набуває дедалі більшого поширення в різних галузях промисловості, зокрема й у транспорті. З одного боку все зростаючий інтерес до таких електроприводів зумовлений появою на ринку силових перетворювачів частоти, побудованих на *IGBT*-транзисторних модулях, *IGCT*-тиристорних модулях із повністю керованими тиристорами *GTO* і т.п., що перекривають дуже широкий ряд потужностей (до 30 мВт) [8]. З іншого боку, мікропроцесорна техніка, що бурхливо розвивається мікропроцесорна техніка дає змогу реалізувати найскладніші та найефективніші ефективні алгоритми керування електромеханічними системами, що забезпечують необхідні динамічні та енергетичні характеристики електроприводів, а отже електроприводів, а отже, що підвищують продуктивність механізмів і вирішальні проблему енергозбереження шляхом раціонального енергоспоживання.

Нині розроблено велику кількість алгоритмів векторного керування частотними електроприводами. векторного керування частотними електроприводами. Усі вони так чи інакше базуються на обчисленні миттєвих значень амплітуди та фази результуючого вектора потокозчеплення ротора з подальшим переведенням математичної моделі електроприводу в обертову ортогональну систему координат, що обертається систему координат, одна вісь якої орієнтована за напрямком результуючого вектора потокозчеплення ротора.

Порівняльний аналіз ефективних алгоритмів керування безконтактними електроприводами змінного струму безконтактними

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-09 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 32   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

електроприводами змінного струму показав, що класичний варіант системи векторного керування з двоканальною системою підпорядкованого регулювання [10] у багатьох випадках дає змогу отримати цілком прийнятний результат, У тих випадках, коли класичний алгоритм управління за тими чи іншими показниками не задовольняє вимогам до системи, наприклад, не забезпечує інваріантність до зовнішніх і параметричних збурень, використовують інші алгоритми.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-09 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 33   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

### 3.3. Система прямого керування моментом тягового асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

Одним із новітніх алгоритмів є система автоматичного регулювання електроприводом змінного струму з розривним керуванням у ковзному режимі [5]. У світовій практиці такі системи отримали назву «системи з прямим керуванням моментом» (DTC). Управління електромагнітним моментом двигуна здійснюється в основному шляхом зміни кута  $\gamma$  (кут між потокозчепленням статора  $\Psi_s$  і потокозчепленням ротора  $\Psi_r$ ). Зміна кута  $\gamma$  досягається за рахунок вибору вектора напруги, що викликає таку зміну положення  $\Psi_s$  щодо  $\Psi_r$ , яка забезпечує необхідний знак приросту електромагнітного моменту і одночасно - необхідний знак приросту модуля потокозчеплення. Для всіх можливих комбінацій необхідних знаків зміни модуля потокозчеплення і моменту існує певний набір векторів напруги. У результаті обертання вектора потокозчеплення статора забезпечується з необхідною частотою при підтримці модуля вектора потокозчеплення на заданому рівні.

У таблиці 7 представлено порівняльні характеристики електроприводів із різними системами керування [3]. З таблиці видно, що принцип "прямого керування моментом" забезпечує високу якість керування навіть без використання датчика швидкості і може бути використаний для побудови САУ тяговими електроприводами змінного струму рудничних електровозів. Однак слід зазначити, що DTC-управління можливе тільки при використанні мікропроцесорної техніки. Система прямого цифрового керування орієнтована на відмову від значної кількості додаткових інтерфейсних плат і створення одноплатних контролерів управління приводом. У межі вбудована система проєктується як однокристальна і разом із силовим перетворювачем і виконавчим двигуном конструктивно інтегрується в одне ціле - мехатронний модуль руху.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-09 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 34   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

