

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет автоматизації виробництва, інформаційних та управлінських
технологій
Кафедра автоматизації, електро- та робототехнічних систем

«Допущено до захисту»

Гарант ОПП

Артем РУХЛОВ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня бакалавра

за підсумками виконання

освітньо-професійної програми

«Інжиніринг електропостачання та електромеханічних систем у
металургії та гірництві»

за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка (G3 Електрична інженерія)

на тему "Покращення режимів роботи шлаковозу в умовах
конвертерного цеху ПрАТ «Камет-Сталь» "

Керівник роботи

Віктор ХІЛОВ

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень та напрацювань.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело. Електронний та паперовий варіанти роботи є ідентичними*

Здобувач

Роман КОСЕНКО

Підсумкова оцінка за атестацію			
--------------------------------	--	--	--

Голова ЕК

Денис КОНОНЮК

Запоріжжя 2026

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Факультет	автоматизації виробництва, інформаційних та управлінських технологій
Кафедра	автоматизації, електро- та робототехнічних систем
Ступінь вищої освіти	бакалавр
Спеціальність	141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (G3 Електрична інженерія)
ОПП	Інжиніринг електропостачання та електромеханічних систем у металургії та гірництві

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант ОПП

Артем РУХЛОВ

02.03.2026р

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Косенко Романа Георгійовича

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи Покращення режимів роботи шлаковозу в умовах конвертерного цеху ПрАТ «Камет-Сталь»
керівник роботи Хілов Віктор Сергійович, професор, доктор технічних наук,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом Університету від 23.02. 2026 р. №41/23.02.2026
2. Термін подання роботи 08.06.2026 р.
3. Вихідні дані до роботи Навчальна література, державні стандарти, методична література з спеціальних дисциплін та дипломування, науково-дослідницькі роботи, літературні джерела, технологічні інструкції, дані ПрАТ «Камет-Сталь», результати власних експериментів та досліджень тощо
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань) Анотація. Зміст. Вступ. 1. Аналіз предметної області. 2. Спеціальний розділ. 3. Економічне обґрунтування запропонованих заходів. 4. Безпека праці у предметній області. Загальні висновки. Перелік використаних джерел. Додатки (за потреби).
5. Перелік графічного (демонстраційного) матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Перелік графічного (демонстраційного) матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 1. Шлаковоз. Розташування електромеханічного обладнання. 2. Функціональна схема системи керування. 3. Структурна схема системи керування. 4. Результати дослідження динаміки роботи електроприводу.

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що стосуються їх.

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта
Аналіз предметної області	Проф. Хілов В.С.
Спеціальний розділ	Проф. Хілов В.С.
Економічне обґрунтування запропонованих заходів	Проф. Хілов В.С.
Безпека праці у предметної області	Проф. Хілов В.С.

7. Дата видачі завдання 02.03.2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи
1	Розділ 1. Аналіз предметної області	27.04-02.05 2026
2	Розділ 2. Спеціальний розділ	27.04-02.05 2026
3	Розділ 3. Економічне обґрунтування запропонованих заходів	04.05-09.05 2026
4	Розділ 4. Безпека праці у предметній області	11.05-16.05 2026
5	Висновки, перелік посилань, вступ, зміст, реферат.	18.05-23.05 2026
6	Подання завершеної роботи. Перевірка на академічний плагіат	25.05-30.05 2026
7	Остаточне оформлення роботи та графічного (презентаційного) матеріалу	01.06-06.06 2026
8	Рецензування завершеної роботи. Захист.	08.06-27.06 2026

Здобувач

(Роман КОСЕНКО)

Керівник роботи

(Віктор ХІЛОВ)

АНОТАЦІЯ

Косенко Роман Георгієвич. Покращення режимів роботи шлаковозу в умовах конвертерного цеху ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ». 97 сторінок машинописного тексту, 14 рисунків, 17 таблиць, 34 використаних джерел. – Кваліфікаційна праця на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавра за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». ОПП «Інжиніринг електропостачання та електромеханічних систем у металургії та гірництві» – ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, 2026.

Об'єктом дослідження є електромеханічна система приводу шлаковозу конвертерного цеху ПрАТ «Камет-Сталь» в умовах змінних технологічних навантажень та експлуатаційних режимів.

Предметом дослідження є режими роботи електроприводу шлаковозу, процеси пуску, регулювання швидкості та забезпечення тягових характеристик, а також методи підвищення енергоефективності й зменшення пробуксовки колісних пар.

У першому (аналітичному) розділі встановлено особливості технологічного процесу транспортування шлаку в умовах конвертерного цеху, визначено основні фактори, що впливають на роботу шлаковоза, зокрема значні інерційні навантаження, часті пуски та гальмування, нерівномірність розподілу навантаження на колісні пари та ризик втрати зчеплення з рейковою колією. Показано, що існуючі режими роботи супроводжуються підвищеними втратами енергії та зниженням ресурсу механічного обладнання.

У спеціальному розділі проведено детальний аналіз електромеханічної системи шлаковоза, виконано розрахунок навантажувальних діаграм, параметрів двигуна та тиристорного перетворювача, а також побудовано математичну модель електропривода. Обґрунтовано вибір системи «тиристорний випрямляч – двигун постійного струму».

У третьому розділі виконано економічне обґрунтування запропонованих заходів, яке показало, що модернізація електропривода забезпечує суттєве зниження витрат на електроенергію, ремонт та обслуговування обладнання. Розраховані показники ефективності (NPV, IRR, PI) підтверджують високу інвестиційну привабливість проєкту та короткий термін його окупності.

У четвертому розділі надані заходи з охорони праці та безпека виробництва при роботі в киснево-конверторному цеху. Зроблено розрахунок освітлення машинного залу тиристорних перетворювачів.

ЕЛЕКТРОПРИВОД, ШЛАКОВОЗ, ПРОБУКСОВКА, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, РЕЖИМИ РОБОТИ.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ	9
1.1 Особливості технологічного процесу киснево-конверторного цеху ПрАТ КАМЕТ-СТАЛЬ	9
1.2 Огляд та аналіз систем електроприводу шлаковозів у металургійному виробництві.....	11
1.3 Висновки за розділом.....	17
2 СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ	19
2.1 Особливості транспортування шлаку шлаковозами в ККЦ.....	19
2.2 Технічні параметри платформи шлаковоза	21
2.3 Технічні параметри тягового двигуна та тиристорних перетворювачів	24
2.4 Технічні вимоги до електроприводу шлаковозу.....	25
2.5 Обґрунтування вибору роду струму, типу електроприводу та способу регулювання координат	28
2.6 Розрахунок діаграми навантаження двигуна при пересуванні шлаковозу. Вибір потужності тягових двигунів.....	32
2.7 Визначення сталих часу та коефіцієнтів двигуна як об'єкту керування	35
2.8 Особливості тягового приводу	37
2.9 Аналіз особливостей розподілу навантаження на колісні пари.....	39
2.10 Умови втрати зчеплення колісні пари з рейкою	43
2.11 Рівняння лінійного руху шлаковозу	44
2.12 Розрахунок налаштувань регуляторів струму та електрорушійної сили системи управління приводом шлаковозу	46
2.13 Розрахунок параметрів тиристорного перетворювача	48
2.14 Розрахунок параметрів силового кола	49
2.15 Параметри механічної системи шлаковозу	50
2.16 Передатна функція тиристорного перетворювача	50
2.17 Аналіз відповідності електромеханічних характеристик електропривода заданим експлуатаційним вимогам	53
2.18 Розрахунок електромеханічних характеристик розімкнутої системи перетворювач-двигун.....	55
2.19 Структурна схема силового каналу електроприводу.....	57
2.20 Система автоматичного регулювання електрорушійної сили приводу колісної пари.....	58
2.21 Оптимізація контуру струму.....	62
2.22 Оптимізація контуру електрорушійної сили	64
2.23 Розробка математичної моделі та аналіз режимів роботи шлакового автотранспортеру конверторного цеху.....	65
2.24 Висновки за розділом	75
3 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОНОВАНИХ ЗАХОДІВ	79

3.1 Розрахунок економічного ефекту від зменшення буксування колісних пар та зниження експлуатаційних витрат	79
3.1.1 Економічний ефект від зниження зносу бандажів колісних пар ..	79
3.1.2 Економічний ефект від скорочення ремонтів редукторів	80
3.1.3 Економічний ефект від скорочення ремонтів тягових двигунів ...	80
3.1.4 Загальний економічний ефект	80
3.2 Оцінка ефективності інвестиційного проєкту	80
3.2.1 Вихідні дані	80
3.2.2 Розрахунок чистого приведеного доходу (NPV)	81
3.2.3 Розрахунок індексу прибутковості (PI)	81
3.2.4 Розрахунок внутрішньої норми прибутковості (IRR)	81
3.3 Аналіз чутливості інвестиційного проєкту	82
3.3.1 Мета аналізу чутливості	82
3.3.2 Аналіз впливу зміни капітальних вкладень	82
3.3.2 Аналіз впливу зміни річного економічного ефекту	83
3.3.3 Аналіз впливу тарифу на електроенергію	83
3.3.4 Аналіз впливу ставки дисконтування	83
3.3.5 Визначення критичного значення економічного ефекту	84
3.3.6 Сценарний аналіз	84
3.4 Висновки до розділу	85
4 БЕЗПЕКА ПРАЦІ У ПРЕДМЕТНІЙ ОБЛАСТІ	86
4.1 Загальна характеристика умов праці в конвертерному цеху ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ»	86
4.2 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів	89
4.3 Аналіз небезпеки ураження електричним струмом	89
4.4 Заходи щодо захисту від теплового випромінювання	90
4.5 Захист від шуму та вібрацій	90
4.6 Забезпечення пожежної безпеки	90
4.7 Безпека під час модернізації електропривода	91
4.8 Вплив запропонованої модернізації на безпеку праці	91
4.9 Розрахунок штучного освітлення машинного залу	92
4.10 Висновки до розділу	93
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	94
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	96



ВСТУП

Сучасні металургійні підприємства характеризуються високою енергоємністю технологічних процесів, значною концентрацією потужного електромеханічного обладнання та жорсткими вимогами до надійності й безперервності виробництва. Важливе місце у структурі допоміжного технологічного транспорту конвертерних цехів займають шлаковози, які забезпечують транспортування шлакових чаш між технологічними ділянками. Від ефективності роботи шлаковозів значною мірою залежить ритмічність технологічного процесу, безпечність експлуатації обладнання та загальна продуктивність металургійного виробництва.

В умовах конвертерного цеху ПрАТ «Камет-Сталь» шлаковози працюють у складних експлуатаційних умовах, що характеризуються значними змінними навантаженнями, частими пусками та гальмуваннями, підвищеними динамічними моментами, несприятливими температурними режимами та високими вимогами до точності керування електроприводом. Однією з характерних проблем є виникнення пробуксовки колісних пар під час пуску та руху, що призводить до збільшення механічних втрат, прискореного зношування коліс і рейкових шляхів, погіршення енергетичних показників та зниження ефективності транспортного процесу.


Особливого значення набувають питання вдосконалення режимів роботи багатодвигунного електроприводу шлаковозу, оптимізації процесів пуску та регулювання швидкості, забезпечення рівномірного розподілу навантаження між приводними осями, а також підвищення енергоефективності електромеханічної системи. Застосування сучасних методів аналізу та математичного моделювання електроприводів дозволяє оцінити вплив різних режимів роботи на тягові характеристики транспортного засобу, дослідити причини виникнення нестійких режимів та обґрунтувати технічні рішення щодо їх усунення.

Актуальність теми бакалаврської роботи обумовлена необхідністю підвищення ефективності функціонування електромеханічних систем промислового транспорту металургійних підприємств, зменшення енергоспоживання, покращення динамічних характеристик електроприводу та підвищення надійності роботи шлаковозів в умовах інтенсивного виробництва.

Об'єктом дослідження є електромеханічна система шлаковозу конвертерного цеху ПрАТ «Камет-Сталь» в умовах змінних технологічних навантажень.

Предметом дослідження є режими роботи електроприводу шлаковозу, процеси пуску, регулювання швидкості, розподіл тягових зусиль між приводними осями та методи підвищення енергоефективності й зменшення пробуксовки колісних пар.

Метою роботи є підвищення ефективності роботи шлаковозу шляхом удосконалення режимів функціонування його електроприводу та аналізу



електромеханічних процесів, що виникають під час експлуатації в умовах конвертерного виробництва.

Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно вирішити такі задачі:

1) проаналізувати умови експлуатації шлаковозу в конвертерному цеху;

2) дослідити особливості роботи багатодвигунного електроприводу;

3) виконати аналіз тягових та динамічних режимів роботи;

4) визначити причини виникнення пробуксовки колісних пар;

5) розробити рекомендації щодо покращення режимів роботи електроприводу;

6) оцінити вплив запропонованих рішень на енергетичні та експлуатаційні показники системи.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання запропонованих технічних рішень для підвищення надійності та енергоефективності роботи шлаковозів у металургійному виробництві, зменшення втрат електроенергії та покращення умов експлуатації електромеханічного обладнання.

Бакалаврська робота виконана за фахом G3 освітньо-професійної програми «Інжиніринг електропостачання та електромеханічних систем у металургії та гірництві» спеціальності Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Публікації. За результатами виконаних у бакалаврській роботі досліджень опубліковано 3 статті у журналах, збірниках наукових праць і матеріалів науково-технічних конференцій:

1. Стрункін Г.М, Михайлов В.Ю., Койфман О.О., Хілов В.С., Косенко Р.Г. Досвід розробки автоматизованого електроприводу перегінного комплексу для кар'єрних екскаваторів. / Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки, №5, 2025, р.99-106. DOI: <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-11>.

2. Косенко Р.Г., Сніговий Д.В., Хілов В.С. Розробка математичної моделі та дослідження режимів роботи шлаковозу в умовах конвертерного цеху ПРАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ». Матеріали Шістнадцятої Міжнародної наукової конференції студентів та молодих вчених «Сучасні інформаційні технології – 2026» «Modern Information Technology – 2026» (14-15 травня 2026 р., м. Одеса) / МОН України; Національний університет «Одеська політехніка»; Ін-т комп'ют. систем. Одеса : Наука і техніка, 2026. 474 с. URL https://drive.google.com/drive/folders/1uXN7b84231YhSfT_tY6l9eMhPjDrIBKJ.

3. Косенко Р.Г., Сніговий Д.В., Хілов В.С. Покращення динаміки тиристорного приводу постійного струму шлаковозу конверторного цеху ПРАТ «КАТЕТ-СТАЛЬ». Збірник тез та анотацій наукових доповідей. Одеса, 2025, Олді+. С.160-163. URL: <https://dspace.mipolytech.education/items/6e2cb261-1e14-4ed9-аба8-8c2c1c9543c8>.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Особливості технологічного процесу киснево-конверторного цеху ПрАТ КАМЕТ-СТАЛЬ

Сутність киснево-конверторного процесу.

Технологічний процес у ККЦ базується на переробці рідкого чавуну в сталь шляхом продування металу чистим киснем у конвертері. Основними складовими шихти є:

- 1) рідкий чавун із доменного цеху;
- 2) металобрухт;
- 3) флюси (вапно, доломіт);
- 4) кисень високої чистоти.

Під час продування киснем відбувається окиснення домішок чавуну:

- 1) вуглецю;
- 2) кремнію;
- 3) марганцю;
- 4) фосфору.

У результаті формується рідка сталь необхідного хімічного складу та шлак.

Основні стадії технологічного процесу. Підготовка конвертера.

Перед початком плавки конвертер очищують від залишків шлаку та перевіряють стан футерівки. Велике значення має вогнетривка футерівка, яка працює в умовах високих температур і агресивного середовища.

Завалка металобрухту. У конвертер завантажують металобрухт, який:

- 1) охолоджує процес;
- 2) знижує витрати рідкого чавуну;
- 3) підвищує економічність виробництва.

На «КАМЕТ-СТАЛІ» впроваджено технологію попереднього підігріву брухту киснем і газовим вугіллям, що дозволяє збільшити частку брухту у плавці та зменшити собівартість сталі.

Заливка рідкого чавуну. Після завалки брухту у конвертер заливають рідкий чавун із мікзера або чавуновозних ковшів.


Продування киснем. Через водоохолоджувану фурму у ванну подається кисень під високим тиском. У процесі продування:

- 1) підвищується температура металу;
- 2) інтенсивно окислюються домішки;
- 3) утворюється шлак;
- 4) виділяються конвертерні гази.

Процес супроводжується автоматизованим контролем температури та хімічного складу сталі.

Позапічна обробка сталі. Після випуску з конвертера сталь направляється на установки «піч-ківш», де здійснюється:

- 1) коригування хімічного складу;

- 
- 2) десульфурація;
 - 3) доведення температури;
 - 4) рафінування металу.

На підприємстві функціонують установки позапічної обробки сталі, що значно покращують якість готової продукції.

Безперервне лиття заготовок. Однією з головних особливостей ККЦ ПрАТ «Камет-Сталь» є використання машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ). Майже вся сталь після конвертерів розливається безперервним способом.

Переваги МБЛЗ:

- 1) зменшення втрат металу;
- 2) покращення структури сталі;
- 3) підвищення продуктивності;
- 4) зниження енергоспоживання.

На підприємстві експлуатуються сучасні багатострумкові МБЛЗ із модернізованими системами автоматизації та електроприводів.

Особливості енергетичного та газового забезпечення. Для роботи ККЦ необхідні:

- 1) кисень;
- 2) азот;
- 3) стиснене повітря;
- 4) системи газоочистки.

На «КАМЕТ-СТАЛІ» проводиться модернізація компресорного обладнання та повітророзподільчих установок, що дозволяє:

- знизити енергоспоживання;
- підвищити надійність роботи;
- автоматизувати технологічні процеси.


Автоматизація та модернізація. Особливістю сучасного ККЦ є високий рівень автоматизації:

- 1) автоматичний контроль параметрів плавки;
- 2) контроль температури металу;
- 3) автоматизоване керування МБЛЗ;
- 4) системи аспірації та газоочистки;
- 5) частотне регулювання електроприводів.

На підприємстві регулярно виконуються капітальні ремонти конвертерів, реконструкція МБЛЗ та модернізація електрообладнання.

Таким чином, технологічний процес ККЦ ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» характеризується:

- 1) використанням киснево-конвертерної технології виплавки сталі;
- 2) високою продуктивністю;
- 3) широким застосуванням безперервного лиття заготовок;
- 4) впровадженням позапічної обробки сталі;
- 5) високим рівнем автоматизації;
- 6) постійною модернізацією обладнання;
- 7) енергозберігаючими технологіями.



Це забезпечує отримання якісної сталі при зниженні витрат енергії та підвищенні ефективності виробництва.

1.2 Огляд та аналіз систем електроприводу шлаковозів у металургійному виробництві

Сучасне металургійне виробництво характеризується високою інтенсивністю технологічних процесів, значними вантажопотоками та жорсткими вимогами до надійності транспортного обладнання. Одним із ключових елементів внутрішньоцехового транспорту конвертерних і доменних цехів є шлаковози, призначені для транспортування рідкого шлаку між виробничими ділянками та місцями його переробки або відвалами. Робота шлаковозів супроводжується значними механічними та тепловими навантаженнями, що обумовлює підвищені вимоги до систем електроприводу, тягових характеристик та систем автоматичного керування [1 - 3].


У вітчизняній і зарубіжній практиці застосовуються різні типи електроприводів шлаковозів та іншого технологічного рейкового транспорту [4 - 6]:

- 1) електроприводи постійного струму;
- 2) асинхронні електроприводи змінного струму;
- 3) електроприводи з частотним регулюванням;
- 4) багатодвигунні тягові системи;
- 5) дизель-електричні та гібридні приводи.

Традиційно на металургійних підприємствах України використовувалися тягові електроприводи постійного струму, які характеризувалися високими пусковими моментами та відносною простотою регулювання швидкості. Однак такі системи мають низку суттєвих недоліків: значні втрати енергії у пускових режимах, складність технічного обслуговування колекторних машин, знижену надійність у важких умовах експлуатації та підвищені витрати на ремонт [7 - 9].

У сучасних умовах спостерігається тенденція переходу до асинхронних електроприводів із частотним регулюванням, які забезпечують більш плавний пуск, покращені енергетичні характеристики та підвищену надійність роботи. У роботах українських дослідників, присвячених електроприводам тягового транспорту, відзначається ефективність використання асинхронних двигунів із векторним керуванням для забезпечення стабільних тягових характеристик та зменшення динамічних навантажень [8].

Значна увага приділяється проблемам узгодження роботи багатодвигунних електроприводів, які широко застосовуються на шлаковозах і промислового рейкового транспорті. Нерівномірний розподіл навантаження між приводними колесами призводить до виникнення пробуксовки, підвищеного зношування колісних пар та рейкових шляхів, а також погіршення енергоефективності транспортного процесу. Для усунення цих недоліків використовуються системи



автоматичного регулювання тягових зусиль, адаптивні алгоритми керування та сучасні перетворювачі частоти.

У працях, присвячених транспортним системам перевезення металургійних шлаків, підкреслюється, що ефективність роботи шлаковозів значною мірою визначається оптимізацією режимів руху, скороченням простоїв та раціональним вибором параметрів тягового обладнання. Застосування математичного моделювання дозволяє оцінити вплив режимів роботи електроприводу на продуктивність транспортної системи та витрати енергії.

Серед закордонних досліджень важливе місце займають роботи, пов'язані з підвищенням надійності та безпечності шлаковозів у складних умовах металургійного виробництва. У дослідженнях компанії [8, 9] зазначається, що сучасні шлаковози повинні забезпечувати високу тягову здатність, стабільність руху та безпечну експлуатацію при транспортуванні вантажів великої маси в умовах високих температур.

У роботах європейських дослідників значна увага приділяється впливу теплових навантажень на елементи шлаковозів та транспортних чаш для перевезення рідкого шлаку. Встановлено, що циклічні теплові деформації та механічні перевантаження призводять до прискореного зношування конструкцій і негативно впливають на режими роботи електроприводу [10, 11].

Перспективним напрямом розвитку тягових електроприводів є використання систем рекуперації енергії гальмування. У сучасних тягових електромеханічних системах рекуперативне гальмування дозволяє частково повертати енергію в мережу або накопичувачі енергії, що забезпечує зниження енергоспоживання та підвищення загальної ефективності транспортного комплексу [12 – 14].


У сучасних системах автоматизованого електроприводу промислового транспорту широко застосовуються [15]:

- 1) мікропроцесорні системи керування;
- 2) цифрові перетворювачі частоти;
- 3) системи діагностики стану електроприводу;
- 4) адаптивні алгоритми регулювання тягових моментів;
- 5) системи контролю пробуксовки.

Особливої актуальності набуває впровадження частотно-регульованих електроприводів змінного струму. Компанія [16] розробила тягові електроприводи на базі асинхронних двигунів та перетворювачів частоти для важких умов експлуатації промислового транспорту. Такі системи забезпечують плавне регулювання швидкості, зниження ударних навантажень під час пуску та покращення енергетичних характеристик транспортних машин [16-20].