Таблиця 7

Порівняльні характеристики електроприводів з різними системами управління

| Методи систем автоматичного управління | Управління $U/f = \text{const}$ (без датчика швидкості) | Система векторного управління (з датчиком швидкості) | Цифрова система управління електроприводом постійного струму (з датчиком швидкості) | Система прямого управління моментом |                             |
|----------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| Характеристики                         |                                                         |                                                      |                                                                                     | DTC (з датчиком швидкості)          | DTC (без датчика швидкості) |
| Регулювання моменту:                   |                                                         |                                                      |                                                                                     |                                     |                             |
| Лінійність, %                          | ±12                                                     | ±4                                                   | ±3                                                                                  | ±3                                  | ±4                          |
| Повторюваність, %                      | ±4                                                      | ±1                                                   | —                                                                                   | ±1                                  | ±1                          |
| Час реакції, мс                        | 150                                                     | 10–20                                                | 10–20                                                                               | 1–2                                 | 1–2                         |
| Регулювання швидкості:                 |                                                         |                                                      |                                                                                     |                                     |                             |
| Статична точність, %                   | ±(1–3)                                                  | ±0,01                                                | ±0,01                                                                               | ±0,01                               | ±(0,1–0,5)                  |
| Динамічна точність, %                  | 3                                                       | 0,3                                                  | 0,3                                                                                 | 0,1                                 | 0,4                         |

Більшість нових алгоритмів керування асинхронним електроприводом змінного струму, зокрема й DTC, являє собою подальший розвиток і вдосконалення класичного алгоритму керування, що реалізується на основі загальної теорії автоматичного управління. Однак алгоритм регулювання тяговими електроприводами може бути побудований нетрадиційними способами. Одним із таких рішень є алгоритм керування електроприводом змінного струму із застосуванням методів нечіткої логіки з реалізацією адаптивного по рівню потужності керуванням тяговим електроприводом рудничного електровозу.

### 3.4. Адаптивне по рівню потужності керування тяговим електроприводом рудничного електровозу у пуско-гальмівних режимах

Першою публікацією з теорії нечітких множин заведено вважати роботу професора з Університету Берклі (шт. Каліфорнія, США) Лотфі Заде, яка відноситься до 1965 р. Поняття нечіткої множини в сенсі Л. Заде поклало початок новому імпульсу в галузі математичних і прикладних досліджень, у рамках яких за короткий термін було запропоновано нечіткі узагальнення всіх основних теоретико-множинних і формально-логічних понять.

Найбільш значущими з робіт у цій галузі слід відзначити публікації Л. Заде, Д. Дюбуа (D. Dubois) і А. Прада (H. Prade) з теорії нечіткої міри і міри можливості, М. Сугено (M. Sugeno) з нечіткого виведення і нечіткого інтеграла, Дж. Беждека (J. Bezdek) з нечіткої кластеризації та розпізнавання образів, Р. Ягера (R. Yager) з нечіткої логіки[4, 1, 8, 11].

Перші промислові застосування нечітких методів були зроблені в Європі. На початку 1990-х рр. з'явилося понад 200 видів промислових виробів і пристроїв, у яких було реалізовано нечіткі моделі. Це були, головним чином побутові прилади, які характеризувалися більш ефективною економією електроенергії та водоспоживання без додаткового збільшення ціни виробу. Інші промислові додатки стосувалися автоматизації виробництва, включно з управлінням хімічними та біологічними процесами, управління верстатами і складальними конвеєрами, а також різні інтелектуальні датчики.

На перше місце у світі за кількістю пристроїв і механізмів, у яких реалізовано нечіткі технології, вийшла Японія. яких реалізовано нечіткі технології вийшла Японія. Поява мікропроцесорів і мікроконтролерів ініціювала різке збільшення побутових приладів і промислових установок з алгоритмами управління на основі нечіткої логіки, Нині в Японії

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-09 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 36   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

запатентовано більш ніж 3000 відповідних пристроїв у цій галузі. Слово "фаззі" (fuzzy) стало символом популярності та комерційного успіху нових промислових виробів у цій країні [9].

Оскільки ці додатки супроводжував комерційний успіх, нині нечітка логіка розглядається як стандартний метод цей час нечітка логіка розглядається як стандартний метод проектування і отримала широке визнання серед інженерів і проектувальників. До нечітких технологій виявляють дедалі більший інтерес компанії зі США, особливо ті з них, хто відчуває жорстку конкуренцію з боку фірм з Азії та Європи.

Адаптивне по рівню потужності керування тяговим електроприводом рудничного електровозу особливо важливе у пуско-гальмівних режимах. При цьому слід реалізувати інваріантну до зовнішніх збурень задачу розподілу навантаження між тяговими двигунами.

Нечітка логіка виявилася чудовим інструментом для розроблення систем адаптивного по рівню потужності керування тяговим електроприводом рудничного електровозу у пуско-гальмівних режимах, відомі додатки з галузі теле- і радіозв'язку. Запропоновано та реалізовано програмні алгоритми для мережевої маршрутизації та розпізнавання мови на основі нечіткої логіки. Національне управління з аеронавтики і космонавтики (НАСА) передбачає використовувати нечіткі моделі для вирішення спеціальних завдань у космосі. Міністерство оборони США виділяє значні асигнування на дослідження в галузі побудови систем управління озброєнням і тренажерів для навчання пілотів винищувачів на основі нечітких технологій. Наразі в США розгорнуто серйозні дослідження з нейро-мережових технологій. Усі експерти погоджуються з тим, що комбінація нейронних мереж і нечіткої логіки буде наступним серйозним кроком у подальшому прогресі високих технологій.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-09 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 37   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

Таким чином, можна зробити висновок, що сфера застосувань теорії нечітких множин і нечіткої логіки з кожним роком продовжує неухильно розширюватися. Система керування тяговими електроприводами рудничних електровозів, побудована з використанням теорії нечітких множин і нечіткої логіки може розсунути цю область.

Розроблення та застосування систем нечіткого виведення для управління технічними пристроями і процесами містить у собі низку етапів (рис 3). Основними етапами нечіткого виведення є:

- формування бази нечітких правил систем нечіткого виведення;
- фазифікація входних змінних;
- агрегування підумов у нечітких правилах продукцій;
- активізація підвисновків у нечітких правилах продукцій;
- акумулювання висновків нечітких правил продукцій.

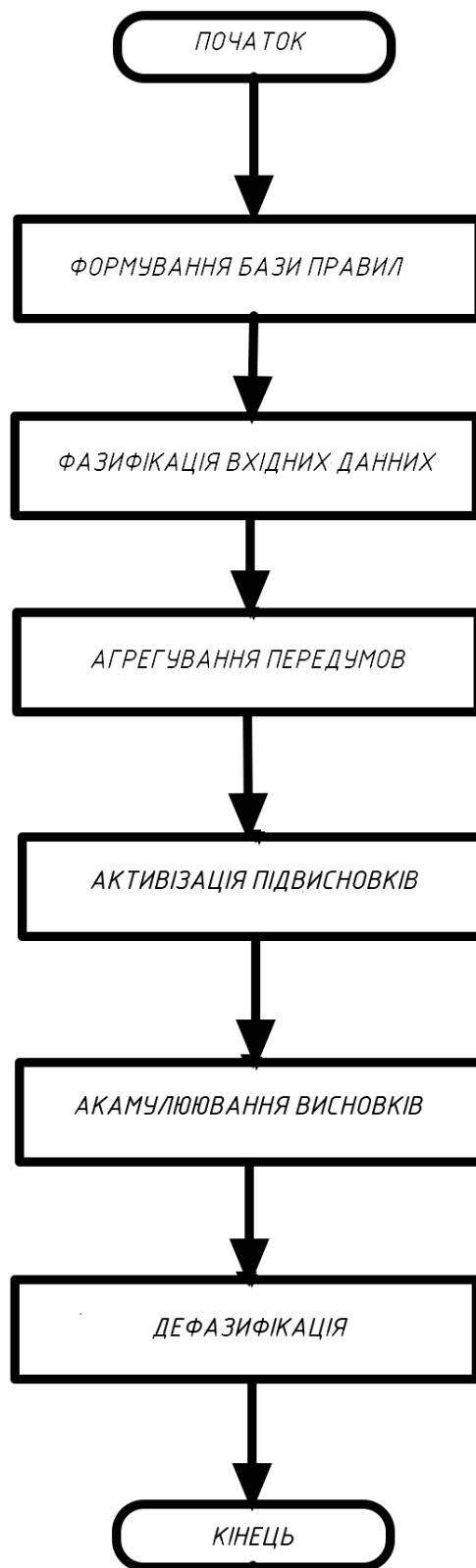


Рис 3 – Структура процесу нечіткого виводу

Інформацією, яка надходить на вхід системи нечіткого виведення, є виміряні деяким чином змінні. Ці змінні відповідають реальним змінним процесу управління.