Таким чином, аналіз сучасних систем електроприводу шлаковозів показує, що основними напрямками їх удосконалення є [17 – 25]:

- 1) перехід від електроприводів постійного струму до асинхронних частотно-регульованих систем;

- 
- 2) підвищення енергоефективності тягових електроприводів;
 - 3) зменшення пробуксовки колісних пар;
 - 4) оптимізація режимів пуску та гальмування;
 - 5) використання систем автоматичного регулювання та діагностики;
 - 6) впровадження рекуперативного гальмування.

Отже, вдосконалення режимів роботи електроприводу шлаковозу в умовах конвертерного цеху ПрАТ «Камет-Сталь» є актуальним науково-технічним завданням, спрямованим на підвищення надійності, енергоефективності та безпечності роботи технологічного транспорту металургійного виробництва.

На зараз використання електроприводів з тиристорними випрямлячами для шлаковозів у металургійному виробництві є економічно доцільним завдяки підвищенню енергоефективності, покращенню динамічних характеристик електроприводу, зменшенню механічних навантажень та скороченню експлуатаційних витрат. Економічна ефективність таких систем підтверджується як технічними особливостями тиристорного регулювання, так і практикою їх використання у важких умовах промислового транспорту.

Однією з основних переваг тиристорних електроприводів є плавне регулювання напруги на якорі двигуна постійного струму. У порівнянні з реостатними системами керування це дозволяє значно зменшити втрати електроенергії у пускових режимах. При реостатному пуску значна частина енергії розсіюється у вигляді тепла на пускових резисторах, тоді як тиристорний перетворювач забезпечує регулювання напруги безпосередньо електронним способом.

Енергетичний ефект можна оцінити через зменшення втрат потужності:

$$P_{\text{вт}} = RI^2, \quad (1.1)$$

де $P_{\text{вт}}$ - втрати потужності;


I - струм двигуна;

R - опір пускових резисторів.

У реостатних схемах при великих пускових струмах втрати енергії є значними. Використання тиристорного випрямляча дозволяє практично усунути ці втрати, що особливо важливо для шлаковозів, які працюють у режимах частих пусків і гальмувань.

Крім економії електроенергії, тиристорні електроприводи забезпечують:

- 1) плавний пуск;
- 2) обмеження ударних струмів;
- 3) зниження динамічних моментів;
- 4) покращення тягових характеристик;
- 5) зменшення пробуксовки колісних пар.



Для шлаковозів це має особливе значення, оскільки під час пуску виникають великі тягові навантаження, пов'язані з транспортуванням важких шлакових чаш. Плавне регулювання моменту двигуна дозволяє зменшити перевантаження механічних передач та колісних пар.

Електромагнітний момент двигуна визначається співвідношенням:

$$M = c\Phi I_a, \quad (1.2)$$

де M – електромагнітний момент;

c – конструктивний коефіцієнт;

Φ – магнітний потік;

I_a – струм якоря.

Тиристорне керування дозволяє плавно змінювати струм якоря, а отже – і тяговий момент, що позитивно впливає на стабільність руху шлаковозу та зменшує ймовірність буксування.

Важливим економічним фактором є також підвищення коефіцієнта корисної дії системи електроприводу. Для тиристорних електроприводів ККД значно вищий порівняно з реостатними схемами завдяки зменшенню теплових втрат. Це особливо помітно при тривалій роботі в режимах неповного навантаження та частих перехідних процесах.

Сумарний економічний ефект від впровадження тиристорного електроприводу включає:

- 1) зменшення витрат електроенергії;
- 2) скорочення витрат на ремонт механічного обладнання;
- 3) збільшення ресурсу колісних пар;
- 4) зниження простоїв транспортного обладнання;
- 5) підвищення продуктивності транспортного процесу.


Крім того, тиристорні системи забезпечують можливість автоматизації процесів керування та інтеграції з сучасними системами діагностики. Це дозволяє реалізувати:

- 1) автоматичне обмеження струмів;
- 2) контроль тягових режимів;
- 3) захист від перевантажень;
- 4) адаптивне регулювання швидкості.

У порівнянні з асинхронними частотно-регульованими електроприводами тиристорні системи часто є економічно вигіднішими при модернізації існуючих шлаковозів, оскільки дозволяють використовувати наявні двигуни постійного струму без повної заміни тягового обладнання. Це суттєво знижує капітальні витрати на реконструкцію.

Таким чином, застосування електроприводів з тиристорними випрямлячами для шлаковозів є технічно та економічно обґрунтованим рішенням, яке забезпечує:

- 1) зниження енергоспоживання;
- 2) покращення динамічних режимів роботи;

- 
- 3) зменшення механічних перевантажень;
 - 4) підвищення надійності електромеханічної системи;
 - 5) скорочення експлуатаційних витрат;
 - 6) підвищення ефективності роботи технологічного транспорту металургійного підприємства.

Для умов експлуатації шлаковозів конвертерного цеху використання електроприводів постійного струму з тиристорними випрямлячами у ряді випадків є економічно доцільнішим порівняно з асинхронними частотно-керованими електроприводами. Це пояснюється особливостями роботи технологічного транспорту металургійних підприємств, наявністю існуючої інфраструктури, характером навантажень та співвідношенням капітальних і експлуатаційних витрат.

Основною перевагою тиристорних систем є можливість модернізації існуючих електроприводів без повної заміни тягових двигунів та механічної частини шлаковозу. На більшості металургійних підприємств шлаковози обладнані тяговими двигунами постійного струму, які мають значний запас механічної міцності та високі пускові характеристики. У такому випадку модернізація системи керування шляхом встановлення тиристорного випрямляча потребує значно менших капітальних витрат, ніж повна заміна приводу на асинхронний із частотним перетворювачем.

Капітальні витрати на впровадження асинхронного частотно-регульованого електроприводу включають:

- 1) придбання нових асинхронних двигунів;
- 2) встановлення частотних перетворювачів;
- 3) заміну системи охолодження;
- 4) реконструкцію механічних передач;
- 5) модернізацію силових кабельних мереж;
- 6) налаштування систем автоматичного керування.

У той же час тиристорна система потребує лише:

- 1) встановлення тиристорного випрямляча;
- 2) модернізації системи керування;
- 3) часткової реконструкції силових кіл.

Тому початкові інвестиції в тиристорний електропривод можуть бути у 2–3 рази нижчими.

Економічна ефективність модернізації може бути оцінена через термін окупності:

$$T = \frac{K}{\Delta C}, \quad (1.3)$$

де T -термін окупності;

K - капітальні витрати;

ΔC -річний економічний ефект.

Оскільки капітальні витрати для тиристорної модернізації суттєво нижчі, термін окупності також є меншим.



Для шлаковозів характерними є:

- 1) короткочасні режими роботи;
- 2) часті пуски та гальмування;
- 3) великі перевантаження;
- 4) невисокі швидкості руху;
- 5) значні ударні навантаження.

У таких умовах двигуни постійного струму мають суттєві переваги завдяки високому пусковому моменту:

У двигунах постійного струму пусковий момент прямо пропорційний струму якоря, що дозволяє забезпечити значні тягові зусилля навіть при малих швидкостях руху. Для асинхронних двигунів формування великого пускового моменту потребує складних алгоритмів векторного керування та потужних частотних перетворювачів, що підвищує вартість системи.

Крім того, у важких умовах металургійного виробництва частотні перетворювачі мають підвищену чутливість до:

- 1) високих температур;
- 2) пилу;
- 3) вібрацій;
- 4) електромагнітних завад;
- 5) перенапруг у мережі.

Тиристорні випрямлячі конструктивно простіші та більш стійкі до несприятливих умов експлуатації, що знижує витрати на технічне обслуговування та ремонт.

Важливим фактором є також ремонтпридатність систем. На багатьох металургійних підприємствах уже існує база обслуговування електроприводів постійного струму:

- 1) запасні частини;
- 2) ремонтний персонал;
- 3) налагоджувальне обладнання;
- 4) відпрацьовані методики діагностики.

Перехід на асинхронний частотно-керований електропривод потребує:


- 1) перепідготовки персоналу;
- 2) придбання нового діагностичного обладнання;
- 3) зміни систем технічного обслуговування.

Це також збільшує експлуатаційні витрати.

Для шлаковозів важливе значення має робота на малих швидкостях і в режимах перевантаження. У цих режимах двигуни постійного струму забезпечують більш стабільне регулювання швидкості без складних алгоритмів керування. Тиристорне регулювання дозволяє плавно змінювати напругу:

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha, \quad (1.4)$$

де U_d – випрямлена напруга;



U_{a0} – максимальна напруга випрямляча;
 α – кут керування тиристорами.

Це забезпечує плавний пуск і зменшення динамічних ударів у механічній системі.

Хоча асинхронні частотно-регульовані приводи мають вищий ККД та кращі енергетичні характеристики при тривалих режимах роботи, для шлаковозів із короткочасними циклами роботи цей ефект часто не компенсує високих капітальних витрат на модернізацію.

Таким чином, використання електроприводів із тиристорними випрямлячами для шлаковозів є економічно доцільним у порівнянні з частотно-керованими асинхронними двигунами завдяки:

- 1) меншим капітальним витратам;
- 2) можливості використання існуючих двигунів;
- 3) високому пусковому моменту;
- 4) кращій пристосованості до важких режимів роботи;
- 5) простішому технічному обслуговуванню;
- 6) меншому терміну окупності;
- 7) високій надійності в умовах металургійного виробництва.

Тому для модернізації існуючих шлаковозів конвертерного цеху ПрАТ «Камет-Сталь» застосування тиристорних електроприводів може бути більш раціональним техніко-економічним рішенням.


У науково-технічній літературі питання моделювання приводів шлаковозів найчастіше розглядаються в рамках дослідження електромеханічних систем рейкового транспорту промислових підприємств. Основна увага приділяється аналізу пускових режимів, динамічних навантажень, тягових характеристик та забезпеченню необхідного зчеплення коліс з рейками [26, 27].

Математичне моделювання електропривода шлаковозу є ефективним інструментом дослідження його динамічних режимів роботи та вибору технічних рішень, спрямованих на підвищення продуктивності, надійності та безпеки експлуатації в умовах конвертерного виробництва [28 - 31].

1.3 Висновки за розділом

У першому розділі бакалаврської роботи виконано аналіз технологічного процесу киснево-конвертерного цеху ПрАТ «Камет-Сталь» та розглянуто особливості функціонування електроприводів шлаковозів у металургійному виробництві.

Встановлено, що киснево-конвертерний процес характеризується високою інтенсивністю виробництва, значними тепловими потоками та безперервним переміщенням великих мас розплавленого металу і шлаку. Технологічний цикл включає операції завантаження шихти, продувки киснем, випуску сталі та транспортування шлаку, що формує складні умови експлуатації допоміжного технологічного транспорту.



Особливістю роботи шлаковозів у конвертерному цеху є їх функціонування в умовах підвищених температур, інтенсивного теплового випромінювання, запиленості та значних динамічних навантажень. Режими руху характеризуються частими пусками, гальмуваннями, змінами швидкості та нерівномірним розподілом навантаження на колісні пари, що суттєво впливає на вимоги до електропривода.

Аналіз технологічного процесу показав, що надійність транспортування шлаку є критично важливою для безперервності роботи конвертерного виробництва, оскільки будь-які збої в роботі шлаковозів можуть призвести до простоїв основного технологічного обладнання та значних економічних втрат.

Виконано огляд існуючих систем електроприводів шлаковозів, які застосовуються у металургійному виробництві. Встановлено, що традиційно використовуються асинхронні та постійного струму електроприводи, а також сучасні частотно-керовані системи на базі напівпровідникових перетворювачів.

Показано, що асинхронні нерегульовані приводи мають обмежені можливості регулювання швидкості та недостатню гнучкість у важких пускових режимах. Частотно-регульовані асинхронні системи забезпечують кращі енергетичні показники, однак потребують складної системи керування та значних капітальних витрат при модернізації існуючого обладнання.

Електроприводи постійного струму з тиристорним керуванням, незважаючи на наявність колекторного вузла, забезпечують високий пусковий момент, широкий діапазон регулювання швидкості та високу динамічну керованість, що є критично важливим для умов роботи шлаковоза.

Таким чином, результати аналізу предметної області показали, що для умов киснево-конвертерного цеху ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» найбільш доцільними є регульовані електроприводи з високою перевантажувальною здатністю та можливістю точного керування тяговим моментом, що створює основу для подальшого обґрунтування вибору системи електропривода та розробки математичної моделі у наступних розділах роботи.

Окремим напрямом досліджень є моделювання процесів взаємодії колеса з рейкою. Для важких транспортних машин металургійних підприємств характерна можливість виникнення буксування через забруднення рейок шлаком, окалиною та вологою. Тому в математичних моделях враховуються коефіцієнт зчеплення, сила тяги та вертикальне навантаження на колісні пари. Особливої уваги потребують режими пуску та руху на підйомах, коли реалізується максимальна сила тяги.

2 СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Особливості транспортування шлаку шлаковозами в ККЦ

Утворення конвертерного шлаку. Під час продування чавуну киснем у конвертері відбувається окиснення домішок (кремнію, фосфору, марганцю, частково заліза), унаслідок чого формується велика кількість рідкого шлаку. Шлак має високу температуру – близько 1400–1700 °С – та значну хімічну активність.

Конструкція та призначення шлаковозів. Для транспортування шлаку використовуються спеціальні залізничні шлаковози. Шлаковоз складається з:

- спеціальної платформи;
- шлакового ковша великої місткості;
- механізму нахилу або перекидання ковша;
- ходових візків для переміщення рейковими коліями.

Шлаковозні ковші виготовляються з жаростійкої сталі та мають товсту футерівку, здатну витримувати високі температури рідкого шлаку. Конструкція забезпечує:

- термічну стійкість;
- механічну міцність;
- можливість багаторазового циклічного нагріву та охолодження.

Технологічна схема транспортування шлаку. Злив шлаку з конвертера.

Після завершення випуску сталі конвертер нахилиють у бік шлакової чаші або шлакового ковша. Рідкий шлак зливається у шлаковозний ківш, який встановлений на залізничній платформі.

Переміщення шлаковозів. Шлаковози переміщуються локомотивами спеціальними внутрішньоцеховими залізничними коліями. Основними особливостями такого транспортування є:

- робота в умовах високих температур;
- інтенсивне теплове випромінювання;
- значне пиловиділення;
- необхідність чіткої координації руху транспорту в межах цеху.

Для забезпечення безперервності процесу у ККЦ організовано потокову систему руху шлаковозів із мінімальними простоями.


Особливості експлуатації шлаковозів у ККЦ ПРАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ».

Для підприємства характерні:

- великі обсяги виплавки сталі;
- значна кількість конвертерних плавок;
- інтенсивний рух технологічного транспорту.

Тому до шлаковозного господарства висуваються підвищені вимоги щодо:

- надійності;
- термостійкості обладнання;

- 
- швидкості обороту шлакових чаш;
 - безпеки обслуговування.

На підприємстві застосовується система оперативної заміни шлакових ковшів, що дозволяє скоротити тривалість технологічного циклу.

Вивантаження шлаку. Після доставки на шлаковий двір або шлакопереробну дільницю шлак вивантажують шляхом перекидання ковша. Для цього використовуються:

- механізми нахилу ковша;
- стаціонарні перекидачі;
- спеціальні естакади.

Після охолодження шлак:

- дробиться;
- сортується;
- частково використовується повторно у будівництві або металургійному виробництві.

Основні небезпечні та шкідливі фактори процесу. Транспортування шлаку супроводжується:

- високими температурами;
- можливими викидами розплаву;
- запиленістю;
- газовиділенням;
- шумом;
- ризиком пошкодження рейкового транспорту.

Тому застосовуються:

- дистанційне керування окремими операціями;
- теплозахисні екрани;
- системи аспірації;
- спеціальний термостійкий спецодяг;
- автоматизований контроль руху транспорту.


Автоматизація та модернізація. У сучасних умовах на металургійних підприємствах, зокрема на ПРАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ», впроваджуються:

- 1) автоматизовані системи диспетчеризації транспорту;
- 2) контроль технічного стану шлаковозів;
- 3) модернізація рейкового господарства;
- 4) енергозберігаючі технології;
- 5) системи пилогазоочистки.

Таким чином, транспортування шлаку шлаковозами в ККЦ ПРАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» є складним безперервним технологічним процесом, який забезпечує:

- 1) своєчасне видалення конвертерного шлаку;
- 2) безперервність виплавки сталі;
- 3) езпечну роботу персоналу;
- 4) ефективне використання вторинних ресурсів.

Особливостями процесу є робота в екстремальних температурних умовах, використання спеціалізованого рейкового транспорту, висока



інтенсивність технологічних операцій та значний рівень механізації й автоматизації.

2.2 Технічні параметри платформи шлаковоза

На рис. 2.1 надано креслення шлаковозу ШС-320-4350 виробничого об'єднання Ждановважмаш, який експлуатується в ККЦ ПрАТ-КАМЕТ-СТАЛЬ.

Платформа шлаковоза є основним несучим елементом технологічного транспортного засобу, призначеного для перевезення шлакових чаш у конвертерних та доменних цехах металургійних підприємств. Конструкція платформи забезпечує сприйняття значних статичних і динамічних навантажень, що виникають під час транспортування рідкого шлаку великої маси в умовах високих температур та інтенсивної експлуатації.

Шлаковозна платформа складається з:

- 1) несучої рами;
- 2) візків із колісними парами;
- 3) автозчіпних пристроїв;
- 4) гальмівної системи;
- 5) вузлів кріплення шлакової чаші;
- 6) приводних механізмів;
- 7) буксових вузлів та підвіски.

Конструкція рами виконується зі зварних сталевих профілів підвищеної міцності та жорсткості. Основною вимогою до платформи є забезпечення стійкості при перевезенні чаш зі шлаком, а також рівномірного розподілу навантаження між колісними парами.

Основні технічні характеристики шлаковозу:

- 1) призначення – транспортування шлакових ківшів ємністю 16 м³ або коробів з вогнетривами та коробів з викидами з-під конвертору в шлаковий проліт а також чистки прямику під конвертором;
- 2) характеристика шляху – обмежена пряма ділянка;
- 3) відстань від конвертору, м – $L_{\text{п}} = 76$;
- 4) вантажопідйомність визначає максимальну масу шлакової чаші разом із розплавленим шлаком, що може транспортуватися платформою, тс – 320;
- 5) навантаження на одну вісь є важливим параметром, який визначає умови взаємодії коліс із рейковою колією. Тиск колеса на рейку, тс – 54;

6) швидкість руху шлаковоза обмежується умовами безпечного транспортування рідкого шлаку та станом рейкових шляхів. Швидкість пересування км/год – 3,82;

7) максимальне припустиме прискорення при транспортуванні рідкого шлаку, м/с² – 0,2;

8) швидкість пересування візка, що транспортують розплавлений шлак, повинна регулюватися в діапазоні 1:5. Знижена швидкість потрібна для точної зупинки механізму;

9) тяговий двигун Д806: 32 кВт, 1000 об/хв, паралельного збудження, 220 В;

10) редуктор механізму пересування ВКУ-950, $i=52,32$;

11) гальмо механізму пересування ТКП 300/200 з електромагнітом МП-201, $U=110$ В, $PВ=40\%$;

12) електродвигун підйому скребка АР-43-4, 1,3 кВт, 1290 об/хв;

13) діаметр ходових коліс, м – 1;

14) керування шлаковозом дистанційне з пультів управління;

15) робота приводу на упор: при вигрібанні шлаку, стопорний момент; режими роботи приводу пересування: порожнього шлаковозу, пересування завантаженого шлаковозу, вигріб шлаку, реверс швидкості руху крутного моменту;

16) маса завантаженого шлаковозу $54 \times 8 / 9,81 = 44$ т;

17) момент інерції механізму, зведений до валу двигуна

$$J_{\text{мех}} = 54000 \times 8 / g V^2 / w^2 = 5400 \times 8 / 9,81 \times 1,062 / 104,62 = 4,5 \text{ кг м}^2;$$

18) маса порожнього шлаковозу $54 \times 8 / 9,81 - 320 / 9,81 = 112 / 9,91$ т;

19) для забезпечення допустимого навантаження на рейки та підвищення стійкості платформи використовують чотиривісна конструкція;

20) довжина платформи, м – 12,6;

21) ширина платформи, м – 6;

22) для переміщення шлаковоза електропривод повинен забезпечувати необхідне тягове зусилля: $F_T = G\psi = 44 \times 0,015 = 0,66$ т ($G=44$ т – вага шлаковоза; $\psi=0,015$ – коефіцієнт зчеплення).

Колісна схема з'єднання візка шлаковозу.

Візок шлаковозу – чотири осі, 8 коліс, колеса вільно обертаються на осях, чотири колеса на двох крайніх осях через редуктор з'єднані з приводними двигунами.

Особливості умов експлуатації. Платформи шлаковозів працюють в умовах:

1) високих температур;

2) значної запиленості;

3) ударних навантажень;

4) інтенсивних циклів пуску та гальмування;

5) впливу агресивного середовища.

Тому конструкція платформи повинна забезпечувати:

- 1) підвищену механічну міцність;
- 2) жаростійкість;
- 3) високу надійність вузлів;
- 4) ремонтпридатність;
- 5) стійкість до динамічних перевантажень.

Технічні параметри платформи шлаковоза визначають ефективність, безпечність та надійність роботи технологічного транспорту металургійного виробництва. Правильний вибір конструктивних параметрів і режимів роботи електроприводу дозволяє підвищити продуктивність транспортного процесу, зменшити енергоспоживання та забезпечити стабільну роботу шлаковозів в умовах конвертерного цеху ПрАТ «Камет-Сталь».

2.3 Технічні параметри тягового двигуна та тиристорних перетворювачів

Каталожні дані. Металургійний швидкохідний двигун Д-806:

- 1) номінальна потужність: $P_n=32$ кВт;
- 2) номінальна швидкість обертання: $n_n=1000$ об/мин;
- 3) максимальна швидкість обертання: $n_{max}=2600$ об/мин;
- 4) номінальний якірний струм: $I_n=165$ А;
- 5) номінальна напруга якірного кола: $U_n=220$ В;
- 6) сумарний опір якірного кола та додаткових полюсів:

$$r_{я} + r_{дп} = 0.031 + 0.016 = 0,047 \text{ Ом};$$

- 7) опір обмотки збудження: $r_{пар}=65$ Ом;
- 8) максимальний крутний момент: $M_{max}=823$ Нм;
- 9) кількість активних провідників якоря $N=246$;
- 10) кількість паралельних віток якоря $2a=2$;
- 11) кількість витків полюса паралельной обмотки $w_{пар}=1400$;
- 12) кількість пар полюсів $2p=4$;
- 13) магнітний потік полюса $\Phi=25$ мВб;
- 14) номінальний струм збудження $2,7$ А;
- 15) опір обмотки збудження $r_{в}=65$ Ом;
- 16) момент інерції якоря $J=1$ кг м².

Технічні дані якірного перетворювача:

- номінальна випрямлена напруга $U_n=440$ В;
- максимальна випрямлена напруга $U_n=530$ В;
- номінальний випрямлений струм $I_n=200$ А;
- індуктивність дроселя, що згладжує $L_{сг}=6,46$ мГн.