Інформація, яка формується на виході системи нечіткого виведення, відповідає вихідним змінним, якими є керівні змінні процесу управління. Системи нечіткого виведення перетворюють значення вхідних змінних процесу управління у вихідні змінні на основі використання нечітких правил продукцій. Для цього системи нечіткого виведення мають містити базу правил нечітких продукцій і реалізовувати нечіткий висновок висновків на основі посилок або умов, представлених у формі нечітких лінгвістичних висловлювань.

База правил нечітких продукцій являє собою кінцеву множину правил нечітких продукцій, узгоджених щодо використовуваних у них лінгвістичних змінних. У загальному вигляді така база може бути представлена у формі структурованого тексту:

ПРАВИЛО\_1: ЯКЩО "Умова\_1" ТО "Висновок\_1"

ПРАВИЛО\_2: ЯКЩО "Умова\_2" ТО "Висновок\_2"

ПРАВИЛО\_n: ЯКЩО "Умова\_n" ТО "Висновок\_n"

База правил нечітких продукцій вважається заданою, коли задано: множина правил нечітких продукцій, множина вхідних лінгвістичних змінних і множина вихідних лінгвістичних змінних.

Як умови і висновки можуть використовуватися тільки нечіткі лінгвістичні змінні, при цьому в кожному з нечітких висловлювань мають бути визначені функції належності значень терм-множини для кожної з лінгвістичних змінних. Для зручності запису найменування окремих термів вхідних і вихідних змінних застосовуються спеціальні загальноприйняті скорочення (табл. 8).

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-09 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 40   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

## Загальноприйняті скорочення вхідних і вихідних змін

| Символічне позначення | Англomовна позначення | Українське позначення     |
|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| NB                    | Negative Big          | Негативне велике          |
| NM                    | Negative Middle       | Негативне середнє         |
| NS                    | Negative Small        | Негативне мале            |
| ZN                    | Zero Negative         | Негативне близьке до нуля |
| Z                     | Zero                  | Нуль, близьке до нуля     |
| PZ                    | Zero Positive         | Позитивне близьке до нуля |
| PS                    | Positive Small        | Позитивне мале            |
| PM                    | Positive Middle       | Позитивне Середнє         |
| PB                    | Positive Big          | Позитивне Велике          |

Процедура знаходження значень функцій належності нечітких множин (термів) на основі звичайних (не нечітких) вихідних даних називається фазифікацією або введенням нечіткості. На цьому етапі здійснюється встановлення відповідності між конкретним значенням окремої вхідної змінної системи нечіткого виведення і значенням функції належності відповідного їй терма вхідної лінгвістичної змінної. Після завершення фазифікації для всіх вхідних змінних мають бути визначені конкретні значення функцій приналежності по кожному з лінгвістичних термів, які використовуються в підумовах бази правил системи нечіткого виведення.

На основі відомих значень істинності підумов визначається ступінь істинності складного висловлювання. Цей етап процедури нечіткого

виведення називається агрегуванням. Для визначення результату нечіткого кон'юнкції (зв'язка "I") у більшості випадків застосовується формула:

$$T(A \wedge B) = \min\{T(A), T(B)\},$$

де  $T(A)$  - ступінь істинності висловлювання  $A$ ;

$T(B)$  - ступінь істинності висловлювання  $B$ ;

$T(A' \wedge B)$  - логічна кон'юнкція нечітких висловлювань  $A$  і  $B$

Однак для визначення ступеня істинності кон'юнкції нечітких висловлювань можуть бути використані й альтернативні формули, такі як:

- алгебраїчний добуток ступенів істинності нечітких висловлювань;
- граничний добуток ступенів істинності нечітких висловлювань;
- драстичний добуток ступенів істинності нечітких висловлювань;
- алгебраїчний добуток ступенів істинності нечітких висловлювань.

Коли будуть знайдені всі значення для кожного з правил, що входять до розглядуваної бази правил системи нечіткого виведення етап визначення ступеня істинності умови (агрегування) вважається закінченим.