Технічні дані перетворювача обмотки збудження:

- номінальна випрямлена напруга $U_n=440$ В;
- максимальна випрямлена напруга $U_n=530$ В;
- номінальний випрямлений струм $I_n=3,1$ А;

2.4 Технічні вимоги до електроприводу шлаковозу

Електропривод шлаковозу є одним із найважливіших елементів системи технологічного транспорту металургійного підприємства. Його призначення полягає у забезпеченні надійного переміщення платформ зі шлаковими чашами в умовах конвертерного виробництва. Особливості технологічного процесу визначають підвищені вимоги до тягових, енергетичних, динамічних та експлуатаційних характеристик електроприводу.

В умовах роботи конвертерного цеху ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» електропривод шлаковозу повинен забезпечувати стабільну та безпечну роботу при значних навантаженнях, частих пусках і гальмуваннях, високих температурах та інтенсивних динамічних впливах.

Вимоги до тягових характеристик.

Основною функцією електроприводу є створення необхідного тягового зусилля для переміщення платформи зі шлаком.

Тягове зусилля повинно забезпечувати:

- пуск навантаженого шлаковозу;
- рух на горизонтальних та похилих ділянках;
- подолання сил тертя;
- роботу при несприятливих умовах зчеплення.

Необхідне тягове зусилля визначається:

$$F_T = F_{оп} + F_i + F_d, \quad (2.1)$$

де F_T – тягове зусилля;

$F_{оп}$ – сила основного опору руху;

F_i – сила опору ухилу;

F_d – динамічна складова.

Електропривод повинен забезпечувати:

- високий пусковий момент;
- стійкість роботи при перевантаженнях;
- достатній запас тягового моменту;
- рівномірний розподіл навантаження між приводними колесами.

Вимоги до пускових режимів.

Для шлаковозів характерні часті пуски при великій масі вантажу, тому електропривод повинен:

- забезпечувати плавний пуск;
- обмежувати пускові струми;
- зменшувати ударні механічні навантаження;
- мінімізувати пробуксовку колісних пар.

Пусковий момент двигуна визначається:

Під час пуску необхідно:

- підтримувати достатній коефіцієнт зчеплення;
- виключати перевищення допустимих струмів;

– забезпечувати рівномірне прискорення.

Вимоги до регулювання швидкості.

Електропривод повинен забезпечувати:

- плавне регулювання швидкості;
- стабільний рух при малих швидкостях;
- можливість маневрових режимів;
- підтримання швидкості при зміні навантаження.

Для шлаковозів характерні:

- низькі робочі швидкості;
- часті зміни напрямку руху;
- короткі цикли розгону та гальмування.

Регулювання швидкості повинно здійснюватися без значних втрат енергії та погіршення тягових характеристик.

Вимоги до гальмівних режимів.

Система електроприводу повинна забезпечувати:

- надійне робоче гальмування;
- аварійне гальмування;
- утримання шлаковозу на ухилах;
- безпечну зупинку при перевезенні рідкого шлаку.

Гальмівний момент повинен бути достатнім для швидкої та безпечної зупинки:

$$M_r = \frac{Jd\omega}{dt}, \quad (2.2)$$

де M_r – гальмівний момент;

J – момент інерції;

ω – кутова швидкість.

Для сучасних систем бажаним є:

- електродинамічне гальмування;
- рекуперативне гальмування;
- автоматичне регулювання інтенсивності гальмування.

Вимоги до енергоефективності.

Електропривод шлаковозу повинен забезпечувати:


- мінімальні втрати енергії;
- високий ККД;
- економічні режими роботи;
- зниження споживання електроенергії у перехідних режимах.

Для зменшення втрат необхідно:

- застосовувати плавне регулювання напруги;
- використовувати сучасні системи керування;
- зменшувати тривалість перехідних процесів;
- мінімізувати пробуксовку.

Вимоги до надійності. Електропривод повинен працювати в умовах:

- високих температур;

- 
- запиленості;
 - вібрацій;
 - ударних навантажень;
 - підвищеної вологості.

Тому система повинна мати:

- підвищену механічну міцність;
- термостійку ізоляцію;
- ефективне охолодження;
- захист від перевантажень;
- стійкість до коротких замикань.

Необхідною є також:

- висока ремонтпридатність;
- простота технічного обслуговування;
- можливість швидкої заміни вузлів.

Вимоги до систем автоматичного керування. Система керування повинна забезпечувати:

- автоматичний контроль струмів і напруг;
- обмеження перевантажень;
- контроль пробуксовки;
- синхронізацію багатодвигунного приводу;
- автоматичне регулювання швидкості.

Для багатодвигунного приводу важливо забезпечити рівномірний розподіл моментів між приводними двигунами.

Вимоги до безпеки експлуатації. Електропривод повинен гарантувати:

- безпечний рух шлаковозу;
- виключення самовільного руху;
- аварійне відключення;
- електробезпеку персоналу;
- захист від перегріву.

Особливе значення має:


- стабільність руху при транспортуванні рідкого шлаку;
- мінімізація ривків і ударів;
- точність маневрування.

Вимоги до економічної ефективності. Система електроприводу повинна забезпечувати:

- мінімальні капітальні витрати;
- низькі експлуатаційні витрати;
- швидку окупність модернізації;
- тривалий ресурс роботи.

Для існуючих шлаковозів економічно доцільним є:

- використання тиристорних систем керування;
- модернізація без повної заміни двигунів;
- повторне використання наявної інфраструктури.



Вимоги до перспектив розвитку системи. Сучасний електропривод шлаковозу повинен мати можливість:

- інтеграції з АСУТП;
- підключення систем діагностики;
- автоматичного моніторингу стану;
- подальшої модернізації.

Перспективними напрямками є:

- цифрові системи керування;
- адаптивні алгоритми регулювання;
- системи контролю буксування;
- енергозберігаючі режими роботи.

Таким чином, електропривод шлаковозу повинен відповідати комплексу технічних, енергетичних, динамічних та експлуатаційних вимог, які забезпечують ефективну, надійну та безпечну роботу технологічного транспорту в умовах металургійного виробництва. Особливого значення набуває забезпечення високих тягових характеристик, плавності регулювання, мінімізації пробуксовки та підвищення енергоефективності системи електроприводу.

2.5 Обґрунтування вибору роду струму, типу електроприводу та способу регулювання координат

Аналіз вимог до електроприводу шлаковоза. Шлаковоз конвертерного цеху є відповідальним транспортним механізмом, який здійснює транспортування ківшів із рідким шлаком між технологічними агрегатами та місцями його переробки або складування. Особливістю роботи шлаковоза є важкі умови експлуатації, значні маси переміщуваного вантажу, часті пуски та гальмування, а також робота в умовах високої температури, запиленості та вібрацій.

Основними вимогами до електроприводу шлаковоза є:

- 1) забезпечення високого пускового моменту;
- 2) плавний пуск і гальмування;
- 3) широкий діапазон регулювання швидкості;
- 4) можливість роботи при змінному навантаженні;
- 5) стійкість до перевантажень;
- 6) високі динамічні показники;
- 7) надійність в умовах металургійного виробництва;
- 8) можливість реалізації систем протибуксувального керування.


Робота шлаковоза характеризується значною кількістю перехідних режимів, тому електропривод повинен забезпечувати швидке регулювання моменту та швидкості при мінімальних втратах енергії.

Аналіз можливих варіантів електроприводу.

Для тягового приводу шлаковоза можуть бути використані такі системи електропривода:

Варіант 1 – Нерегульований асинхронний двигун.

Переваги:

- 
- 1) простота конструкції;
 - 2) невисока вартість;
 - 3) висока надійність.

Недоліки:

- 1) значні пускові струми;
- 2) обмежені можливості регулювання швидкості;
- 3) недостатня жорсткість механічних характеристик;
- 4) складність реалізації протибуксувального керування.

Для транспортних механізмів із важкими пусками та необхідністю плавного регулювання швидкості даний варіант є недостатньо ефективним.

Варіант 2 – Частотно-керований асинхронний електропривод.

Переваги:

- 1) високий ККД;
- 2) плавне регулювання швидкості;
- 3) відсутність колекторного вузла.

Недоліки:

- 1) складні алгоритми керування при малих швидкостях;
- 2) зниження перевантажувальної здатності в окремих режимах;
- 3) висока чутливість до умов експлуатації;
- 4) значні витрати на модернізацію існуючого обладнання.

У випадку реконструкції діючого шлаковоза необхідна повна заміна тягових двигунів і системи керування, що потребує значних капітальних вкладень.

Варіант 3 – Система тиристорний випрямляч – двигун постійного струму (ТВ-ДПС).

Переваги:


- 1) високий пусковий момент;
- 2) плавне безступеневе регулювання швидкості;
- 3) широкий діапазон регулювання;
- 4) висока перевантажувальна здатність;
- 5) простота реалізації двоконтурних систем регулювання;
- 6) ефективна робота на малих швидкостях;
- 7) можливість швидкого регулювання електромагнітного моменту;
- 8) можливість реалізації протибуксувальних алгоритмів;
- 9) сумісність з існуючим тяговим обладнанням.

Недоліки:

- 1) наявність колекторно-щіткового вузла;
- 2) необхідність обслуговування двигуна;
- 3) погіршення показників якості електроенергії через тиристорний перетворювач.

Незважаючи на зазначені недоліки, система ТВ-ДПС найкраще відповідає вимогам тягового приводу шлаковоза.

Обґрунтування вибору роду струму.



Для транспортних механізмів із частими пусками та значними перевантаженнями традиційно застосовуються двигуни постійного струму незалежного збудження.

Основними перевагами постійного струму є:

- 1) пропорційність моменту струму якоря;
- 2) висока точність регулювання швидкості;
- 3) жорсткі механічні характеристики;
- 4) можливість отримання максимального моменту вже при нульовій швидкості;
- 5) простота побудови систем автоматичного регулювання.

Електромагнітний момент двигуна визначається залежністю:

$$M = C \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}} \quad (2.3)$$

де M – електромагнітний момент двигуна;

Φ – магнітний потік;

$I_{\text{я}}$ – струм якоря.

Таким чином, зміна струму якоря дозволяє безпосередньо регулювати тягове зусилля шлаковоза.

Вибір способу регулювання швидкості.

Для двигуна постійного струму можливі наступні способи регулювання швидкості:

1. Зміна напруги якоря.
2. Ослаблення магнітного потоку.
3. Реостатне регулювання.

Реостатне регулювання характеризується значними втратами енергії та для сучасних електроприводів практично не використовується.

Ослаблення поля застосовується переважно у зоні швидкостей вище номінальної.

Основним способом регулювання швидкості для шлаковоза є зміна напруги якоря за допомогою тиристорного випрямляча.

Механічна швидкість двигуна визначається залежністю:

$$\omega = \frac{U_{\text{я}} - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{C \cdot \Phi} \quad (2.4)$$

Регулювання напруги якоря дозволяє забезпечити плавну зміну швидкості в широкому діапазоні при збереженні високої жорсткості механічних характеристик.

Вибір структури системи автоматичного керування.

Для шлаковоза доцільно застосувати двоконтурну систему підлеглого регулювання координат:

- внутрішній контур струму;
- зовнішній контур ЕРС (або швидкості).

Переваги такої структури, табл.3.1:

- обмеження пускових струмів;
- швидке формування необхідного моменту;
- захист двигуна від перевантажень;
- покращення динамічних характеристик;
- можливість реалізації протибуксувального керування.

Контур струму забезпечує швидкодію системи, а контур ЕРС підтримує необхідний режим руху шлаковоза.

Порівняльна оцінка варіантів електропривода зведена до табл.3.1.

Таблиця 3.1 – Порівняння можливих систем електропривода

Показник	Асинхронний двигун	Частотний привід	ТВ-ДПС
Пусковий момент	Середній	Високий	Дуже високий
Робота на малих швидкостях	Незадовільна	Добра	Відмінна
Перевантажувальна здатність	Середня	Висока	Дуже висока
Плавність регулювання	Низька	Висока	Висока
Простота модернізації існуючого обладнання	Висока	Низька	Висока
Реалізація протибуксувального захисту	Обмежена	Добра	Відмінна
Вартість реконструкції	Низька	Висока	Середня

Аналіз особливостей роботи шлаковоза в умовах конвертерного цеху ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» показав, що електропривод повинен забезпечувати високий пусковий момент, широкий діапазон регулювання швидкості, значну перевантажувальну здатність та можливість ефективної роботи при частих пусках і гальмуваннях.

Порівняння можливих варіантів електропривода показало, що система «тиристорний випрямляч – двигун постійного струму» найбільш повно задовольняє технологічні вимоги шлаковоза. Вона забезпечує формування максимального моменту вже при нульовій швидкості, має високі динамічні показники, дозволяє реалізувати двоконтурне регулювання струму та ЕРС, а також ефективні алгоритми протибуксувального керування.

Крім того, застосування системи ТВ-ДПС дозволяє використовувати існуючі тягові двигуни постійного струму без значної реконструкції

механічної частини шлаковоза, що істотно знижує витрати на модернізацію.

Таким чином, для умов конвертерного цеху ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» найбільш технічно та економічно обґрунтованим є застосування електропривода за системою «тиристорний випрямляч – двигун постійного струму» з двоконтурною системою автоматичного регулювання координат (струму та ЕРС).

2.6 Розрахунок діаграми навантаження двигуна при пересуванні шлаковозу. Вибір потужності тягових двигунів

Цикл роботи включає: переміщення з вантажем на відстань $S = 76$ м (t_y), пауза $t_0 = 100$ с, переміщення без вантажу (t_y).

Початкові дані: швидкість пересування $V = 1,06$ м/с; швидкість дотягування $V_d = 1,06/5 = 0,2$ м/с; допустиме прискорення $a_{пр} = 0,2$ м/с²; передаточне число редуктора $i = 52,32$; діаметр ходових коліс $D_k = 1,0$ м; ККД передаточного пристрою механізму $\eta = 0,8$; момент опору на валу робочої машини при русі з вантажем $M_{рм1} = 3000$ Нм, без вантажу $M_{рм2} = 2200$ Нм; зведений момент інерції при русі з вантажем $J_1 = 22$ кг м², без вантажу $J_2 = 16,9$ кг м².

Час розгону t_p до основної швидкості пересування з припустимим прискоренням:

$$t_p = \frac{V}{a_{пр}} = \frac{1,06}{0,2} = 5,3 \text{ с.}$$

Час гальмування $t_{г}$ від основної швидкості по швидкості дотягування:

$$t_{г} = \frac{V - V_d}{a_{пр}} = \frac{1,06 - 0,2}{0,2} = 4,3 \text{ с.}$$

Час гальмування t_3 від швидкості дотягування до накладання гальма та зупинки:

$$t_3 = \frac{V_d}{a_{пр}} = \frac{0,2}{0,2} = 1,0 \text{ с.}$$

Шлях, що проходить шлаковоз при розгоні L_p до основної швидкості пересування з припустимим прискоренням:

$$L_p = \frac{V^2}{2 \cdot a_{пр}} = \frac{1,06^2}{2 \cdot 0,2} = 2,8 \text{ м.}$$

Шлях, що проходить шлаковоз при гальмування L_{Γ} від основної швидкості по швидкості дотягування:

$$L_{\Gamma} = \frac{V^2 - V_{\text{д}}^2}{2 \cdot a_{\text{пр}}} = \frac{1,06^2 - 0,2^2}{2 \cdot 0,2} = 2,7 \text{ м}$$

Дотягування шлях $L_{\text{д}} = 0,3 \text{ м}$.

Час дотягування:

$$t_{\text{д}} = \frac{L_{\text{д}}}{V_{\text{д}}} = \frac{0,3}{0,2} = 1,5 \text{ с.}$$

Шлях, що проходить шлаковоз L_3 від швидкості дотягування до накладання гальма та зупинки:

$$L_3 = \frac{V_{\text{д}}^2}{2 \cdot a_{\text{пр}}} = \frac{0,2^2}{2 \cdot 0,2} = 0,1 \text{ м.}$$

Шлях, що проходить шалаковоз з постійною швидкістю:

$$L_V = L_{\text{п}} - L_{\text{р}} - L_{\Gamma} - L_3 = 76 - 2,8 - 2,7 - 0,1 = 70,4 \text{ м.}$$

Час пересування на основний швидкості:

$$t_V = \frac{L_V}{V} = \frac{70,4}{1,06} = 66,4 \text{ с.}$$

Загальний час пересування шлаковозу:

$$t_{\text{п}} = t_{\text{р}} + t_V + t_{\Gamma} + t_3 = 5,3 + 66,4 + 4,3 + 1,0 = 77,0 \text{ с.}$$

Потужність електроприводу шлаковозу визначаємо з умови забезпечення необхідного тягового зусилля для переміщення навантаженої платформи у заданих умовах експлуатації. Під час розрахунку враховуються:

1) маса шлаковоза $m = G \cdot n / g = 54 \cdot 8 / 9,81 = 44 \text{ т}$, де $G = 54 \text{ т}$ – тиск колеса на рейку; $n = 8$ – кількість коліс шлаковозу; g – прискорення вільного падіння;

2) маса шлакової чаші зі шлаком $m_r = G_r / g = 320 / 9,81 = 32 \text{ т}$, $G_r = 320 \text{ т}$ – вантажопід'ємність платформи;

3) маса порожнього шлаковозу $m_0 = m - m_r = 54 \cdot 8 / g - 320 / g = 112 / g \text{ т}$;

4) коефіцієнт опору руху $f = 0,02$;

5) ухил колії $\alpha = 0,005$;

- 6) прискорення під час пуску $0,2 \text{ м/с}^2$;
 7) ККД передачі $\eta=0,85$;
 8) коефіцієнт запасу $1,2$.
 Сила опору руху

$$F_{\text{оп}} = f \cdot m \cdot g = 0,02 \cdot 44000 \cdot 9,81 = 8633 \text{ Н.}$$

Сила опору ухилу

$$F_i = \alpha \cdot m \cdot g = 0,005 \cdot 44000 \cdot 9,81 = 2158 \text{ Н.}$$

Динамічне зусилля

$$F_d = m \cdot a_{\text{пр}} = 44000 \cdot 0,2 = 8800 \text{ Н.}$$

Повне тягове зусилля:

$$F_T = F_{\text{оп}} + F_i + F_d = 19591 \text{ Н.}$$

Середнє квадратичне значення тягового зусилля

$$F_{\text{СКЗ}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^5 F_k^2 t_k}{\sum_{k=1}^5 t_k}} = \sqrt{\frac{(F_{\text{оп}} + F_i + F_d)^2 t_p + (F_{\text{оп}} + F_i)^2 t_V + (F_{\text{оп}} + F_i - F_d)^2 t_{\Gamma} + (F_{\text{оп}} + F_i)^2 t_d + (F_{\text{оп}} + F_i - F_d)^2 t_3}{t_p + t_V + t_{\Gamma} + t_d + t_3}}$$

$$= \sqrt{\frac{19591^2 5,3 + 10491^2 66,4 + 1691^2 4,3 + 10492^2 1,5 + 1691^2 1,0}{5,3 + 66,4 + 4,3 + 1,5 + 1,0}} = 11014 \text{ Н.}$$

Тривалість вмикання

$$\frac{t_{\text{п}}}{t_{\text{п}} + t_0} = \frac{77}{77 + 100} = 0,43$$

Необхідна потужність приводної системи, що зведена від ТВ=25% до ТВ=43%:

$$P_{\text{пр}} = \frac{F_{\text{СКЗ}} V}{\eta} = \frac{11014 \cdot 1,06}{0,85} \sqrt{\frac{25\%}{43\%}} = 76800 \text{ Вт} = 76,8 \text{ кВт.}$$

Для багатодвигунного приводу шлаковоза приймаємо 4 тягових двигуни по 32 кВт. Потужність одного двигуна в нормальному режимі роботи:

$$P_{1н} = \frac{P_{пр}}{4} = 19,2 \text{ кВт.}$$

В нормальному режимі двигуни завантажені на

$$\frac{19,2}{32} = 0,6,$$

тобто 40% потужності знаходяться у гарячому резерві.

В аварійному режимі, при відмові приводу однієї колісної пари, друга пара буде завантажена

$$\frac{76,8}{2 \cdot 32} = 1,2,$$

перевантажена за потужністю на 20 відсотків, що дозволяє завершити цикл транспортування без відключення двигунів від живлячої мережі.

З урахуванням перевантажень і запасу потужності доцільно вибрати двигуни потужністю $P_n=32$ кВт, які в аварійному режимі дозволять завершити цикл вивозу шлаку з під конвертору з перевантаженням 1,2.

2.7 Визначення сталих часу та коефіцієнтів двигуна як об'єкту керування

Конструктивний коефіцієнт k

$$k = \frac{pN}{2\pi a} = 2 \cdot 246/2 \cdot 3,14 \cdot 1 = 78,34$$

де $p=2$ – кількість пар полюсів;

$N=246$ – кількість паралельних провідників в пазу якірної обмотки;

$a=1$ – кількість паралельних віток якоря.

Номінальна кутова швидкість обертання

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30} = \frac{\pi 1000}{30} = 104,7 \frac{\text{рад}}{\text{с}},$$

де $n_n=1000$ об/хв – номінальна швидкість обертання;

Опір обмотки збудження при температурі 20°C

$$r_{в.хол} = \frac{U_{нв}}{I_{нв}} = \frac{220}{2,7} = 81,5 \text{ Ом,}$$

де $U_{\text{НВ}}=220$ В – номінальна напруга живлення обмотки збудження,
 $I_{\text{НВ}}=2,7$ А – номінальний струм живлення обмотки збудження.
Опір обмотки збудження при температурі 90°C

$$r_{\text{в.гор}} = r_{\text{в.хол}}[1 + \alpha(t_{\text{я.гор}} - t_{\text{я.хол}})] = 81,5[1 + 0,004(90^{\circ} - 20^{\circ})] = 104 \text{ Ом},$$

де $\alpha=0,004$ температурний коефіцієнт.
Індуктивність обмотки збудження

$$L_{\text{ОВ}} = \frac{\Phi w_{\text{В}}}{I_{\text{В}}} = \frac{0,125 \cdot 1400}{2,7} = 13 \text{ Гн},$$

де $\Phi=0,025$ Вб – номінальний потік збудження,
 $w_{\text{В}}=1400$ – кількість витків обмотки збудження,
 $I_{\text{В}}=2,7$ А – номінальний струм живлення обмотки збудження.
Опір обмотки якірного кола при температурі 90°C

$$r_{\text{я.гор}} = r_{\text{я.хол}}[1 + \alpha(t_{\text{я.гор}} - t_{\text{я.хол}})] = 0,047[1 + 0,004(90^{\circ} - 20^{\circ})] = 0,06 \text{ Ом},$$

де $r_{\text{я.хол}}=0,047$ Ом – опір обмотки збудження при температурі 20°C .
Противо електрорушійна сила в номінальному режимі

$$E_{\text{Н}} = U_{\text{Н}} - I_{\text{Н}}r_{\text{я.гор}} - U_{\text{щ}} = 220 - 165 \cdot 0,6 - 1,9 = 210,1 \text{ В}.$$

Індуктивність якірного кола

$$L_{\text{а}} = 0,2 \frac{U_{\text{Н}}}{I_{\text{Н}}p\omega_{\text{Н}}} = 0,2 \frac{220}{165 \cdot 2 \cdot 104,7} = 0,00127 \text{ Г}.$$

Добуток конструктивного коефіцієнта двигуна на номінальне значення магнітного потоку

$$k\Phi = C_e = \frac{U_{\text{Н}}}{\omega_{\text{Н}}} - \frac{I_{\text{Н}}r_{\text{я.гор}}}{\omega_{\text{Н}}} = \frac{220}{104,7} - \frac{165 \cdot 0,06}{104,7} = 2,0 \frac{\text{Вс}}{\text{рад}}.$$

Значення сталих коефіцієнтів

$$C_e = C_M = k = 2,0 \frac{\text{Вс}}{\text{рад}}.$$

Номінальне значення крутного моменту

$$M_{\text{Н}} = k\Phi I_{\text{Н}} = 2,0 \cdot 165 = 330 \text{ Нм}.$$

Значення швидкості ідеального холостого ходу

$$\omega_0 = \frac{U_H}{k\Phi} = \frac{220}{2,0} = 110,0 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Стала часу якірного кола

$$T_a = \frac{L_a}{r_{я.гор}} = \frac{0,00127}{0,06} = 0,021 \text{ с.}$$

Момент інерції механізму, зведений до валу двигуна

$$J_{\text{мех}} = 54000 \cdot \frac{8}{g} \cdot \frac{V^2}{\omega_H^2} = \frac{5400 \times 8}{9,81} \cdot \frac{1,06^2}{104,6^2} = 4,5 \text{ кг м}^2;$$

де $m=54000 \cdot 8/g$ кг – маса механізму;

$G=54000$ кг – тиск колеса на рейку,

$n=8$ – кількість опорних коліс,

$V=1,06$ м/с – лінійна швидкість пересування шлаковозу,

$\omega_H=104,7$ 1/с – номінальна кутова швидкість обертання валу двигуна.