У системах нечіткого виведення процес знаходження ступеня істинності кожного з підвисновків правил нечітких продукцій здійснюється на етапі активізації. Під час формування бази правил системи нечіткого виведення задаються вагові коефіцієнти для кожного правила. З метою спрощення формування бази правил ваговий коефіцієнт можна не задавати. За замовчуванням його значення приймається рівним одиниці, тоді ступінь істинності висновку правила, що дорівнює алгебраїчному добутку вагового коефіцієнта на своє значення, дорівнюватиме своєму власному значенню. Потім визначають функції належності кожного з підвисновків для розглянутих вихідних лінгвістичних змінних. Для цієї мети можна використовувати будь-який із відомих способів:

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-09 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 42   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

- min-активація:  $\mu'(y) = \min\{c_i, \mu(y)\}$ ;
- prod- активація:  $\mu'(y) = c_i, \mu(y)$ ;
- average- активація:  $\mu'(y) = 0.5 (c_i, \mu(y))$

Коли для кожного підвисновку бази правил продукцій системи нечіткого висновку визначено ступінь істинності, етап активації вважається закінченим.

На етапі акумуляції (акумулювання) реалізовується процедура знаходження функції належності для кожної з вихідних змінних. Оскільки підвисновки, що стосуються однієї й тієї самої вихідної лінгвістичної змінної, належать різним правилам системи нечіткого висновку, то для отримання функції належності кожної з вихідних змінних виникає необхідність об'єднати всі ступені істинності висновків (підвисновків). Для цього можна скористатися формулою:

$$\mu_D(X) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\},$$

де  $\mu_D(X)$  - функція належності множини D, утвореної об'єднанням двох нечітких множин A і B, задане на цьому ж універсумі X, ( $\forall x \in X$ ).

Процес акумуляції вважається закінченим, коли для кожної з вихідних лінгвістичних змінних будуть визначені підсумкові функції приналежності нечітких множин.

Перехід від категорії нечітких значень до звичайних (не нечітких) значень для кожної з вихідних лінгвістичних змінних множини (дефаззифікація). Для виконання чисельних розрахунків на етапі дефаззифікації існує багато методів. Найбільшого поширення набув метод центру ваги плоскої фігури, отриманої на етапі акумуляції. Чітке значення можна визначити за формулою:

$$y = \frac{\int_{\min}^{\max} x \cdot \mu(x) dx}{\int_{\min}^{\max} \mu(x) dx}$$

де  $y$  - результат дефазифікації;

$X$  - змінна, що відповідає вихідній лінгвістичній змінній  $\omega$ ;

$\mu(x)$  - функція приналежності нечіткої множини, що відповідає вихідній лінгвістичній змінній після етапу акумулювання;

$\min$  і  $\max$  – ліва та права точки інтервалу нечіткого носія множини, при розгляді вихідної змінної  $\omega$ .

Графічне відшукування точки центру тяжіння результуючої нечіткої множини представлено на рис. 4.

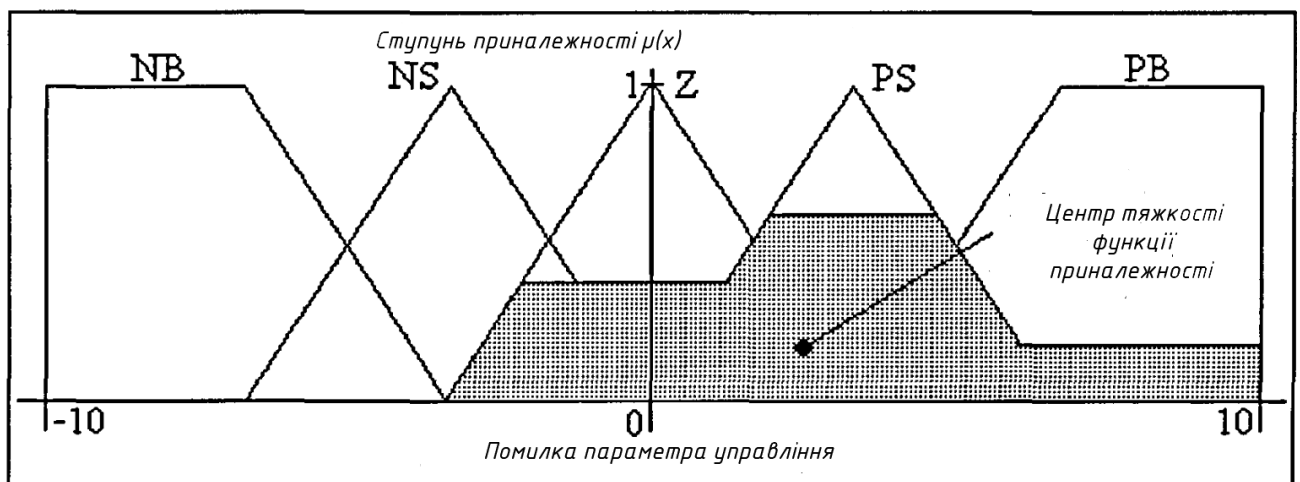


Рис. 4 – Графічне відшукування, що показує центр ваги результуючої нечіткої множини

Під час дефазифікації методом центру ваги чітке значення вихідної змінної дорівнює абсцисі центру ваги площі, обмеженої графіком кривої функції належності відповідної вихідної змінної.