Електромеханічна стала часу

$$T_M = J \cdot r_{я.гор} / (k\Phi)^2 = 1 \cdot 0,06 / (2,0)^2 = 0,015 \text{ с.}$$

2.8 Особливості тягового приводу


Зусилля тяги на платформу шлаковозу складається з двох тягучих зусиль ведучих колісних пар. Тягове зусилля кожної пари визначається вагою, що припадає на колісну пару та коефіцієнтом зчеплення. При пробуксовуванні колісної пари її тягове зусилля обнулюється. Тягове зусилля на платформу тоді буде від не буксуючої колісної пари, яке не змінюється і тому швидкість переміщення шлаковозу падає, зростає ковзання тягової пари щодо рейки. Для зниження ковзання необхідно знизити швидкість обертання тягової пари коліс.

Тягове зусилля, що прикладене до платформи шлаковоза, формується як сума тягових зусиль двох ведучих колісних пар. Для кожної колісної пари максимальне реалізоване тягове зусилля обмежується умовами зчеплення і визначається добутком нормальної реакції рейки (частки ваги, що припадає на відповідну вісь) на коефіцієнт зчеплення:

$$F_{t,i} \leq \mu_i N_i, \quad (2.5)$$

де $F_{t,i}$ – тягове зусилля i -ї колісної пари,

N_i – нормальна реакція (частка ваги),



μ_i — коефіцієнт зчеплення, який залежить від стану контакту «колесо–рейка».

Механізм виникнення пробуксовки. У нормальному режимі обидві колісні пари працюють у зоні пружного (адгезійного) контакту, і сумарне тягове зусилля дорівнює:

$$F_{\Sigma} = F_{t,1} + F_{t,2}. \quad (2.6)$$

Однак при нерівномірному розподілі навантаження, зміні умов зчеплення або динамічних збуреннях (пуск, розгін, коливання моменту) одна з колісних пар може досягти граничного значення сили зчеплення. Подальше зростання моменту призводить до переходу в режим ковзання (пробуксовки), що супроводжується різким зменшенням ефективного коефіцієнта зчеплення:

$$m\mu_{\text{ковз}} < m\mu_{\text{зчепл}}. \quad (2.7)$$

У граничному випадку тягове зусилля пробуксовуючої колісної пари практично втрачається:

$$F_{t,slip} \approx 0. \quad (2.8)$$

Наслідки для руху шлаковоза. У цьому випадку сумарне тягове зусилля визначається лише однією (непробуксовуючою) колісною парою:

$$F_{\text{sigma}} \approx F_{t,stable}. \quad (2.9)$$

Це призводить до таких негативних явищ:

- 1) зменшення сумарної тяги, що викликає падіння лінійної швидкості руху;
- 2) перевантаження робочої колісної пари;
- 3) зростання відносного ковзання пробуксовуючої пари;
- 4) інтенсивний знос колеса та рейки;
- 5) можливе виникнення автоколивальних процесів.


Ковзання можна охарактеризувати як:

$$S = \frac{v_{\text{колеса}} - v_{\text{платформи}}}{v_{\text{платформи}}} \quad (2.10)$$

Фізична інтерпретація. При пробуксовці:

- 1) кутова швидкість колісної пари зростає;
- 2) лінійна швидкість платформи не збільшується відповідно;
- 3) відбувається розрив кінематичного зв'язку «колесо–рейка».

Фактично енергія електропривода витрачається не на переміщення, а на втрати в зоні контакту.



Ключовий принцип боротьби з ковзанням. Для відновлення умов зчеплення необхідно повернути систему в область статичного тертя. Це досягається шляхом зменшення кутової швидкості (а отже і електромагнітного моменту) пробуксовуючої колісної пари.

Інженерне формулювання. Таким чином, при виникненні пробуксовки однієї з ведучих колісних пар її тягове зусилля різко зменшується, і сумарна тяга шлаковоза формується лише за рахунок іншої колісної пари. Це призводить до зниження швидкості лінійної руху шлаковозу, зростання ковзання та нерівномірного навантаження приводів. Ефективним способом зменшення ковзання є оперативне зниження швидкості обертання пробуксовуючої колісної пари, що дозволяє відновити умови зчеплення та стабілізувати рух.

2.9 Аналіз особливостей розподілу навантаження на колісні пари

Однією з характерних особливостей експлуатації шлаковозів у конвертерних цехах є нерівномірний розподіл навантаження між передніми та задніми колісними парами платформи. Така нерівномірність виникає внаслідок поздовжньої асиметрії навантаження при транспортуванні одного або двох шлакових ківшів. Зміна положення центра мас вантажу істотно впливає на тягові характеристики, умови зчеплення коліс із рейками, роботу електроприводу та ймовірність виникнення пробуксовки.

Платформа шлаковоза є багато вісною конструкцією з двома приводними колісними парами. Візок шлаковозу має чотири осі, 8 коліс, колеса вільно обертаються на осях, чотири колеса на двох крайніх осях через редуктор з'єднані з приводними двигунами.

При симетричному завантаженні центр ваги вантажу розташовується поблизу геометричного центра платформи, а навантаження між передніми та задніми візками розподіляється приблизно рівномірно.

Однак при:

- 1) перевезенні одного ківшу;
- 2) нерівномірному розташуванні двох ківшів;
- 3) частковому заповненні ківшів, виникає поздовжня асиметрія навантаження.

При транспортуванні одного ківшу центр мас системи зміщується у бік його розташування. Тоді:

- 1) один візок працює з перевантаженням;
- 2) інший - у режимі часткового розвантаження.

Це призводить до:

- 1) перевантаження окремих двигунів;
- 2) нерівномірного спрацювання коліс;
- 3) погіршення стійкості руху;
- 4) підвищення енергоспоживання.



При асиметричному навантаженні різні колісні пари мають:

- 1) різні сили зчеплення;
- 2) різні тягові можливості;
- 3) різні струмові навантаження.

Для багатодвигунного приводу це означає не рівність моментів:

$$M_1 \neq M_2 \neq M_3, \quad (2.11)$$

що погіршує узгодженість роботи приводів.

У двигунах менш навантажених осей:

- 1) швидше виникає пробуксовка;
- 2) збільшується швидкість обертання;
- 3) зростає нерівномірність струмів.

Пробуксовка колісних пар призводить до:

- непродуктивних втрат енергії;
- додаткового нагріву двигунів;
- підвищених струмів;
- збільшення втрат у редукторах.

Втрати потужності. При нерівномірному навантаженні окремі двигуни працюють у перевантаженому режимі, що погіршує енергоефективність системи.

Поздовжня асиметрія викликає:

- 1) нерівномірні динамічні навантаження;
- 2) додаткові коливання рами;
- 3) ударні навантаження в редукторах;
- 4) збільшення зношування рейок і коліс.

Особливо це проявляється:

- 1) під час пуску;
- 2) при проходженні криволінійних ділянок;
- 3) при гальмуванні.


Для покращення режимів роботи шлаковоза необхідно:

- 1) забезпечувати максимально симетричне завантаження;
- 2) використовувати системи автоматичного вирівнювання моментів;
- 3) застосовувати плавне тиристорне регулювання;
- 4) контролювати пробуксовку колісних пар;
- 5) обмежувати пускові струми;
- 6) застосовувати індивідуальне керування двигунами осей.

Перспективним є використання:

- 1) цифрових систем керування;
- 2) адаптивного регулювання моментів;
- 3) автоматичного контролю зчеплення.

Аналіз показує, що поздовжня асиметрія навантаження шлаковоза суттєво впливає на режими роботи електроприводу та тягові характеристики транспортної системи.



При завантаженні одним ковшем або асиметричному розташуванні двох ковшів виникають:

- а) нерівномірний розподіл вертикальних навантажень;
- б) різні умови зчеплення колісних пар;
- в) перевантаження окремих двигунів;
- г) пробуксовка менш навантажених осей;
- д) погіршення енергоефективності.

Найбільш сприятливим режимом є симетричне розташування двох ковшів, при якому забезпечується рівномірний розподіл навантаження між передніми та задніми колісними парами.

Для підвищення ефективності роботи шлаковозів конвертерного цеху ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» доцільно застосовувати системи плавного регулювання тягових моментів та автоматичного контролю пробуксовки колісних пар.

Для кількісного врахування повздожної несиметрії навантаження розв'яжемо задачу: балка спирається на дві вільні опори А і В та навантажена двома різними розподіленими масами. Розрахувати реакції вільних опор R_A и R_B .

Щоб розрахувати реакції вільних опор балки, навантаженої двома розподіленими навантаженнями, потрібно виконати такі кроки загального алгоритму розрахунку:

1. Визначаємо тип навантаження.

Маємо наступну схему, рис.2.2:

- балка довжиною L , з опорами у точках А та В.
- два розподілені навантаження: q_1 - на ділянці від x_1 до x_2 ; q_2 - на ділянці від x_3 до x_4 (де q_1 і q_2 – інтенсивності, в Н/м).

2. Знаходимо еквівалентні зосереджені сили.

Для кожного розподіленого навантаження:

- рівномірне навантаження q на довжині a замінюється силою $Q=q \cdot a$, яка прикладена в центрі тяжкості (середині ділянки).

3. Складаємо рівняння рівноваги.

Платформа статично визначена, тому можемо застосувати умови рівноваги:

- $\sum F_y=0$: сума вертикальних сил дорівнює нулю.
- $\sum M_A=0$: сума моментів щодо однієї з опор (наприклад, А) дорівнює нулю.

Позначаємо:

- R_A – реакція в опорі А.
- R_B – реакція в опорі В.
- Q_1, Q_2 – еквівалентні сили від розподілених навантажень.
- a_1, a_2 — відстані від А до точки докладання сил Q_1, Q_2 відповідно

$$a_1 = (x_1 + x_2)/2; a_2 = (x_3 + x_4)/2$$

4. Вирішити систему рівнянь.

Рівняння 1 (по вертикалі):

$$R_A + R_B = Q_1 + Q_2 \quad (2.12)$$

Рівняння 2 (момент щодо А):

$$-R_B L = Q_1 a_1 + Q_2 a_2 \quad (2.13)$$

Вирішивши цю систему, знайдемо R_A та R_B :

$$-R_A = Q_1 (1 - a_1 / L) + Q_2 (1 - a_2 L) \quad (2.14)$$

$$R_B = \frac{Q_1 a_1 + Q_2 a_2}{L} \quad (2.15)$$

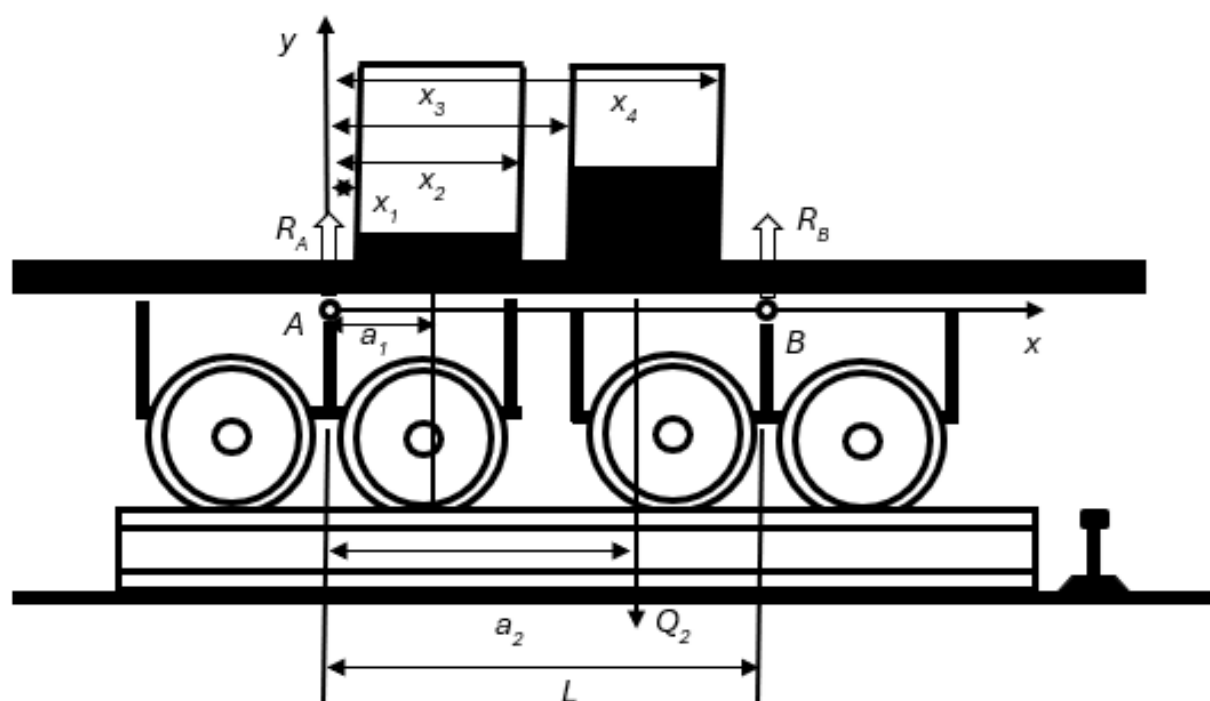


Рисунок 2.2 – Схема визначення повздовжнього навантаження

Коефіцієнт тертя між залізничним колесом та рейкою залежить від безлічі факторів, включаючи:

- стан поверхні (суха, мокра, вкрита льодом, листям тощо),
- матеріал колеса та рейки,
- наявність мастила (масло, пісок тощо),
- тиск та швидкість руху.

Приблизні значення коефіцієнта тертя зведену до табл.2.2.

Таблиця 2.2 – Значення коефіцієнту тертя

Умови	Коефіцієнт тертя
Сухий контакт (звичайні умови)	0.3 – 0.4
Мокра рейка	0.1 – 0.2
Лід чи листя на рейці	0.01 – 0.05
У разі використання піску (збільшення зчеплення)	до 0.5

У звичайних умовах без забруднень коефіцієнт тертя для сталевого колеса зі сталеву рейкою становить близько 0.3. Це значення досить низьке порівняно, наприклад, з автомобільними шинами та асфальтом, що пояснює довгий гальмівний шлях у шлаковозів.

Пробуксовування залізничних коліс при прискоренні або уповільненні відбувається через порушення зчеплення між колесом і рейкою. Це може виникати як при розгоні (ковзання, буксування), і при гальмуванні (юз, ковзання). Ось основні технічні та зовнішні причини:

Технічні причини:

1) надмірне тягове зусилля. При прискоренні тягові двигуни можуть передавати на колеса занадто велике зусилля, що перевищує зчеплення колеса з колією. Тоді колесо починає буксувати;

2) різке гальмування. При гальмуванні гальма можуть різко блокувати колеса, особливо при недостатньому зчепленні. Тоді колеса "стають" і починають ковзати рейками;

3) нерівномірне навантаження на колеса. Через неправильне балансування складу або технічні несправності колісні пари можуть бути навантажені по-різному, що знижує зчеплення окремих осей;

4) знос коліс та рейок. Згладжені, зношені поверхні зменшують силу тертя та підвищують ризик прослизання.

Зовнішні умови:

1) вологість, лід, сніг, опале листя. Все це знижує коефіцієнт тертя між колесом та рейкою, особливо восени (т.зв. "слизькі рейки");

2) маслянисті чи піщані забруднення на рейках. Іноді через виток змащення, забруднень шляхів зчеплення сильно погіршується.

2.10 Умови втрати зчеплення колісні пари з рейкою

Умова втрати зчеплення колеса з рейкою виникає тоді, коли сила тяги чи гальмування перевищує максимально можливу силу зчеплення між колесом та рейкою.

Максимальна сила зчеплення визначається законом сухого тертя:

$$F_{зч} = \mu N, \quad (2.16)$$

де $F_{зч}$ – максимальна сила зчеплення колеса з рейкою;

μ - коефіцієнт зчеплення (зазвичай 0.15-0.35 для сталевих коліс і рейок);

N - нормальна сила (навантаження колеса на рейку).

Умова збереження зчеплення. Зчеплення зберігається, якщо виконується умова

$$F_{\text{тяги}} \leq F_{\text{зч}}, \quad (2.17)$$

де $F_{\text{тяги}}$ - сила тяги або гальмування.

Умова втрати зчеплення (боксування чи юз). Втрата зчеплення відбувається, коли

$$F_{\text{тяги}} > \mu N. \quad (2.18)$$

У цьому випадку при тязі виникає боксування коліс (колесо прослизає); при гальмуванні виникає юз (ковзання колеса по рейці).

В інженерній формі (через коефіцієнт використання зчеплення). Іноді використовують коефіцієнт використання зчеплення:

$$\varphi = F_{\text{тяги}}/N. \quad (2.19)$$

Тоді умова: нормальна робота: $\varphi \leq \mu$; втрата зчеплення: $\varphi > \mu$.

Типові значення коефіцієнта зчеплення колесо-рейка надані у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Типові значення коефіцієнта зчеплення колесо-рейка

Умови	μ_{max}
Суха рейка	0.25–0.35
Волога	0.10–0.20
Забруднена	0.05–0.10

Для електроприводів тяги шлаковозу ця умова визначає:

- обмеження максимально допустимий тяговий момент двигуна;
- необхідність протибуксувальної системи;
- оптимальне розподілення навантаження на осі.

2.11 Рівняння лінійного руху шлаковозу

Залежність зчеплення від ковзання. Коефіцієнт зчеплення має характерну нелінійну залежність, рис. 2.3: спочатку росте досягає максимуму потім зменшується.

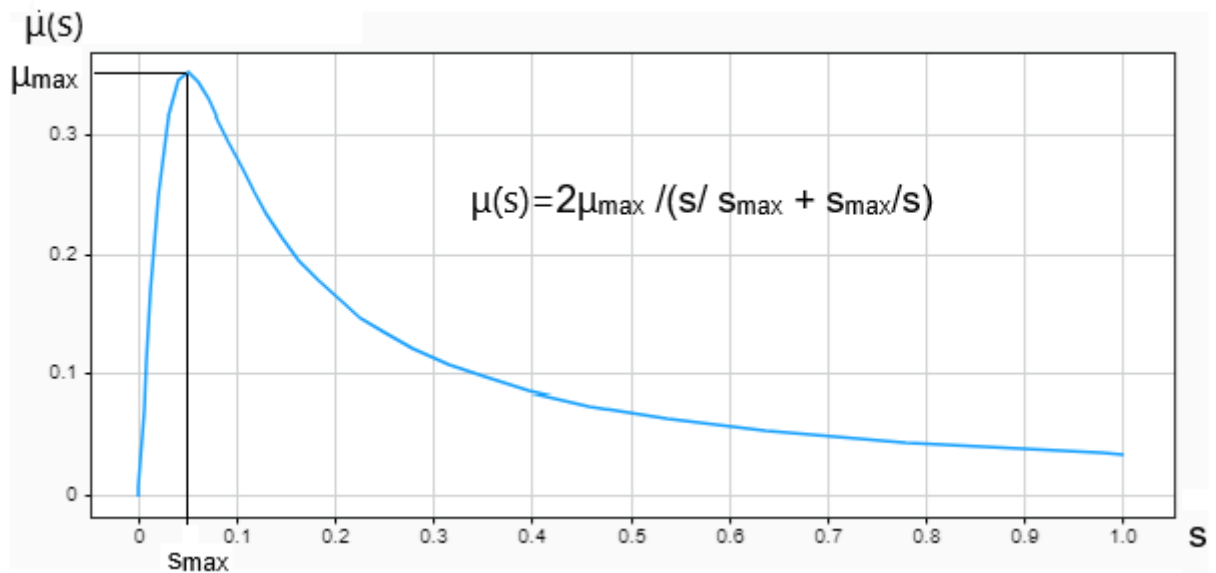


Рисунок 2.3 – Залежність коефіцієнту зчеплення μ від ковзання s

Типова апроксимація:

$$\mu(s) = \frac{2\mu_{\max}}{\frac{s}{s_{\max}} + \frac{s_{\max}}{s}} \quad (2.20)$$

де μ_{\max} – максимальний коефіцієнт зчеплення;

s_{\max} – ковзання, при якому спостерігається μ_{\max} .

Динамічна модель колісної пари. Рівняння обертання колісної пари:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{дв}} - F_{\text{зч}} R, \quad (2.21)$$

де J – момент інерції колісної пари,

$M_{\text{дв}}$ – момент тягового двигуна,

R – радіус колеса колісної пари.

Зрівняння руху платформи шлаковозу маємо:

$$M \frac{dV}{dt} = F_{\text{зч}} - F_{\text{оп}} \quad (2.22)$$

де M – маса поїзда,

$F_{\text{оп}}$ – опір руху.

Повна нелінійна модель боксування. Система рівнянь:

- обертання колеса:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{дв}} - \mu(s) GR, \quad (2.23)$$

- лінійний рух шлаковозу

$$M \frac{dv}{dt} = \mu(s)G - F_{оп} \quad (2.24)$$

– коефіцієнт ковзання

$$s = (\omega R - v)/v. \quad (2.25)$$

Функціональна схема моделі шлаковозу: крутний момент тягового двигуна $\downarrow M_{дв} \rightleftharpoons$ динаміка колісної пари $\downarrow J d\omega/dt \rightleftharpoons$ ковзання $s \rightleftharpoons \downarrow \mu(s)$ – коефіцієнт зчеплення $\rightleftharpoons \downarrow$ Сила зчеплення $F_{зч} \rightleftharpoons \downarrow$ Динаміка руху платформи шлаковозу $M \downarrow \rightleftharpoons dv/dt \downarrow$ лінійна швидкість пересування платформи шлаковозу $v \downarrow$.

2.12 Розрахунок налаштувань регуляторів струму та електрорушійної сили системи управління приводом шлаковозу

Шлаковоз обладнаний чотири-двигуним приводом – по два двигуна на кожен колісну пару. Схема з'єднання якорів двигунів та обмоток збудження надана на рис. 2.4. Для отримання однаковим механічних характеристик якорі та обмотки збудження з'єднанні послідовно та живляться від одного тиристорного перетворювача, табл.2.4.

Таблиця 2.4 – Технічна характеристика перетворювача КТЕ-320/460

Параметр	Одиниця виміру	Значення
Номінальний випрямлений струм	А	320
Кратність перевантаження по струму (на протязі 10 мс)		2,25
Номінальна випрямлена напруга	В	460
Частота живлячої мережі	Гц	50
Коливання живлячої мережі, не більше	%	+10 -15
Номінальна випрямлена напруга тиристорного збудника	В	220

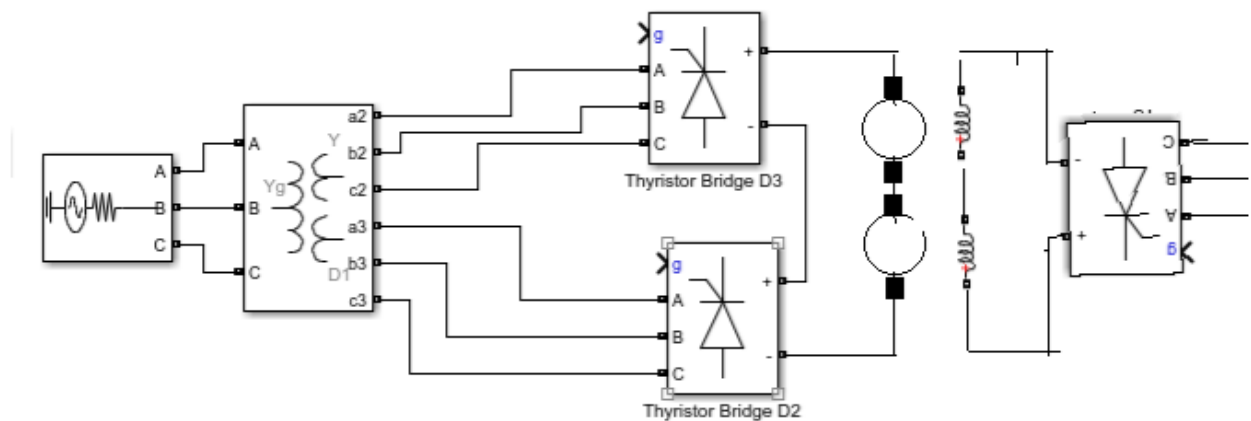


Рисунок 2.4 – Електрична схема силових кіл приводу колісної пари шлаковозу

При живленні від тиристорного перетворювача по якорю двигуна протікають як постійна так і змінна складові, величини яких залежать від кута керування та параметрів навантаження. Це призводить до підвищення нагріву двигуна, погіршенню умов комутації та зниженню жорсткості механічних характеристик з появою зони переривчатих струмів.

Вмикання сглажуального дроселя в якрне коло дозволяє обмежити величину змінних складових, що призводить до покращення використання двигуна, його комутацію та електромеханічні характеристики.

Потрібна величина індуктивності контуру якрного струму по умовам обмеження зони переривчатих струмів

$$L_{KH1} = \frac{1}{\omega_M} K_{ГРmax} \frac{U_{e\phi}}{K_{u2} I_{dГР}} = \frac{1}{314} 0,09356 \frac{220}{0,428 \cdot 16,5} = 0,0095 \text{ Гн},$$

де $K_{ГРmax} = 1 - \frac{\pi}{6} \text{ctg} \frac{\pi}{6} = 1 - \frac{3,14}{6} \text{ctg} \frac{3,14}{6} = 0,09356$; – коефіцієнт межового струму,

$I_{dГР} = (0,1 - 0,15) I_H = 0,1 \cdot 165 = 16,5 \text{ А}$ – значення початкового безперервного струму.

Індуктивність сглазувального дроселя по умовам обмеження зони переривчатих струмів

$$L_{ДР1} = L_{KH1} - 2L_{P\phi} - 2 \cdot L_{ЯДВ} = 0,0095 - 2 \cdot 0,00025 - 2 \cdot 0,00127 = 0,00646 \text{ Гн},$$

де $L_{P\phi} = 0,00025 \text{ Гн}$ – індуктивність обмоток розсіювання трансформатора.

Необхідна величина індуктивності сглазувального дроселя з умов обмеження пульсацій випрямленого струму

$$L_{KH2} = \frac{E_{d1max} 100}{m_B \omega_M P_{1\%} I_d} = \frac{124,6 \cdot 100}{6 \cdot 314 \cdot 15 \cdot 134} = 0,0033 \text{ Гн},$$

де E_{d1max} – діюче значення першої гармоніки пульсуючої випрямленої напруги при куті керування $\alpha=90^\circ$

$$E_{d1max} = \frac{U_{2E\Phi} \sqrt{2} m_B}{k_{u2} (m_B^2 - 1)} = \frac{220 \sqrt{2} 6}{0,428 (6^2 - 1)} = 124,6 \text{ В}.$$

$P_{1\%} = 15\%$ – припустиме діюче значення першої гармоніки випрямленого струму у відсотках.

Індуктивність сглажувального дроселя по умовам обмеження пульсацій випрямленого струму

$$L_{DR2} = L_{KH2} - 2L_{P\Phi} - 2 \cdot L_{ЯДВ} = 0,0033 - 2 \cdot 0,00025 - 2 \cdot 0,00127 = 0,0026 \text{ Гн},$$

Тому, що $L_{DR1} > L_{DR2}$, то обираємо сглажувальний дросель по умовам обмеження зони переривчатих струмів

$$L_{DR} = L_{DR1} = 0,00646 \text{ Гн},$$

В якірне силове коло обираємо сглажувальний реактор ФРОС-65/0,5 УЗ, параметри якого приведені у табл.2.5.

Таблиця 2.5 – Технічна характеристика сглажувального реактору ФРОС-65/0,5 УЗ.

Параметр	Одиниця виміру	Значення
Індуктивність L_{DR2}	Гн	$3 \cdot 10^{-3}$
Активний опір	Ом	$4,5 \cdot 10^{-3}$
Номинальний струм	А	320

2.13 Розрахунок параметрів тиристорного перетворювача

Середня випрямлена напруга при куті керування $\alpha=0^\circ$

$$E_{d0} = \frac{U_{2\Phi}}{k_{u2}} = \frac{220}{0,428} = 514 \text{ В}.$$

Коефіцієнт максимального значення підсилення перетворювача

$$K_{ТП} = \frac{\pi \cdot K_{y0} \cdot E_{d0}}{2U_{оп\ max}} = \frac{\pi \cdot 0,555 \cdot 514}{10} = 76,66,$$

де $k_{y0} = 0,475$ – коефіцієнт передачі керуючого органа на вході СІФУ,
 $2U_{оп\ max} = 10$ В – амплітуда опорної напруги СІФУ.
Стала часу тиристорного перетворювача

$$T_{ТП} = \frac{0,5}{m_B f_M} = \frac{0,5}{6 \cdot 50} = 0,00167 \text{ с.}$$

Коефіцієнт передачі пристрою узгодження на вході СІФУ перетворювача

$$K_{y0} = \frac{\alpha_{поч} - \alpha_{мін}}{\alpha_0} = \frac{110 - 10}{180} = 0,555$$

Опір силового кола перетворювача

$$R_{ТП} = 2R_{рф} + R_K + R_{др} = 2 \cdot 0,013 + 0,075 + 0,0045 = 0,1055 \text{ Ом,}$$

де $R_K = \frac{m_B \cdot x_{тр,ф}}{2\pi} = \frac{6 \cdot 0,0785}{2\pi} = 0,075 \text{ Ом}$ – опір, що вноситься за рахунок анодних струмів.

Індуктивність силового кола перетворювача

$$L_{ТП} = 2L_{рф} + L_{др} = 2 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} + 0,001 = 0,0015 \text{ мГн.}$$

Максимально припустимий струм перетворювача

$$I_{dmax} = 2,25I_{дн} = 2,25 \cdot 320 = 720 \text{ А.}$$

Обираємо максимально припустимий струм електроприводу

$$I_{ЕПmax} = I_{двmax} = 670 \text{ А.}$$

2.14 Розрахунок параметрів силового кола

Силове коло досліджуваного електропривода складається з: двох якірних кіл електричних двигунів, струмообмежувального та сгладжувального реакторів і тиристорного перетворювача.

Для струмообмежуючого та сгладжувального реакторів визначені необхідні значення індуктивності, активні та реактивні опори.

Для тиристорного перетворювача визначені параметри силового кола: середні випрямлені значення ЕРС при куті керування рівним нулю, індуктивність і активний опір тиристорного перетворювача.

Для тягового двигуна визначені: опір якірних обмоток в гарячому стані, добуток конструктивного коефіцієнту на номінальне значення магнітного потоку, номінальний крутний момент електродвигуна.

Індуктивність якірного кола

$$L_{\text{ЯК}} = 2L_{\text{ДВ}} + L_{\text{ТП}} = 2 \cdot 0,0038 + 0,0015 = 0,0091 \text{ Гн.}$$

Опір кола двигуна

$$R_{\text{КДВ}} = 2R_{\text{ДВгор}} + 0,1 \cdot 2R_{\text{ДВгор}} = 2 \cdot 0,07452 + 0,1 \cdot 2 \cdot 0,07452 = 0,164 \text{ Ом.}$$

Опір якірного кола

$$R_{\text{ЯК}} = R_{\text{КДВ}} + R_{\text{ТП}} = 0,164 + 0,1055 = 0,27 \text{ Ом.}$$

Електромагнітна стала якірного кола

$$T_{\text{ЯК}} = \frac{L_{\text{ЯК}}}{R_{\text{ЯК}}} = \frac{0,0091}{0,27} = 0,034 \text{ с.}$$

2.15 Параметри механічної системи шлаковозу

Мінімальне значення зведеного моменту інерції порожнього шлаковозу $J_{\text{min}} = 3,3 \text{ кгм}^2$. Максимальне значення зведеного моменту інерції завантаженого шлаковозу $J_{\text{max}} = 4,5 \text{ кгм}^2$.

Мінімальне значення моменту опору порожнього шлаковозу $M_{\text{Сmin}} = 121,76 \text{ Нм}$. Максимальне значення моменту опору завантаженого шлаковозу $M_{\text{Сmax}} = 448,55 \text{ Нм}$.

Електромеханічна стала, мінімальне значення

$$T_{\text{ЕМmin}} = J_{\text{min}} \frac{R_{\text{ЯК}}}{(\text{кФ})^2} = 3,3 \frac{0,27}{(2)^2} = 0,22 \text{ с,}$$

максимальне значення

$$T_{\text{ЕМmax}} = J_{\text{max}} \frac{R_{\text{ЯК}}}{(\text{кФ})^2} = 4,5 \frac{0,27}{(2)^2} = 0,31 \text{ с,}$$

2.16 Передатна функція тиристорного перетворювача

Динамічна передатна функція тиристорного випрямляча, який живить якір двигуна постійного струму, визначається з урахуванням інерційності системи керування випрямляча.

У більшості задач електропривода тиристорний перетворювач описують як аперіодичну ланку першого порядку:

$$W_{\text{ТП}}(s) = \frac{K_{\text{ТП}}}{sp+1}, \quad (2.26)$$

де $K_{\text{ТП}}$ – коефіцієнт підсилення тиристорного перетворювача;
 $T_{\text{ТП}}$ – еквівалентна стала часу тиристорного випрямляча;
 s – оператор Лапласа.

Графічно передатна функція має вигляд:

$$W_{\text{ТП}}(p) = \frac{K_{\text{ТП}}}{T_{\text{ТП}}s+1}. \quad (2.27)$$

Коефіцієнт підсилення визначається як

$$K_{\text{ТП}} = \frac{U_d}{U_{\text{кер}}}, \quad (2.28)$$

де U_d – випрямлена напруга на якорі двигуна;
 $U_{\text{кер}}$ – керуюча напруга системи імпульсно-фазового керування.

Для трифазного мостового тиристорного випрямляча:

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha, \quad (2.29)$$

де U_{d0} – максимальна випрямлена напруга;
 α – кут керування тиристорів.

Тому при лінеаризації поблизу робочої точки:

$$K_{\text{ТП}} = \frac{dU_d}{d\alpha} = -U_{d0} \sin \alpha_0. \quad (2.30)$$

Стала часу тиристорного перетворювача зазвичай приймається:

$$T_{\text{ТП}} \approx \frac{1}{2f_c},$$

або для мережі 50 Гц:

$$T_{\text{ТП}} \approx 0.003 \div 0.01 \text{ с.}$$

У спрощених розрахунках електропривода часто використовують:

$$T_{\text{ТП}} \approx 0.005 \text{ с.}$$

Якщо враховувати транспортне запізнювання системи керування, тоді модель має вигляд:

$$W_{\text{ТП}}(s) = \frac{K_{\text{ТП}}e^{-s\tau}}{sp+1}. \quad (2.32)$$

Після апроксимації запізнювання аперіодичною ланкою:



$$e^{-p\tau} \approx \frac{1}{1+s\tau}, \quad (2.33)$$

одержимо:

$$W_{\text{ТП}}(s) \approx \frac{K_{\text{ТП}}}{(T_{\text{ТП}}s+1)(\tau s+1)}. \quad (2.34)$$

Тиристорний перетворювач завдяки наявності СІФУ є ланкою з транспортним запізнюванням і коефіцієнтом передачі $K_{\text{ТП}}$. Ланка з транспортним запізнюванням має передатну функцію

$$W(s) = e^{-s\tau}, \quad (2.35)$$

де τ – час запізнювання, тобто час дискретизації СІФУ.

Для подання її у вигляді аперіодичної ланки використовують розкладання експоненти у ряд Тейлора:

$$e^{-s\tau} = 1 - s\tau + \frac{(s\tau)^2}{2!} - \frac{(s\tau)^3}{3!} + \dots \quad (2.36)$$

Для інженерних розрахунків часто застосовують апроксимацію першого порядку. Запишемо передатну функцію аперіодичної ланки:

$$W_a(s) = \frac{1}{1+s\tau}. \quad (2.37)$$

Розкладемо її у ряд:

$$\frac{1}{1+s\tau} = 1 - s\tau + (s\tau)^2 - (s\tau)^3 + \dots \quad (2.38)$$

Порівнюючи ряди, бачимо, що при малих значеннях $p\tau$

$$e^{-p\tau} \approx \frac{1}{1+s\tau}. \quad (2.39)$$

Отже, передатна функція ланки з транспортним запізнюванням у вигляді аперіодичної ланки першого порядку:

$$W(s) \approx \frac{1}{1+s\tau}, \quad (2.40)$$

де стала часу аперіодичної ланки дорівнює часу запізнювання τ .

Для наочності залежності можна використати графічний блок:

$$W(s) = \frac{1}{1+s\tau}. \quad (2.41)$$

Більш точна апроксимація другого порядку:

$$e^{-s\tau} \approx \frac{1 - \frac{s\tau}{2}}{1 + \frac{s\tau}{2}} \quad (2.42)$$

що відповідає апроксимації Паде першого порядку.

В подальшому приймаємо передатну функцію тиристорного перетворювача у вигляді аперіодичної ланки

$$W_{\text{ТП}}(s) = \frac{K_{\text{ТП}}}{T_{\text{ТП}}s + 1}. \quad (2.43)$$

2.17 Аналіз відповідності електромеханічних характеристик електропривода заданим експлуатаційним вимогам

Задана область існування електромеханічних характеристик електропривода (замкнутої системи) обмежена значенням $\omega = \omega_{\text{max}}$ і залежністю $\pm I_{\text{доп}}(\omega)$, повинна повністю розташовуватись в середині існування характеристик системи перетворювач – двигун. Остання в свою чергу обмежена межовими характеристиками, що відповідають роботі провідної групи в режимі межового інвертування, а в випрямленому режимі при мінімальному куті керування. Виконання цієї умови вимагає значного запасу по напрузі та потужності перетворювача і силового трансформатору. Такий підхід здійснюється для електроприводів, які реалізують межові динамічні можливості двигунів то яких не відносяться приводи з поміряною швидкістю шлаковозів.

Для приводів шлаковозів мусить виконуватися умова: при зниженій напрузі мережі та роботі перетворювача у випрямленому режимі з мінімальним кутом керування α_{min} електромеханічна характеристика розімкнутої системи мусить бути розташована вище точки з координатами $\omega = \omega_{\text{max}}$ і $I = I_{\text{ном}}$.

Мінімальний кут керування перетворювачем

$$\alpha_{\text{min}} = \arccos \frac{C_E \omega_{\text{max}} + I_{\text{ДВН}} R_{\text{ЯК}}}{E_{d0}} = \arccos \frac{2 \cdot 2,43 \cdot 86,35 + 165 \cdot 0,27}{514} = 27,5^\circ.$$

Приймаємо $\alpha_{\text{min}} = 10^\circ$ з врахуванням можливого знижки напруги мережі.

Розраховуємо електромеханічні характеристики розімкнутої системи при $\alpha_{\text{min}} = 10^\circ$ у режимі випрямлення:

$$\omega(I_{\text{Я}}) = \frac{1}{c} (E_{d0} \cos \alpha_{\text{min}} - R_{\text{ЯК}} I_{\text{Я}}) = \frac{1}{2} (514 \cdot \cos 10^\circ - 0,27 \cdot I_{\text{Я}}), \frac{1}{c}$$

Результати розрахунку електромеханічної характеристики при $\alpha_{\text{min}} = 10^\circ$ зведені до табл.2.5. Характеристики побудовані на рис.2.5.

Таблиця 2.5 – Розрахункові параметри електромеханічної характеристики при $\alpha_{min} = 10^0$.

$\omega, 1/c$	102	96,37	80,79
$I_{я}, A$	0	165	402

Електромеханічні характеристики безпечного інвертування при роботі перетворювача в інверторному режимі

$$\begin{aligned} \omega(I_{я}) &= \frac{1}{c} (E_{d0} \cos \delta - (R_{ТП} - R_{КДВ}) I_{я}) \\ &= \frac{1}{2} (514 \cdot \cos 6^0 - (0,1055 - 0,164) \cdot I_{я}), \frac{1}{c} \end{aligned}$$

де δ – кут запасу при інвертуванні, прийнято $\delta = 6^0$.

Розрахунок при $I_{я} \leq 0$ електромеханічної характеристики безпечного інвертування при роботі перетворювача в інверторному режимі зведено до табл.2.6 і побудовані на рис.2.5.

Таблиця 2.6 – Розрахункові параметри електромеханічної характеристики при $\delta = 6^0$.

$\omega, 1/c$	105,5	106,8	110
$I_{я}, A$	0	-165	402

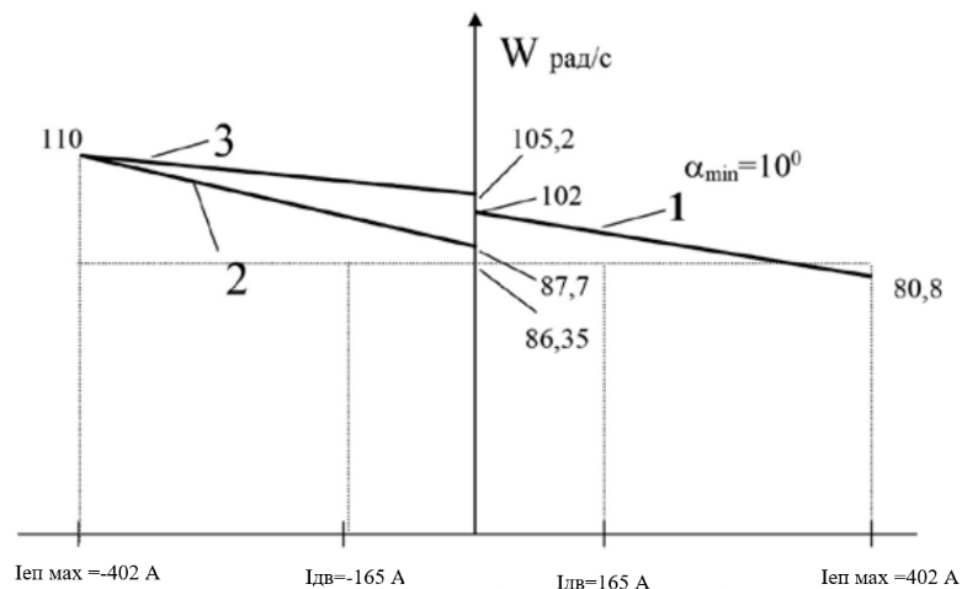


Рисунок 2.5 – Відповідності електромеханічних характеристик

Значення максимального кута керування

$$\alpha_{max} = \arccos \left(\frac{2R_{ТП} I_{EPmax}}{E_{d0}} - \cos \delta \right) = 146^0.$$

Для знайденого α_{max} розраховуємо та будуємо електромеханічну характеристику розімкнутої системи електроприводу при роботі в інверторному режимі

$$\omega(I_{Я}) = \frac{1}{c} (-E_{d0} \cos \alpha_{max} - R_{ЯК} I_{Я}) = \frac{1}{2} (-514 \cdot \cos 146^{\circ} - 0,27 \cdot I_{Я}), \frac{1}{c}$$

До табл.2.7 зведені результати розрахунку електромеханічних характеристик.

Таблиця 2.7 – Розрахункові параметри електромеханічної характеристики при $\alpha_{max} = 146^{\circ}$.

$\omega, 1/c$	87,7	95,2	110
$I_{Я}, A$	0	-165	402

2.18 Розрахунок електромеханічних характеристик розімкнутої системи перетворювач-двигун

Кутова швидкість обертання валу двигуна в режимі безперервного струму

$$\omega = \frac{E_d - I_d R_{ЯК} - \Delta U_B}{c}, \quad (2.44)$$

де $E_d = E_{d0} \cos(\alpha)$ – середнє значення випрямленої ЕРС;

α – кут вмикання тиристора, який відраховується від точки природної комутації;

ΔU_B – прямий спад напруги на відчиненому тиристорі.