Узагальнена структура алгоритму керування, побудованого на основі системи нечіткого виведення, представлена на рис. 4.

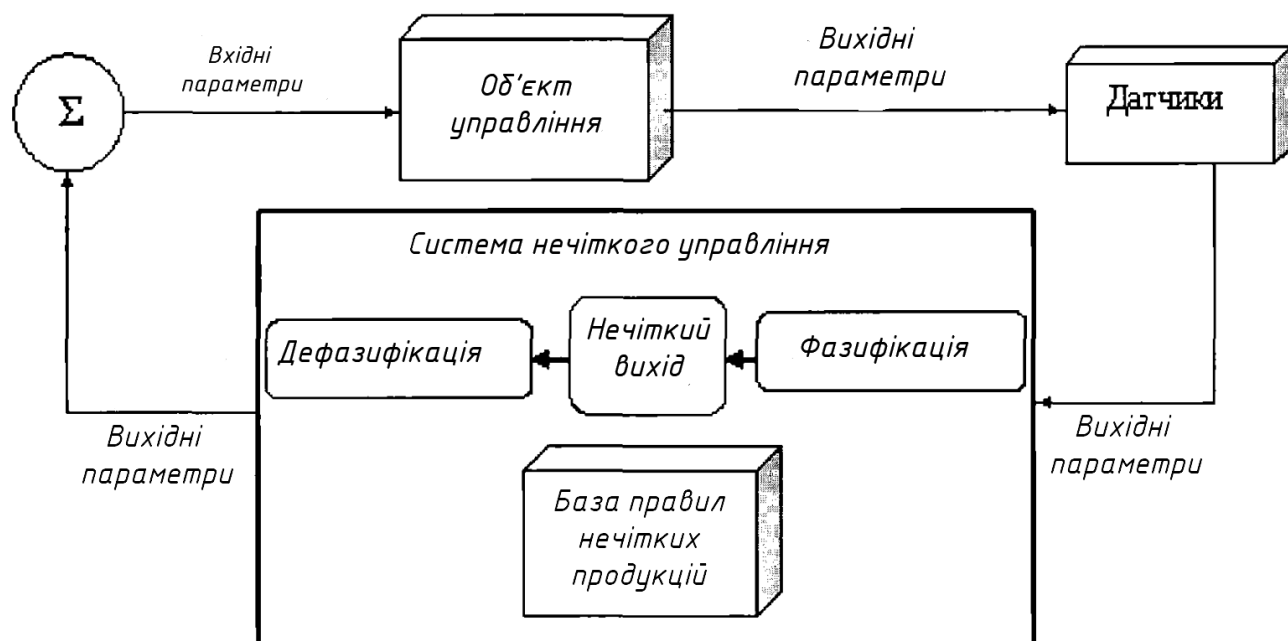


Рис. 5 – Узагальнена структура алгоритму нечіткого керування

## Висновки

Тягові приводи постійного струму перестають відповідати сучасним експлуатаційним вимогам із таких причин: великі масогабаритні показники, низька надійність щітково-колекторного масогабаритні показники, низька надійність щітково-колекторного механізму, висока початкова вартість, зумовлена складністю виготовлення і великим вмістом кольорових металів. виготовлення та великим вмістом кольорових металів, значні експлуатаційні витрати. експлуатаційні витрати. Незважаючи на розвиток силової перетворювальної техніки переважна більшість рудничних електровозів оснащена реостатною системою управління. реостатною системою управління, а отже, існує значна перевитрата енергії. перевитрата енергії. Крім того, тягові електроприводи рудничних електровозів на базі колекторних машин можуть вважатися вибухобезпечними умовно, через іскріння в щітково-колекторному вузлі.