Для отримання відповідної швидкості обертання валу двигуна зробимо перетворювання та одержимо вираз для знаходження кута керування у функції швидкості:

$$\alpha(\omega) = \arccos \left(\frac{\omega c - I_d R_{ЯК} - \Delta U_B}{E_{d0}} \right). \quad (2.45)$$

Побудову електромеханічних характеристик в зоні безперервних струмів робимо відповідно до рівняння:

$$\omega(I) = \frac{E_{d0} \cos(\alpha) - I_d R_{ЯК} - \Delta U_B}{c}. \quad (2.46)$$

Характеристики мають лінійний характер, але в зоні малих навантажень з'являється зона переривчатих струмів, вона тим більше, чим більше кут керування α . Появи зони переривчатих струмів обумовлена тим що з'являються проміжки часу де миттєві значення випрямленої напруги перетворювача становляться меншими зустрічно спрямованої ЕРС якоря двигуна. Якірний ток на цих проміжках часу мусить

змінити свій напрям на протилежний. Но вентилялі мають односторонню провідність, тому у ці проміжки часу струм якірного кола обнуляється. При великих навантаженнях струм якоря двигуна не спадає до нуля та становиться безперервним. При великих навантаженнях запас електромагнітної енергії в якірному колі має значну величину, якої достатньо щоб підтримати струм у колі. Перехід від режиму безперервного струму до переривчатого відповідає режиму початково-безперервного струму який є граничним. Величина граничного струму залежить від кута α і параметрів схеми.

Проаналізуємо характеристики приводу в зону переривчатих струмів. Визначимо кут регулювання, який відраховується від початку додатної половини синусоїди фазної ЕРС:

$$\theta_0(\alpha) = \frac{180}{\pi} \left(\alpha(\omega) + \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m_m} \right) \right). \quad (2.47)$$

Значення ЕРС у відносних одиницях в залежності від кута керування α в зоні преривчатих струмів:

$$e(\alpha) = \cos \left(\theta \frac{\pi}{180} \right) \frac{\sin \left((\theta_0(\alpha) - \theta) \frac{\pi}{180} \right) - \sin \left((\theta_0(\alpha) + \lambda - \theta) \frac{\pi}{180} \right) e^{\lambda \frac{\pi}{180} \cos \left(\theta \frac{\pi}{180} \right)}}{1 - e^{\lambda \frac{\pi}{180} \cos \left(\theta \frac{\pi}{180} \right)}}, \quad (2.48)$$

де $\lambda = \frac{2 \cdot 180}{m_m} = 60^\circ$ – кут провідності тиристорів;

θ – кут відставання струму від напруги.

Кут θ обумовлений присутністю індуктивності в якірному колі. Кут θ визначається параметрами якірного кола:

$$\theta = \arctg \left(\frac{\omega_0 L_{ЯК}}{R_{ЯК}} \right) \frac{180}{\pi}. \quad (2.49)$$

Значення струму у відносних одиницях у зоні переривчатих струмів:

$$i(\alpha) = \frac{m_m}{2\pi} \left(\cos \left(\theta_0(\alpha) \frac{\pi}{180} \right) - \cos \left((\theta_0(\alpha) + \lambda) \frac{\pi}{180} \right) - \frac{\lambda \pi}{180} e_{гр}(\alpha) \right). \quad (2.50)$$

Характеристику режиму переривчатого струму можливо побудувати в абсолютних одиницях $\omega = f(I)$ по рівнянню:

$$\omega(\alpha) = e(\alpha) \frac{\sqrt{2} U_H \cos \left(\theta_0(\alpha) \frac{\pi}{180} - \frac{\pi}{2} \right) - \Delta U_B}{c}, \quad (2.60)$$

$$I(\alpha) = i(\alpha) \frac{\sqrt{2} U_H \cos \left(\theta_0(\alpha) \frac{\pi}{180} - \frac{\pi}{2} \right)}{c}. \quad (2.61)$$

Якщо в цих рівняннях задавати кут відкриття тиристорів α (в межах 0...180) і кут провідності λ (0...60), то одержимо сімейство електромеханічних характеристик в зоні переривчатих струмів, рис.2.6.

Для отримання граничної характеристики необхідно в рівняннях для швидкості і струму в зоні переривчатого струму задавати кут $\lambda=60^\circ$ та змінювати кут керування α .

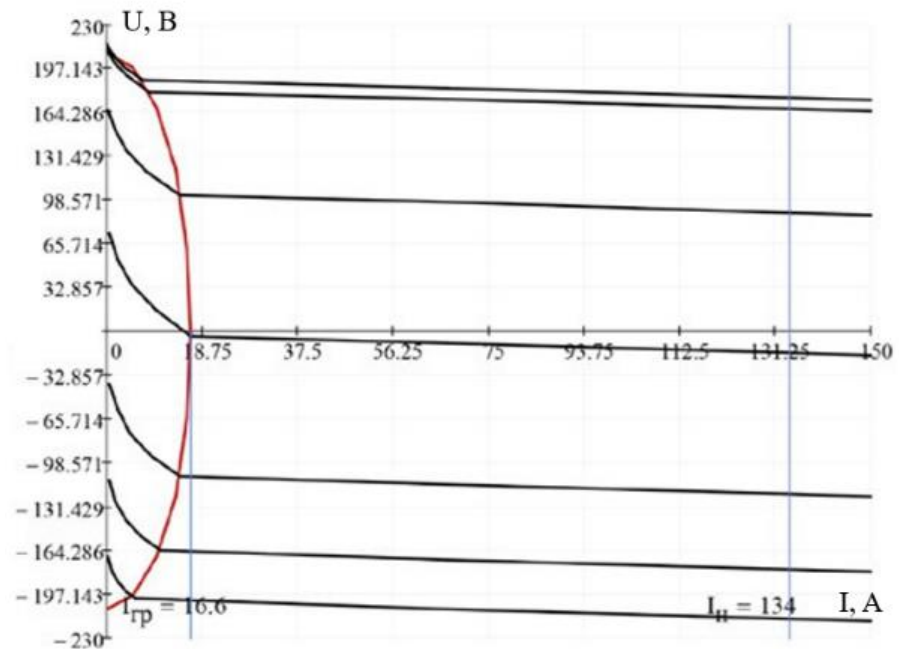


Рисунок 2.6 – Електричні характеристики системи ТП-ДПТ з роздільним керуванням

2.19 Структурна схема силового каналу електроприводу


Параметри елементів структурної схеми зведені до табл.2.8.

Таблиця 2.8 – Параметри елементів силового кола.

$K_{ТП}$	$R_{ЯК}, \text{Ом}$	$L_{ЯК}, \text{Гн}$	$C, \text{Вс/рад}$	$T_{ТП}, \text{с}$	$J_E, \text{кг м}^2$
$I_{Я}, \text{А}$	0,12	0,00254	2,02	0,00167	
$T_{ЯК}, \text{с}$	$K_{ДС}, \text{В/А}$	$K_{ДН}, \text{в. о.}$	$M_C, \text{Нм}$	$R_{ДВ}, \text{Ом}$	$T_{ДВ}, \text{с}$
0,034	0,02	0,02	121,6...448,55	0,06	0,00127

Коефіцієнт передачі датчика струму з урахуванням передачі шунта ($\Delta U_{Ш} = 0,075 \text{ В}, I_{Ш} = 500 \text{ А}$) і коефіцієнт підсилення типовою комірками датчика струму

$$K_{ДС} = \frac{U_{ДС\max}}{I_{Ш}} = \frac{10}{500} = 0,02 \text{ См.}$$



Датчик напруги реалізуємо з використанням типової комірки датчика напруги з подільником вхідної напруги

$$K_{ДН} = \frac{U_{ДН\max}}{U_{ВХ\max}} = \frac{10}{500} = 0,02 \text{ в. о.}$$

2.20 Система автоматичного регулювання електрорушійної сили приводу колісної пари


Приймаємо для синтезу систему з активною послідовною корекцією координат. Найбільшого поширення серед систем управління координатами приводу постійного струму набули двоконтурні системи, в яких швидкість регулюється зміною напруги на якорі двигуна за рахунок керованого електричного перетворювача (генератора, керованого тиристорного або транзисторного випрямляча, широтна-імпульсного перетворювача) при підпорядкованому контурі регулювання струму двигуна. На рис. 2.3 дана функціональна схема електроприводу з подібною системою регулювання.

Двигун Д з незалежним збудженням (обмотка збудження ОЗД) отримує живлення від керованого перетворювача УП - реверсивного тиристорного перетворювача з двома групами випрямлення та з зустрічно-паралельною схемою вмикання і з роздільним їх управлінням.

Погодження номінальних значень напруги живильної КП мережі u_M вхідній напрузі та струму якоря двигуна забезпечується трансформатором Т. Застосування Т дозволяє: забезпечити номінальну напругу на виході перетворювача при мінімальному куті управління його тиристорами і, в результаті, при максимальному коефіцієнті потужності електроприводу; обмежити швидкість зміни струму через тиристори при їх комутації та коротких замиканнях у разі можливих аварійних режимів у силовому колі КП; потенційно розділити високовольтні кола живлення КП та якорне коло, що підвищує експлуатаційну надійність та безпеку їх обслуговування. При необхідності поліпшення умов комутації струму якоря двигуна за рахунок обмеження швидкості його зміни в колі якоря двигуна встановлюється дросель Др. Згладжування пульсацій струму якоря сприяє також зменшенню вібрацій і шуму в двигуни.

Система управління електроприводу містить два контури регулювання: внутрішній контур струму якоря (КС) та зовнішній контур електрорушійної сили (КЕ).

Контур струму включає в себе силову частину електроприводу з виходом по струму якоря Ія, коло негативного зворотного зв'язку струму якоря та регулятор струму якоря РС. На вході РС порівнюються напруга завдання струму якоря $u_{завС}$ і напруга зворотного зв'язку $u_{зС}$, яке надходить з датчика струму ДС. На вхід ДС подається напруга з шунта Ш,



пропорційне струму якірного кола двигуна. Блок БО обмежує вихідну напругу u_{PE} регулятора ЕРС РЕ.

Контур електрорушійної сили двигуна включає замкнутий КС, коло негативного зворотного зв'язку по електрорушійної сили двигуна та регулятор електрорушійної сили РЕ. На вході РЕ порівнюються напруга завдання електрорушійної сили $u_{завЕРС}$, що подається з виходу задаючого пристрою ЗУ, та напруга зворотного зв'язку за електрорушійною силою двигуна $u_{ЗЕРС}$, що надходить від сенсора ЕРС. Регулятор електрорушійної сили може бути як пропорційним (при невисоких вимогах до точності регулювання електрорушійної сили), так і пропорційно-інтегральним (за необхідності абсолютної статичної точності регулювання електрорушійної сили).

Пристрій завдання формує бажаний закон зміни швидкості шлаковозу, наприклад, лінійний із заданим постійним прискоренням (задатчик інтенсивності), експоненціальний (інерційна вхідна ланка) або синусоїдальний (як тестовий сигнал для зняття частотних характеристик електроприводу).

Блок БО обмежує вихідну напругу РЕ і цим самим максимальну напругу завдання $u_{завС}$ струму якоря двигуна, що забезпечує в замкнутому КС якоря двигуна обмеження цього струму на рівні максимально допустимого значення I_{max} . Рівень обмеження статичної характеристики БО незалежно регулюється сигналами I_{max1} і I_{max2} .

Структурна схема відповідає наступним припущенням: регульовальна характеристика керованого перетворювача лінійна; струм якірного кола двигуна безперервний; відсутня реакція якоря двигуна; момент інерції, приведений до валу двигуна, постійний; інерційність датчиків струму та швидкості не враховується через їх малість.

При відсутності додаткових високих вимог до точності підтримки швидкості електроприводів без регулювання потоку збудження двигуна не застосовуються тахогенератори, використовуючи зворотний зв'язок по ЕРС двигуна.

Функціональна схема системи регулювання зі зворотним зв'язком по ЕРС показано на рис.2.7. Як датчик ЕРС ДЕ використовується підсилювач з роздільним входом і виходом. На вхід датчика подаються сигнали, пропорційні струму двигуна (вхідний опір R_{TK}) та напруга на його затискач (вхідний опір R_H). Т-подібний фільтр з постійним часом T_γ виконаний на двох опорах та ємності.

При побудові таких систем використовують датчики ЕРС, для побудови яких використовують залежність:

$$u_{дв} = e_{дв} + iR_{як} + L_{як} \frac{di}{dt}, \quad (2.62)$$

де $R_{як}$ і $L_{як}$ - опір і індуктивність якірного кола, з якої знімається сигнал, пропорційний струму i .

Тоді маємо

$$e_{дв} = u_{дв} - iR_{як} - L_{як} \frac{di}{dt} \quad (2.63)$$

або в операторним зображенні

$$E_{дв} = U_{дв} - IR_{як} - L_{як}sI = U_{дв} - IR_{як}(1 + T_{як}s). \quad (2.64)$$

Позбавившись від похідної

$$\frac{E_{дв}}{1 + T_{як}s} = \frac{U_{дв}}{1 + T_{як}s} - IR_{як}. \quad (2.65)$$

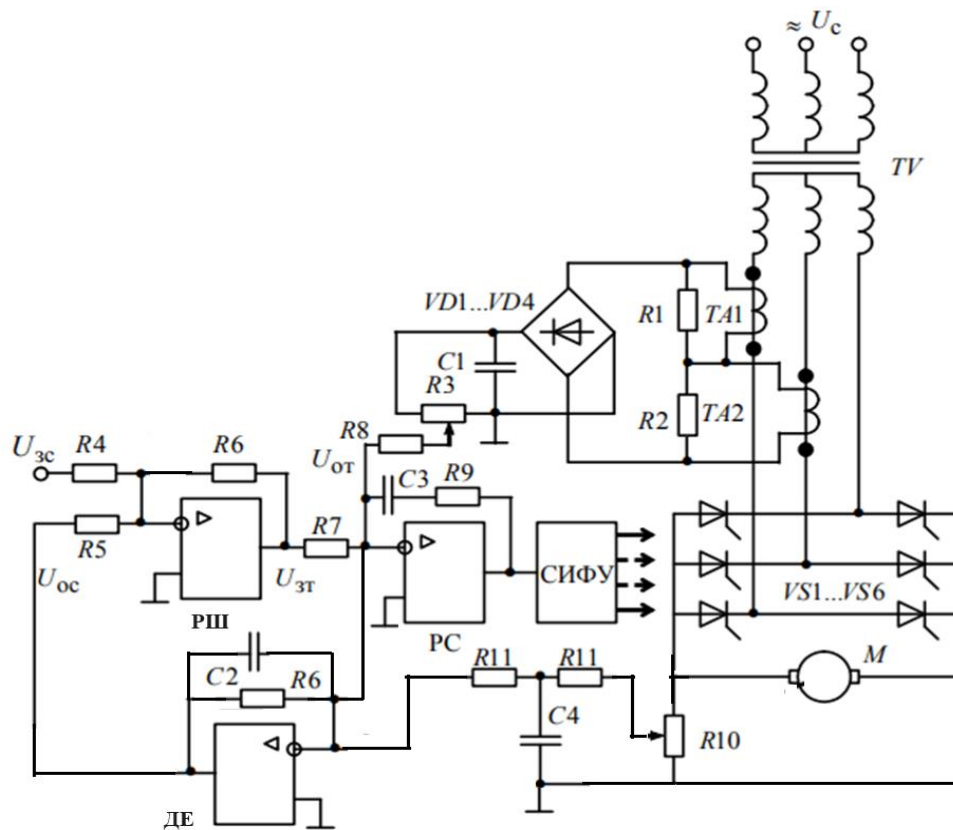


Рисунок 2.7 – Функціональна схема системи регулювання електрорушійної сили з підлеглим регулюванням струму якоря

Маємо два можливих способи виміру ЕРС двигуна. У першому випадку шляхом алгебраїчного підсумовування сигналів, пропорційних, якій напрузі та активному спаданню напруги $U_{дв} - IR_{як}$ і ЕРС самоіндукції $L_{як}sI$. Однак при цьому потрібно диференціювати сигнал, пропорційний струму якоря, що при високому рівні пульсації струму досить складно. Але в цьому випадку датчик ЕРС виходить безінерційним.

У другому випадку потрібно, навпаки, затримати сигнал напруги на якорі $\frac{U_{дв}}{1 + T_{як}s}$. У результаті чого датчик ЕРС здобуває інерційність зі сталою

часу $T_{яц}$, рівною сталій часу ділянки якірного кола, з якого знімається напруга двигуна. Передатна функція датчика ЕРС

$$U_{де}(s) = \frac{k_H k_{де}}{1 + T_{як} s} U_{дв}(s), \quad (2.66)$$

де k_H – коефіцієнт подільника напруги;

$k_{де}$ – статичний коефіцієнт передачі давача ЕРС по каналу напруги.

Структурна схема двигуна з вимірювачем ЕРС показана на рис.2.8. Зі схеми видно, що при відповідному виборі коефіцієнтів вимірювального пристрою та постійного часу згладжувального фільтра на вході напруги на виході датчика ЕРС.

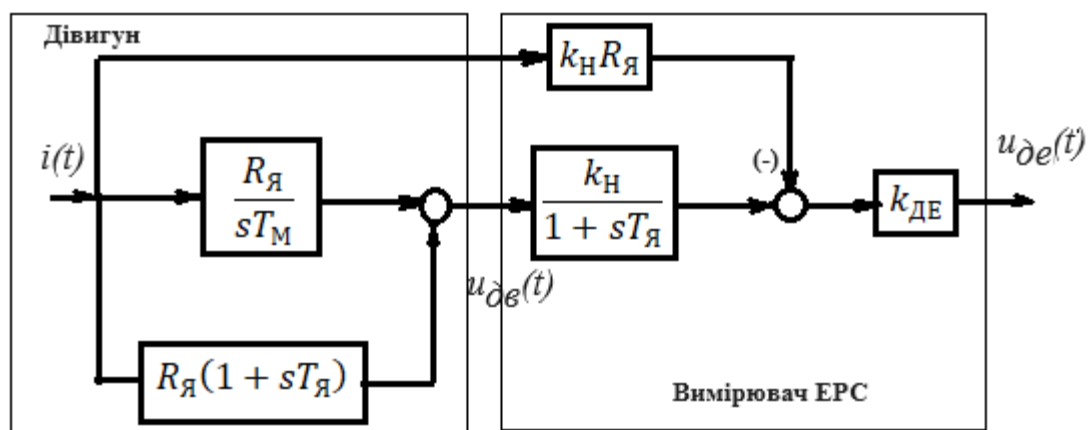


Рисунок 2.8 – Структурна схема двигуна з вимірювачем електрорушійної сили

Одержана структурна схема еквівалентна схемі зі зворотним зв'язком за швидкістю двигуна з фільтром з постійною часу $T_{яц}$ на виході тахогенератору, рис.2.9.

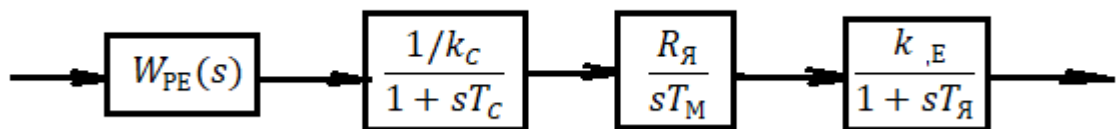


Рисунок 2.9 – Перетворена структурна схема двигуна з вимірювачем електрорушійної сили

Таким чином, об'єкт регулювання містить дві некомпенсуємих аперіодичних ланки зі сталими часу $T_{як}$ і T_c . Передатна функція розімкненого контуру регулювання ЕРС

$$W_{пке}(s) = W_{кке}(s)W_{нке}(s) = \frac{1/k_c R_{як} k_H k_{де}}{1 + sT_c sT_М 1 + T_{як} s}, \quad (2.67)$$

$$W_{\text{кке}}(s) = \frac{R_{\text{як}}k_{\text{н}}k_{\text{де}}/k_{\text{с}}}{sT_{\text{М}}}, \quad (2.68)$$

$$W_{\text{нке}}(s) = \frac{1}{1+sT_{\text{с}}} \frac{1}{1+T_{\text{яц}}s} \approx \frac{1}{1+(T_{\text{с}}+T_{\text{як}})s}, \quad (2.69)$$

де $W_{\text{кке}}(s)$ – компенсуєма частина передавальної функції об'єкта управління контуру електрорушійної сили;

$W_{\text{нке}}(s)$ – передатна функція некомпенсуємої частини об'єкта управління.

Передатна функція регулятора електрорушійної сили

$$W_{\text{ре}}(s) = \frac{1}{sT_{\text{о}}W_{\text{кке}}(s)} = \frac{k_{\text{с}}T_{\text{М}}}{a_{\text{е}}(T_{\text{с}}+T_{\text{як}})R_{\text{як}}k_{\text{н}}k_{\text{де}}}. \quad (2.70)$$

2.21 Оптимізація контуру струму

Структурна схема контуру струму надана на рис.2.10. контур струму містить дві аперіодичні ланки першого порядку, одну з великою сталою часу $T_{\text{як}}$ яка компенсується регулятором струму, другу – другу з малою «некомпенсованою» сталою часу, яка приймається як час транспортного запізнювання СІФУ

$$T_{\text{ТП}} = T_{\text{мс}} = 0,00167 \text{ с.}$$

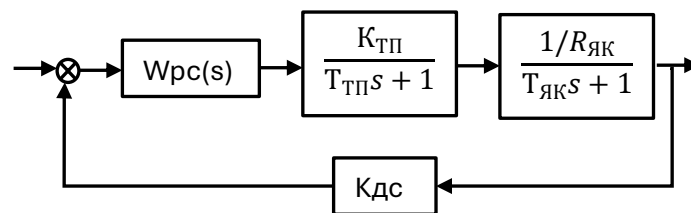


Рисунок 2.10 – Структурна схема контуру регулювання струму якірного кола

Налаштування контуру регулювання струму здійснюється без врахування внутрішнього зворотного зв'язку по противо-ЕРС двигуна.

Контур струму налаштовується на технічний(модульний) оптимум при коефіцієнті налаштування $a_{\text{с}}=2$. Регулятор струму має пропорційно-інтегральну динамічну характеристику.

Сенс налаштування на технічний оптимум полягає в тому, що в найбільш широкій смузі частот зробити модуль часткової характеристики близьким до одиниці, тобто щоб система рівномірно пропускала сигнал у найбільш широкому діапазоні частот. Чим ширша смуга пропускання, тим менше час перехідного процесу контуру.

При налаштуванні на технічний оптимум передатна функція розімкнутої системи повинна мати вигляд (бажана передатна функція):

$$W_P(s) = \frac{1}{2T_\mu s(T_\mu s + 1)}. \quad (2.71)$$

У цьому випадку перехідний процес не залежить від постійного часу об'єкта, а визначається величиною T_μ). Перерегулювання при цьому складає $\sigma=4,3\%$, а час першого узгодження $t_c \approx 4,7T_\mu$.

Логарифмічна амплітудно-частотна характеристика має нахили $-20, -40$ дБ/дек із частотою зрізу $\omega_{зр}$ і частотою сполучення ω_c :

$$\omega_{зр} = \frac{1}{2T_\mu}, \quad \omega_c = \frac{1}{T_\mu}.$$

Передатна функція внутрішнього контуру струму (дійсна передатна функція):

$$W_P(s) = W_{PC}(s) \frac{K_{ТП}}{T_{ТП}s + 1} \frac{1}{\frac{R_{ЯК}}{T_{ЯК}s + 1}} K_{ДС}. \quad (2.72)$$

Об'єктом регулювання (компенсації) є аперіодична ланка з постійної $T_{ЯК}$. Прирівнюючи вирази для бажаної та дійсної передатних функцій контуру струму, отримуємо вираз для розрахунку передавальної функції регулятора струму:

$$W_{PC}(s) = \frac{(T_\mu s + 1)(T_{ЯК}s + 1)}{2T_\mu s(T_\mu s + 1)K_{ТП} \frac{1}{R_{ЯК}} K_{ДС}} = \frac{T_{ЯК}s + 1}{2T_\mu K_{ТП} \frac{1}{R_{ЯК}} K_{ДС} s} = \frac{T_{ЯК}}{2T_\mu K_{ТП} \frac{1}{R_{ЯК}} K_{ДС}} + \frac{1}{2T_\mu K_{ТП} \frac{1}{R_{ЯК}} K_{ДС} s}. \quad (2.73)$$

Отримуємо, що при налаштуванні системи на ТО з об'єктом регулювання у вигляді аперіодичного ланки в систему повинен бути включений пропорційно-інтегральний регулятор (ПІ-регулятор). Передаточна функція замкнутого внутрішнього контуру струму якорю після має вигляд:

$$W_{ЗС}(s) = \frac{1/K_{ДС}}{2T_\mu^2 s^2 + 2T_\mu s + 1}. \quad (2.74)$$

Так як T_μ мала величина ($T_\mu \ll 1$), то можна приблизно записати:

$$W_{ЗС}(s) = \frac{1/K_{ОС}}{2T_\mu s + 1}. \quad (2.75)$$

2.22 Оптимізація контуру електрорушійної сили

Об'єкт регулювання контуру електрорушійної сили містить дві некомпенсуємих аперіодичних ланки зі сталими часу $T_{як}$ і T_c . Передатна функція розімкненого контуру регулювання ЕРС, рис.2.10

$$W_{pке}(s) = W_{кке}(s)W_{нке}(s) = \frac{1/k_c \frac{R_{як}}{sT_c} \frac{k_H k_{де}}{1+T_{як}s}}{1+T_{як}s}, \quad (2.76)$$

де $W_{кке}(s)$ – компенсуєма частина передавальної функції об'єкта управління контуру електрорушійної сили;

$W_{нке}(s)$ – передатна функція некомпенсуємої частини об'єкта управління.

Передатна функція регулятора електрорушійної сили

$$W_{pe}(s) = \frac{1}{sT_0 W_{кке}(s)} = \frac{k_c T_M}{a_e (T_c + T_{як}) R_{як} k_H k_{де}}.$$

Структурна схема контуру регулювання електрорушійної сили зображена на рисунку 2.11.

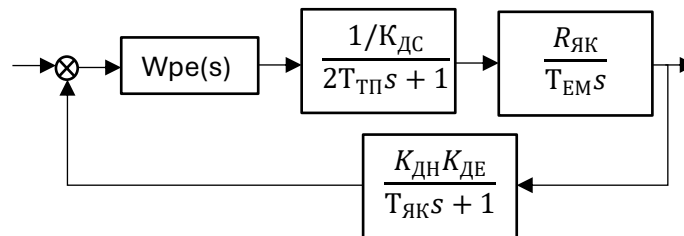


Рисунок 2.11 – Структурна схема контуру регулювання електрорушійної сили

Тобто, регулятор повинен бути підсилювальною ланкою (П-регулятор), а регулювання виявляється статичним, що може призвести до появи статичної похибки та пробуксовки колісних пар при повздовжньому неоднаковому навантаженні.

Для отримання астатичного регулювання електрорушійних сил приводів задніх і передніх колісних пар шлаковозу, може бути використаний симетричний оптимум. Цій назві відповідає симетрична щодо частоти зрізу $\omega_{зр}$ ЛАЧХ оптимізованого розімкнутого контуру з передавальною функцією:

$$W_{PE}(s) = \frac{4T_{\mu e}s + 1}{8T_{\mu e}^2 s^2 (T_{\mu e}s + 1)}. \quad (2.77)$$

Перерегулювання при даному налаштуванні становить $\sigma=43\%$, а час першого узгодження $t_c \approx 3,1T_{\mu}$. Логарифмічна амплітудно-частотна

характеристика має нахили $-40, -20, -40$ дБ/дек з частотою зрізу ω_{3C} і частотами сполучення ω_{C1}, ω_{C2} відповідно:

$$\omega_{3E} = \frac{1}{2T_{\mu}}, \quad \omega_{E1} = \frac{1}{4T_{\mu}}, \quad \omega_{E2} = \frac{1}{2T_{\mu}}.$$

Налаштуємо зовнішній контур регулювання електрорушійної сили на симетричний оптимум. З урахуванням одержаного пропорційного регулятора електрорушійної сили передатна функція регулятора набуде вигляду:

$$W_{PE}(s) = \frac{(4T_{\mu e}s+1)(T_{\mu e}s+1)T_M K_{OC} K_{\Phi} s}{8T_{\mu e}^2 s^2 (T_{\mu e}s+1) R_{\mu} K_{OE}} = \frac{T_M K_{OC} K_{\Phi}}{2T_{\mu e} R_{\mu} K_{OE}} + \frac{T_M K_{OC} K_{\Phi}}{8T_{\mu e}^2 R_{\mu} K_{OE} s} = \frac{T_M K_{OC} K_{\Phi}}{4T_{\mu} R_{\mu} K_{OE}} + \frac{T_M K_{OC} K_{\Phi}}{16T_{\mu}^2 R_{\mu} K_{OE} s}. \quad (2.78)$$

Тобто як регулятор швидкості при налаштуванні на симетричний оптимум використовується ПІ-регулятор.

2.23 Розробка математичної моделі та аналіз режимів роботи шлакового автотранспортеру конверторного цеху

Розробка математичної моделі. Модель охоплює дві підсистеми: електромеханічну з електроприводом, редуктором і колісною парою та механічною з масою навантаженої платформи.

Математичний опис електромеханічної підсистеми спирається на баланс напруг (закон напруг Кірхгофа) та баланс моментів (другий закон Ньютона [25, 26]).

$$u_d = e + i_d R_a + L_a di_d/dt, \quad (2.79)$$

$$J_{зв1} d\omega/dt = M - M_{оп}, \quad (2.80)$$

де u_d – миттєве значення напруги постійного струму;

i_d – струм живлення якірного кола;

e – миттєве значення протиелектрорушійної сили;

R_a – сумарний активний опір якірного кола;


L_a – сумарна індуктивність якірного кола;

$J_{зв1}$ – зведений момент інерції якоря двигуна, редуктора та колісної пари;

ω – швидкість обертання валу двигуна;

$M_{оп}$ – момент опору, що визначається тяговим зусиллям на ободі колеса;

M – крутний момент двигуна.



Друга підсистема є механічною ланкою з масою навантаженої платформи. Математичний опис цієї підсистеми здійснюється на використанні балансу зусиль за другим законом Ньютона [27, 28]

$$m_{зв2} dv/dt = F_T - F_{оп}, \quad (2.81)$$

де $m_{зв2}$ – зведена інерційна маса навантаженої платформи;

R – коефіцієнтом зведення інерційних мас;

F_T – тягове зусилля;

$F_{оп}$ – зусилля опору.

Радіусом зведення інерційних мас, моментів інерції, кутової та лінійної швидкостей є радіус колеса R .

Електричну та механічну системи електромеханічної підсистеми зв'язує протиелектрорушійна сила [29].

$$e = k\omega, \quad (2.82)$$

де k – конструктивний коефіцієнт двигуна; при постійному потоці збудження Φ величина постійна.

Підсистеми зв'язані через тяговий момент (зусилля) на ободі колісної пари. Для привода тяговий момент є моментом опору, для платформи – тягове зусилля пересуває платформу по рейкам. Критична (максимальна) величина тягового зусилля (моменту) обмежується максимальним значенням коефіцієнту зчеплення, який залежить від різниці швидкостей (ковзання) обіду колеса та швидкості платформи. При перебільшенні ковзання критичного значення втрачається зв'язок між колісною парою та рейками, автошлаковоз переходить в режим буксування – підсистеми працюють самостійно.

На відміну від спрощених моделей [30, 31] тягове зусилля представлено як нелінійна функція коефіцієнту зчеплення від ковзання колісної пари по рейкам. Адекватність розробленої математичної моделі доводиться тим, що її результати узгоджуються с реальними даними та режимами роботи: пуск, пересування та гальмування автошлаковозу, перехід в режим буксування при перебільшенні двигуном критичного моменту з втратою тягового зусилля.

Структура Simulink-моделі надана на рис. 2.12.

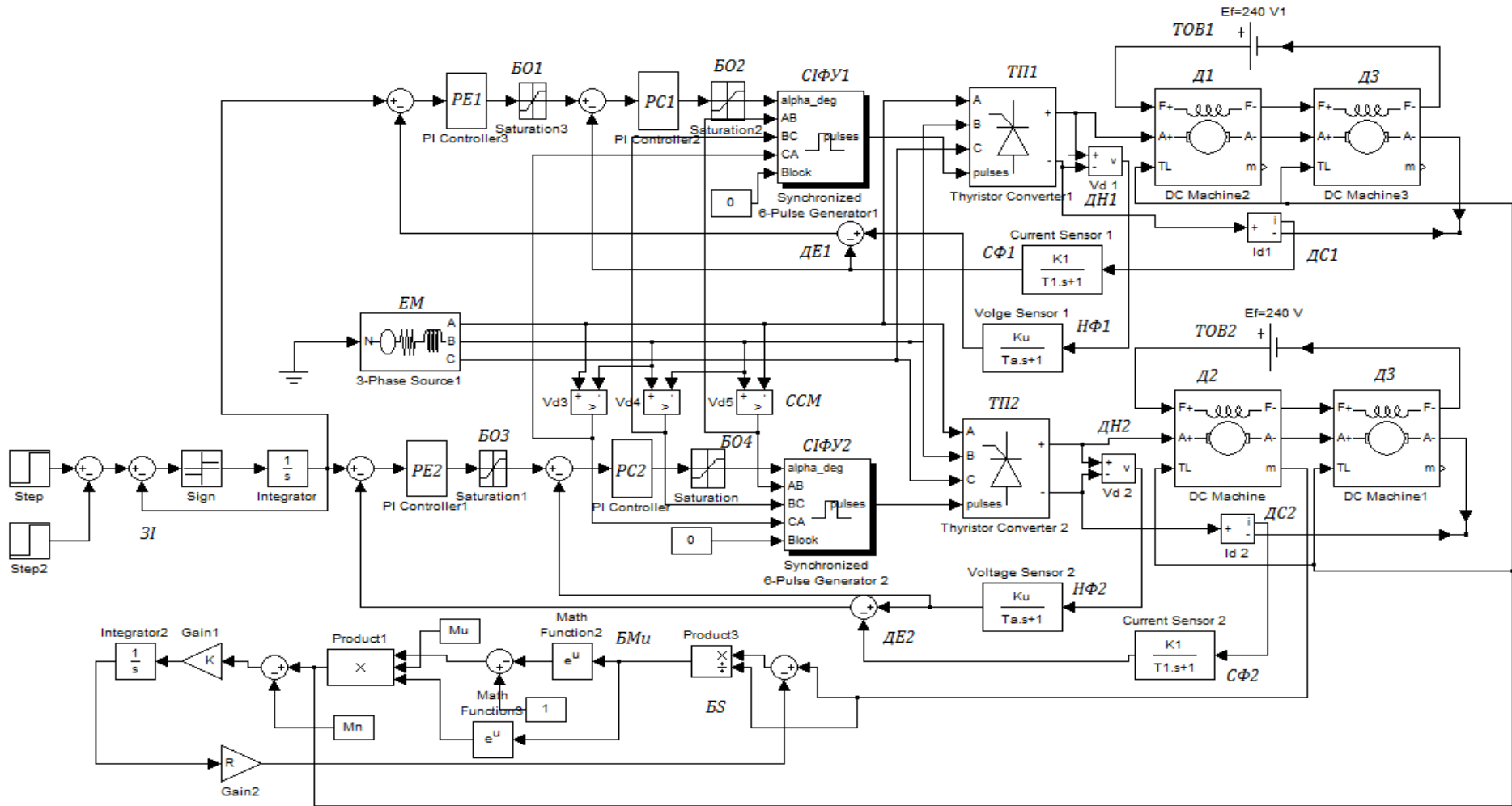



Рисунок 2.12 – Модель MATLAB/Simulink чотири-двигунного приводу шлаковозу



На основі математичних рівнянь побудовано структурну модель системи у середовищі Simulink, яка включає такі основні підсистеми: 1. EMF Reference – блок завдання ЕРС, здійснює команди на стрибок завдання ЕРС; 2. Intensity Controller – блок задавача інтенсивності, який обмежує прискорення; 3. Manual Switch – перемикач завдання на ЕРС; 4, 5. Automatic Control System EMF 1, 2 – системи автоматичного керування ЕРС першого та другого приводів; 6, 7. Thyristor Converter 1,2 – тиристорний перетворювач, реалізує залежність вихідної напруги від кута керування та формує напругу живлення двигуна. 8, 9 Anchor circuit 1, 2 – якірні кола першого та другого приводів; 10, 11 Mechanical part 1, 2 – механічні частини першого та другого приводів; 12, 13 Torque 1, 2 – блоки завдання моментів опору.

Вихідні дані платформи шлаковозу: колісна схема з'єднання платформи шлаковозу: платформа шлаковозу – чотири осі, 8 коліс, чотири колеса на двох крайніх осях через редуктор з'єднані з приводними двигунами. Кранова-металургійний швидкохідний двигун Д-806: $P_n = 32$ кВт; $n_n = 1000$ об/хв; $I_n = 165$ А; $U_n = 220$ В.

Схема включення якірних кіл обмоток збудження: якірні кола двох двигунів коліс однієї осі з'єднані послідовно та підключені до якірного перетворювача. Обмотки збудження з'єднані між собою послідовно та під'єднані до тиристорного збудника. Вантажа під 'ємність шлаковозу 320 тс; тиск колеса на рейку 54 тс; маса порожнього шлаковозу $54 \times 8/g = 320/g = 112/g$ тм; діаметр ходових коліс 1 м; швидкість пересування 3,82 км/год.

Для підвищення точності враховано затримку відкриття тиристорів, пульсації випрямленої напруги, а також інерційність каналів керування Модель двигуна постійного струму, містить точку нульового електричного потенціалу, блок розв'язування для фізичного кола, двокомплектний регульований тиристорний випрямляч з роздільним керуванням групами, сенсор напруги, сенсор струму, дві системи імпульсно-фазового керування.

Аналіз схем та режимів роботи електромеханічної системи шлаковозу. У процесі моделювання електромеханічної системи шлаковоза було проведено дослідження режимів роботи чотири двигунного електроприводу постійного струму з урахуванням різних умов навантаження на осі та варіантів побудови системи керування.

Основну увагу приділено аналізу динамічних процесів, стійкості роботи та виникненню пробуксовки колісних пар.

На першому етапі дослідження розглядався режим рівномірного навантаження, при якому сили опору руху на осях були однаковими. У цьому випадку як при використанні пропорційного (П), так і пропорційно-інтегрального (ПІ) регулятора ЕРС забезпечується задовільна якість перехідних процесів.

Швидкість обох приводів змінюється синхронно, струми якорів мають близькі значення, а система працює стійко без виникнення

пробуксовки колісних пар. Це свідчить про адекватність базової структури керування в умовах симетричного навантаження.

На другому етапі моделювання досліджувався режим з різним навантаженням на осі, рис.2.13, 2.14. Встановлено, що при застосуванні П-регулятора ЕРС виникає пробуксовка менше навантаженої колісної пари. Це пояснюється тим, що пропорційний регулятор не забезпечує достатньої компенсації статичної похибки, внаслідок чого відбувається перерозподіл моментів між приводами та перевищення граничного коефіцієнта зчеплення для менш навантаженої осі.

Якщо маємо для колісних пар різне осьове нормальне спрямоване навантаження N_1, N_2 , коли $N_1 > N_2$, то це призводить до різних швидкостей обертання $\omega_2 > \omega_1$. Різні значення навантажень спричиняють різні тягові моменти на колісних парах та моменти опору на валу двигуна

$$M_1 = \mu N_1 R; M_2 = \mu N_2 R.$$

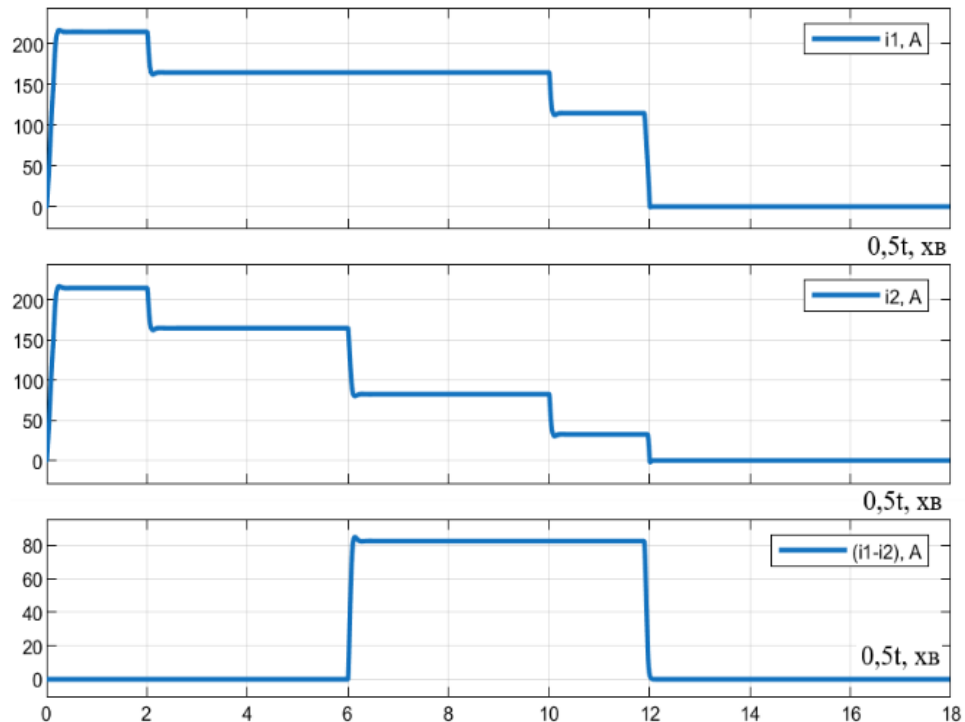


Рисунок 2.13 – Осцилограми струмів приводів осей (i_1, i_2), різниця струмів ($i_1 - i_2$) коліс шлаковозу. Навантаження на осі різне: 330 Нм і 150 Нм; однократно інтегруюча система регулювання з П регулятором ЕРС

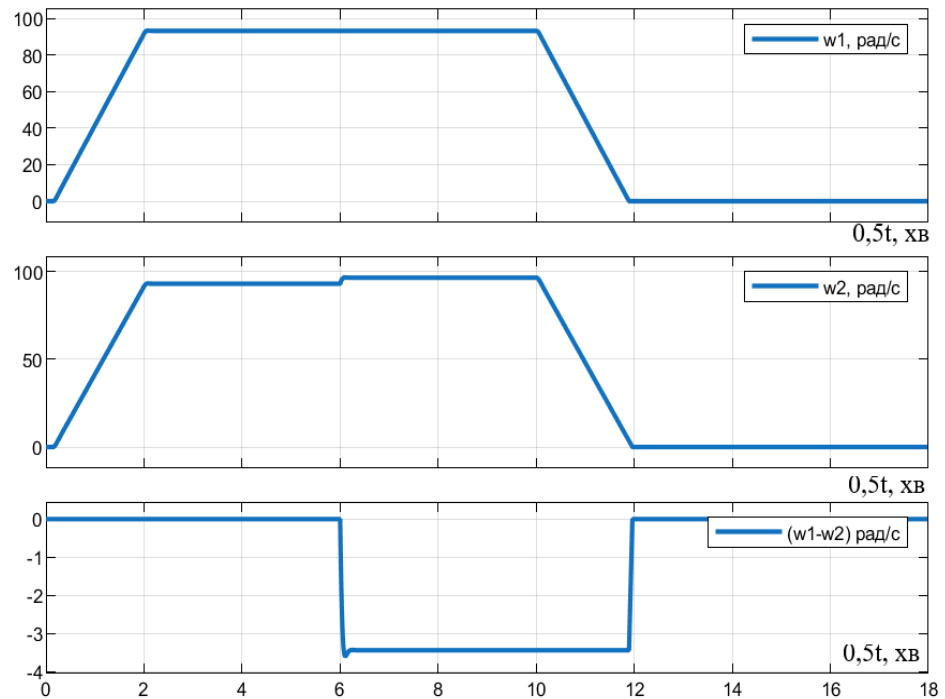


Рисунок 2.14 – Осцилограми швидкостей обертання осей (ω_1 , ω_2), різниця швидкостей ($\omega_1 - \omega_2$) коліс шлаковозу. Навантаження на осі різне: 330 Нм і 150 Нм; однократно інтегруюча система регулювання з П регулятором ЕРС

Критичні моменти, при перебільшенні яких з'являється ефект пробуксовки критичним коефіцієнтом зчеплення та нормальною складовою осьового навантаження

$$M_{1\text{крит}} = \mu_{\text{крит}} N_1 R; M_{2\text{крит}} = \mu_{\text{крит}} N_2 R.$$

За прийнятими припущеннями маємо $M_1 > M_2$ і $\omega_1 < \omega_2$ оскільки механічна характеристика з пропорційним регулятором ЕРС має кінцеве значення жорсткості. Тобто, більш навантажена вісь має меншу швидкість обертання та більший тяговий момент. Існує статична похибка, що означає: менше навантажена вісь обертається з більшою швидкістю та “випереджає” за швидкістю більше навантаженої осі.


Виникає перерозподіл моментів: менш навантажена вісь “довантажується” середнім моментом

$$\Sigma M_1 = M_1 + (M_1 + M_2)/2,$$

а більше навантаженою вісь “розвантажується” середнім моментом

$$\Sigma M_2 = M_2 - (M_1 + M_2)/2.$$

Тяговим моментам відповідають струми двигунів


$$I_1 = \Sigma M_1/k; I_2 = \Sigma M_2/k.$$

Для менше завантаженої осі зменшується запас по коефіцієнту зчеплення μ .

Якщо для менше завантаженої осі виконується умова

$$\Sigma M_2 = kI_2 > M_{2\text{крит}},$$

то це призводить до пробуксовки колісної пари, оскільки виконується умова втрати зчеплення колісної пари з рейкою.