Нині завдяки бурхливому розвитку силової електроніки та мікропроцесорної техніки і мікропроцесорної техніки, що дає змогу реалізовувати найскладніші алгоритми керування, асинхронний частотно-регульований електропривод знаходить широке застосування в різних галузях промисловості, зокрема, і в електричній тязі. зокрема, і в електричній тязі. Асинхронний короткозамкнений двигун позбавлений головних недоліків притаманних колекторним машинам – наявності щітково-колекторного механізму, він простий за конструкцією і виготовленням, практично не потребує обслуговування, має приблизно на третину менші масу і габарити. Позитивний досвід впровадження АТД на промислових електровозах у нашій країні та за кордоном дає підставу вважати, що заміна тягових приводів з МПС на приводи з АТД на рудникових електровозах дасть змогу підвищити експлуатаційні показники таких як:

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-09 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 46   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

енергоспоживання, надійність, вибухобезпечність, масогабаритні показники та тягові характеристики.

Найкраща якість регулювання безконтактними електроприводами забезпечують алгоритми векторного керування, однак такі алгоритми не забезпечують інваріантність до зовнішніх і параметричних збурень. Нині розробляють нові алгоритми керування. Релейна система вибору стандартного вектора напруги статора (DTC) дає змогу регулювати електромагнітний момент двигуна зміною кута  $\alpha$ , має підвищену швидкодію і низькою чутливістю до змін параметрів об'єкта керування. Однак така система не може забезпечити перерозподіл навантаження між тяговими двигунами в разі змін умов роботи рудничних електровозів, які мають випадковий характер.

Система векторного керування асинхронним частотно-регульованим тяговим електроприводом рудничних електровозів інваріантна до зовнішніх збурень і така, що розв'язує задачу розподілу навантаження між тяговими двигунами може бути побудована з використанням апарату нечіткої логіки.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-09 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 47   |

## Список використаних джерел

1. Петренко О.М. Алгоритм синтезу експертної системи управління рухом електрорухомого складу на основі рішення рівняння Гамільтона-Якобі-Беллмана / О.М. Петренко, Б.Г. Любарський, М.Л. Глебова // Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»: зб. наук. пр. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 6 (1178). – С. 89 – 95.
2. Скалозуб В. В. Ресурсозберігаючі методи управління тягою поїздів і удосконалення конструкцій рухомого складу. Автореферат дисертації на наукового ступеня д.т.н. Дніпропетровськ. 2003. 35 с.
3. Пулін М.М. Проблеми перемикання тягової підстанції з випростовувального режиму інверторний і навпаки / М.М. Пулін, О.І. Скрипник // Вісник національного університету «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2003. – № 479. – С. 161-165.
4. «Розрахунок електроенергії рекуперації електрифікованого міського транспорту при встановлення накопичувачів на тяговій підстанції» автор Сулім А.А.
5. Бірюков О.С., Фалендиш А.П., Володарець М.В., Золотухін І.В. Модернізація маневрового тепловоза ЧМЭЗТ з метою зменшення витрати палива і значного зниження викидів шкідливих речовин. // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – Харків: УкрДАЗТ, 2011. – Вип. 126. – С. 157–160.
6. Черняк Ю.В. Фізична модель рекуперативної системи маневрового тепловоза: Монографія / Ю.В.Черняк, Ю.В. Прилепский, І.В. Грицук. – Донецьк: ДонІЗТ, 2010. – 196 с.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251-09 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 48   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

7. Безрученко В. Електричні машини (конспект лекцій для студентів III-курсу) / В.М. Безрученко. – Дніпропетровськ, 2006. – 108 с.
8. Вильнин А.Д., Кладиев С.Н. Структура тягового электропривода рудничного электровоза// Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании: сб. науч. тр. – Одесса, 2011. – Том 2. – С. 80-85.
9. Nguyen Phung Quang et al. Vector Control of Three-Phase AC Machines: System development in practice. Berlin: Springer, 2011.
- 10.Сергієнко, М.І. Основні напрямки роботи Укрзалізниці з енергозбереження та її результати / М.І. Сергієнко // Локомотив-інформ. – 2010. - №4. – С. 24-26.
- 11.Гетьман Г.К. Теория электрической тяги / Г.К. Гетьман. – Днепропетровск : Изд-во Маковецкий, 2011. – 456 с.