Буксуючи колісна пара втрачає тяговий момент, тому весь момент опору перевантажується на іншу колісну пару, яка при виконанні умови

$$\Sigma M_1 = kI_1 > M_{1\text{крит}}$$

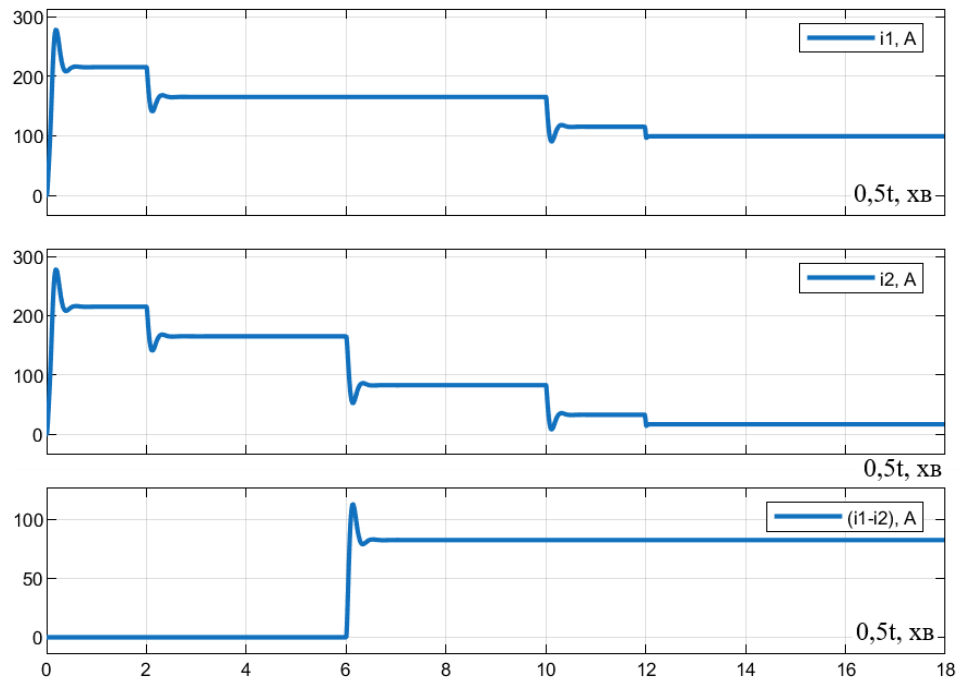
також переходить у режим пробуксовки – шлаковоз припиняє лінійне пересування при працюючих приводах.

Подальші дослідження показали, рис.2.15, що використання ПІ-регулятора ЕРС у тих самих умовах дозволяє усунути зазначений недолік.

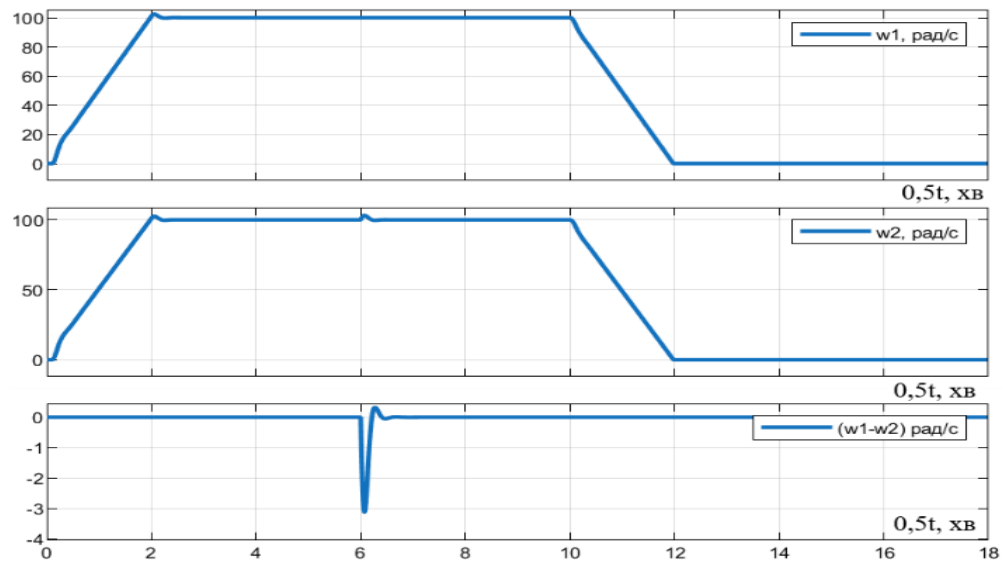
Інтегральна складова забезпечує ліквідацію статичної похибки та більш точне відпрацювання задаючого сигналу, що призводить до вирівнювання електромагнітних моментів двигунів. У результаті пробуксовка менш навантаженої колісної пари не виникає, а система зберігає стійкість навіть при значній асиметрії навантаження.

Сталому режимі дійсна ЕРС є дорівнює заданої e^* . Статична похибка відсутня. Кутіві швидкості обертання ведучих осей однакові ($\omega_2 = \omega_1$) – зникає умова появи буксування при любых небалансах тягових моментів. Інтегральна складова регулятора ЕРС забезпечує усунення статичної похибки регулювання швидкості, внаслідок чого електромагнітний момент двигуна в усталеному режимі точно відповідає моменту навантаження. Це виключає різницю у швидкостях обертання колісних пар – відсутня ковзання ($s=0$), коефіцієнт зчеплення зростає, зростає тягове зусилля, але він не мусить перебільшувати критичне значення.

Для пропорційна-інтегрального регулятора ЕРС у сталому режимі відсутня статична похибка регулювання швидкості, що забезпечує відповідність електромагнітного моменту двигуна моменту навантаження. У цьому випадку умова відсутності пробуксовки визначається виключно співвідношенням між моментом навантаження та граничним моментом зчеплення.



а.




б.

Рисунок 2.15 – Осцилограми: струмів (а) приводів осей (i_1, i_2), різниця струмів ($i_1 - i_2$); швидкостей обертання (б) осей (ω_1, ω_2), різниця швидкостей ($\omega_1 - \omega_2$); коліс шлаковозу Навантаження на осі різне: 330 Нм і 150 Нм; двократно інтегруюча система регулювання з ПІ регулятором ЕРС

Закон регулювання з ПІ-регулятором ЕРС

$$U = K_p(e' - e) + K_i(e' - e)dt.$$



У наступному етапі було досліджено систему з одним регулятором ЕРС, спільним для двох приводів, реалізовану за принципом «ведучий–ведений». Незважаючи на простоту такої структури, результати моделювання показали наявність пробуксовки колісних пар при нерівномірному навантаженні. Це обумовлено тим, що єдиний регулятор не враховує індивідуальні умови роботи кожного приводу, що призводить до неузгодженості моментів і перевантаження окремих колісних пар.

Якщо використовується один регулятор ЕРС на два приводи, то один сигнал керування подається на обидва контури регулювання струмів

$$U_1 = U_2 = U.$$

За такою схемою керування треба визначити за якою ЕРС замикається головний контур регулювання: якщо контролювати більшу ЕРС E_2 менш навантаженої осі, то зовнішній контур відпрацює завдання на компенсацію тягового моменту M_2 , але $M_1 > M_2$ і більше завантажена пара коліс буде підмальовуватися. При зміні зворотного зв'язку та вести регулювання по ЕРС E_1 більш навантаженої пари коліс, то привідна система буде врівноважувати момент опору M_1 , тоді менш навантажена пара буде розганятися. Виникає кінематичний конфлікт, який розв'язується через різні ковзання.

Виникає перерозподіл моментів: менш навантажена вісь “довантажується”, а більше завантажувано вісь “розвантажується” середнім моментом


$$\Delta M_{\text{ср}} = 0,5(M_1 + M_2).$$

Через збільшення моменту у менше завантаженої пари, у якій менше значення критичного моменту, то для неї складаються умови перебільшення критичного моменту, а це веде до режиму пробуксовки.

Аналогічний ефект спостерігається і в системі з двома регуляторами ЕРС, коли ведучий привод отримує сигнал від задавача інтенсивності, а ведений – від датчика ЕРС ведучого приводу. У цьому випадку, незважаючи на наявність індивідуальних контурів керування, передача задаючого сигналу через ЕРС ведучого приводу не забезпечує адекватного врахування різниці навантажень, що також призводить до виникнення пробуксовки.

У двопривідних електромеханічних системах, побудованих за принципом «ведучий–ведений», ведучий привід формує еталонну (задану) швидкість руху, тоді як ведений привід реалізує її через систему підпорядкованого керування (за сигналом ЕРС ведучого приводу).

Однак у динамічних режимах (пуск, гальмування, зміна навантаження) ведений привід неминуче має динамічну похибку відпрацювання, яка зумовлена: інерційністю електромеханічної системи; обмеженою швидкодією регуляторів; затримками в каналах вимірювання



та передачі сигналів; відмінністю параметрів приводів (момент інерції, жорсткість механічних зв'язків тощо).

Це призводить до того, що швидкість веденого приводу (ω_{follow}) відстає від швидкості ведучого (ω_{lead}):

$$\Delta\omega(t) = \omega_{\text{lead}}(t) - \omega_{\text{follow}}(t) > 0$$

Внаслідок виникнення цієї різниці швидкостей у зоні контакту (колесо–рейка) з'являється відносне ковзання s , що призводить до: нерівномірного зносу колісних пар та редукторів; зниження ККД системи; перегріву двигунів; виникнення автоколиваний; зниження ресурсу обладнання.

При нерівномірному навантаженні необхідний розподіл тягових моментів між приводами. Однак у схемах із одним регулятором ЕРС на два підпорядкованих контури струму або за принципом «ведучий–ведений» відсутній механізм узгодження моментів за навантаженням кожної осі. Це призводить до того, що менш навантажений привід отримує надлишковий електромагнітний момент, який перевищує граничний момент зчеплення, що викликає пробуксовку.


Досягнути синхронного обертання колісних пар без пробуксовки при різних навантаженнях вдалося тільки при використанні двократно інтегруючої системи керування з ПІ регуляторами струмів та ЕРС, рис.6.

Досягнення необхідної якості синхронізації було забезпечено шляхом застосування двократно інтегруючої системи керування, яка включає: внутрішній контур регулювання струму (моменту); контур регулювання ЕРС (пропорційної швидкості); використання ПІ-регуляторів у кожному контурі.

Принципово така структура забезпечує астатизм другого порядку відносно збурень навантаження, що забезпечує: відсутність статичної похибки за швидкістю; компенсацію постійних і повільно змінних збурень; узгодження швидкостей навіть при різних моментах навантаження.

Контур струму (моменту) забезпечує: компенсацію електромагнітних сталих часу; швидко компенсацію моменту опору шляхом формування відповідного електромагнітного моменту. Контур ЕРС (швидкості): компенсують електромеханічні стали часу; виконують функцію узгодження швидкостей приводів; компенсують відставання більше навантажених колісних пар.

Досягнення синхронного обертання колісних пар без пробуксовки в умовах змінних та несиметричних навантажень стало можливим лише при застосуванні двократно інтегруючої системи керування, побудованої на основі контурів регулювання струму та ЕРС з ПІ-регуляторами. Така структура забезпечує астатизм другого порядку за збуренням, що дозволяє усунути статичну та мінімізувати динамічну похибки швидкості приводів, забезпечуючи їх узгоджену роботу та запобігаючи виникненню ковзання і пробуксовки.



Проведений аналіз показав, що при використанні структур керування з одним регулятором ЕРС на два приводи або за принципом «ведучий–ведений» відсутня можливість індивідуального регулювання моментів двигунів відповідно до фактичного навантаження кожної осі. В умовах асиметричного навантаження це призводить до нерівномірного розподілу струмів і електромагнітних моментів.

Встановлено, що для менш навантаженої колісної пари електромагнітний момент може перевищувати граничний момент зчеплення, що підтверджується зростанням коефіцієнта ковзання понад допустимі значення. Це свідчить про виникнення пробуксовки та недостатню якість керування в зазначених структурах

Таким чином, результати моделювання показали, що ключовим фактором забезпечення роботи колісних пар без пробуксовки шлаковоза є не лише структура системи керування електроприводом, але й тип регулятора. Використання ПІ-регулятора ЕРС у поєднанні з індивідуальними контурами керування для кожного приводу дозволяє суттєво підвищити рівномірність розподілу навантаження та запобігти пробуксовці колісних пар. Водночас спрощені структури типу «ведучий–ведений» без додаткових коригувальних зв'язків виявляються недостатньо ефективними в умовах асиметричного навантаження, характерного для роботи шлаковоза в конвертерному цеху.


2.24 Висновки за розділом

У спеціальному розділі бакалаврської роботи виконано комплексний аналіз конструктивних, електромеханічних та керуючих аспектів роботи шлаковоза в умовах конвертерного цеху ККЦ, а також розроблено математичні та структурні моделі електропривода з урахуванням реальних умов експлуатації.

Встановлено, що транспортування шлаку шлаковозами характеризується важкими умовами роботи, які включають часті пуски та гальмування, значні інерційні навантаження, роботу з великими масами рідкого шлаку, а також підвищену ймовірність втрати зчеплення колісних пар із рейками. Це визначає підвищені вимоги до тягового електропривода, зокрема до його динамічних властивостей, переважувальної здатності та точності регулювання координат.

Аналіз технічних параметрів платформи шлаковоза та тягових двигунів показав, що існуюче обладнання потребує забезпечення високого пускового моменту та широкого діапазону регулювання швидкості при збереженні стійкості системи в перехідних режимах. Це обґрунтувало вибір системи електропривода типу «тиристорний випрямляч – двигун постійного струму», яка найкраще відповідає вимогам важких тягових режимів.

Розрахунок діаграми навантаження двигуна та вибір його потужності підтвердив адекватність вибраних параметрів електропривода умовам



експлуатації, а також забезпечення необхідного запасу за моментом і струмом у перехідних режимах руху шлаковоза.

Визначено сталі часу та коефіцієнти двигуна як об'єкта керування, що дозволило побудувати математичну модель електромеханічної системи та встановити її динамічні властивості. Отримані результати свідчать про доцільність застосування двоконтурної системи автоматичного регулювання зі струмовим контуром та контуром електрорушійної сили (ЕРС), що забезпечує високу швидкодію та стабільність роботи привода.

Проведено аналіз особливостей розподілу навантаження на колісні пари та умов втрати зчеплення з рейкою. Встановлено, що нерівномірність навантаження та динамічні коливання є основними причинами буксування, що негативно впливає на енергоефективність і надійність роботи шлаковоза. Це підтвердило необхідність впровадження алгоритмів обмеження ковзання та протибуксувального регулювання.

На основі рівняння лінійного руху шлаковоза розроблено математичну модель системи, яка враховує сили тяги, опори руху та інерційні характеристики механічної частини. Отримані залежності дозволили виконати розрахунок налаштувань регуляторів струму та ЕРС, що забезпечує оптимальні динамічні показники системи керування.

Виконано розрахунок параметрів тиристорного перетворювача та силового кола, що дозволило визначити його структурні та енергетичні характеристики, необхідні для забезпечення стабільної роботи електропривода в широкому діапазоні навантажень.

Розроблено передатну функцію тиристорного перетворювача та структурну схему силового каналу електропривода, що дало змогу провести аналіз системи як об'єкта автоматичного регулювання.

Перевірка забезпечення заданої області існування електромеханічних характеристик підтвердила працездатність системи у всьому робочому діапазоні швидкостей та навантажень.


Побудовані електромеханічні характеристики розімкнутої системи «перетворювач – двигун» дозволили оцінити стійкість і жорсткість характеристик, а також визначити ефективність регулювання швидкості.

Синтезовано систему автоматичного регулювання електрорушійної сили привода колісної пари, що забезпечує стабілізацію режимів руху та зменшення коливань моменту.

Виконано оптимізацію контуру струму та контуру ЕРС, що дозволило підвищити швидкодію системи та зменшити перехідні процеси при зміні навантаження.

Розроблена математична модель шлаковозного автотранспортера конвертерного цеху дозволила проаналізувати основні режими роботи, включаючи пуск, сталий рух та гальмування, а також оцінити вплив параметрів системи на динамічні показники.

У цілому виконаний спеціальний розділ підтверджує, що запропонована система електропривода на основі тиристорного



випрямляча та двигуна постійного струму забезпечує необхідні техніко-економічні та динамічні показники роботи шлаковоза, підвищує його надійність, знижує ймовірність буксування та забезпечує стабільність транспортного процесу в умовах конвертерного цеху.

Отримані результати є основою для подальшої оптимізації системи керування та впровадження енергоефективних режимів роботи електропривода.

У результаті проведених досліджень на математичній моделі отримано такі основні результати.

Розроблено математичну модель електромеханічної системи шлаковоза, яка враховує електричні та механічні процеси в тягових двигунах постійного струму, а також особливості навантаження, характерні для металургійного транспорту. Запропонована модель дозволяє адекватно відтворювати як усталені, так і перехідні режими роботи системи.


Адекватність розробленої математичної моделі підтверджується її коректною поведінкою у граничних режимах та відповідністю фундаментальним законам електромеханіки. В моделі враховано всі суттєві явища: електромеханічні зв'язки, нелінійність коефіцієнту зчеплення колесо-рейка, інерційність ланок, дискретний характер роботи тиристорного перетворювача, динамічні властивості об'єкту керування та регуляторів, зони насичення регуляторів – вона структурно адекватна.

На основі створеної моделі проведено дослідження динамічних режимів роботи електроприводу при різних умовах навантаження на осі. Встановлено, що при рівномірному навантаженні система керування забезпечує стійку роботу без пробуксовки колісних пар як при використанні пропорційного, так і пропорційно-інтегрального регулятора ЕРС.

Доведено, що в умовах асиметричного навантаження застосування пропорційного регулятора ЕРС призводить до виникнення пробуксовки менш навантаженої колісної пари, що обумовлено наявністю статичної похибки та нерівномірним розподілом електромагнітних моментів між приводами.

Встановлено, що використання пропорційно-інтегрального регулятора ЕРС забезпечує усунення статичної похибки, покращення точності регулювання та запобігання пробуксовці колісних пар навіть за наявності суттєвої різниці навантажень. Це підтверджує доцільність застосування ПІ-регуляторів у системах керування тяговими електроприводами шлаковозів.

Проаналізовано ефективність структур керування багатодвигунним електроприводом за принципом «ведучий–ведений». Встановлено, що використання одного регулятора ЕРС на два приводи або передача задаючого сигналу від ведучого приводу до веденого не забезпечує необхідної якості керування в умовах нерівномірного навантаження, що призводить до виникнення пробуксовки.



Показано, що для забезпечення стійкої та надійної роботи електроприводу доцільно застосовувати структури з індивідуальними регуляторами для кожного приводу, що дозволяє враховувати поточний стан та умов навантаження.

Отримані результати моделювання підтверджують, що ключовим фактором підвищення ефективності електроприводу є забезпечення рівномірного розподілу навантаження між двигунами та мінімізація динамічних перевантажень.

Практичне значення роботи полягає в можливості використання розробленої математичної моделі та отриманих результатів для:

- вдосконалення систем керування електроприводами шлаковозів;
- підвищення надійності та довговічності обладнання;
- зменшення енергоспоживання та втрат;
- запобігання аварійним режимам, зокрема пробуксовці колісних пар.

Таким чином, результати дослідження можуть бути використані при проєктуванні та модернізації електроприводів промислового транспорту, що працює в складних умовах металургійного виробництва.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробкою адаптивних та інтелектуальних систем керування, впровадженням алгоритмів компенсації пробуксовки (anti-slip control), а також розширенням математичної моделі з урахуванням нелінійних ефектів та випадкових збурень.

3 ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ЗАПРОНОВАНИХ ЗАХОДІВ

Метою економічного обґрунтування є визначення доцільності впровадження заходів щодо покращення режимів роботи шлаковоза шляхом модернізації системи електропривода та впровадження алгоритмів протибуксувального керування.

3.1 Розрахунок економічного ефекту від зменшення буксування колісних пар та зниження експлуатаційних витрат

Під час експлуатації шлаковоза значна частина втрат пов'язана з пробуксовуванням колісних пар у моменти пуску та розгону. Буксування призводить до:

- прискореного зносу бандажів;
- підвищеного зносу рейок;
- перевитрат електроенергії;
- додаткових динамічних навантажень на редуктори та тягові двигуни.

За даними експлуатаційних служб металургійних підприємств, втрати електроенергії від буксування можуть досягати 3–5 % загального споживання.

Річне споживання електроенергії шлаковозом: $W = 900000$ кВт·год.

Приймаємо частку втрат від буксування: $\alpha = 4$ %

Тоді річні втрати електроенергії:

$$\Delta W_6 = 900000 \cdot 0,04 = 36000 \text{ кВт·год.}$$

Після впровадження системи протибуксувального керування втрати зменшуються на 80 %.

Економія електроенергії:

$$\Delta W_{\text{ек}} = 36000 \cdot 0,8 = 28800 \text{ кВт·год.}$$

При тарифі на електроенергію 8 грн/кВт·год:

$$E_6 = 28800 \cdot 8 = 230400 \text{ грн/рік.}$$

3.1.1 Економічний ефект від зниження зносу бандажів колісних пар

На шлаковозі експлуатуються чотири колісні пари. Середня вартість відновлення одного комплексу бандажів становить: $C_6 = 80000$ грн.

Поточна періодичність ремонту: $T_1 = 3$ роки.

Після модернізації очікується збільшення ресурсу: $T_2 = 4,5$ роки.

Річні витрати на бандажі до модернізації: $C_1 = (4 \cdot 80000) / 3 = 106667$ грн/рік.

Після модернізації: $C_2 = (4 \cdot 80000) / 4,5 = 71111$ грн/рік.
Річна економія: $E_{\text{банд}} = 106667 - 71111 = 35556$ грн/рік.

3.1.2 Економічний ефект від скорочення ремонтів редукторів

У результаті усунення ударних навантажень зменшується кількість аварійних ремонтів редукторів.

Середні витрати на ремонти редукторів: $C_p = 380000$ грн/рік.

Очікуване скорочення: $k = 20$ %.

Річна економія: $E_{\text{ред}} = 380000 \cdot 0,20 = 76000$ грн/рік.

3.1.3 Економічний ефект від скорочення ремонтів тягових двигунів

Витрати на ремонти тягових двигунів становлять: $C_{\text{дв}} = 420000$ грн/рік.

Очікуване скорочення ремонтних витрат: $k_{\text{дв}} = 18$ %.

Річна економія: $E_{\text{дв}} = 420000 \cdot 0,18 = 75600$ грн/рік.

3.1.4 Загальний економічний ефект

Складові річного економічного ефекту зведені до табл.3.1.

Таблиця 3.1 – Складові річного економічного ефекту

Джерело економії	Ефект, грн/рік
Зменшення буксування	230400
Зниження зносу бандажів	35556
Скорочення ремонтів редукторів	76000
Скорочення ремонтів тягових двигунів	75600
Економія електроенергії від оптимізації режимів	432000
Підвищення продуктивності	350000
Разом	1199556

Отже, загальний річний економічний ефект становить: $E_{\text{заг}} = 1199556$ грн/рік.

3.2 Оцінка ефективності інвестиційного проєкту

3.2.1 Вихідні дані

Для оцінки ефективності проєкту приймаємо:

- 1) капітальні вкладення $K = 1020000$ грн;
- 2) річний економічний ефект $E_{\text{заг}} = 1199556$ грн;
- 3) розрахунковий період $n = 5$ років;
- 4) ставка дисконту $r = 15$ %.

3.2.2 Розрахунок чистого приведенного доходу (NPV)

NPV визначається як сума дисконтованих грошових потоків за весь період експлуатації за вирахуванням початкових інвестицій. Розрахунок дисконтних грошових потоків зведено до табл.3.2.

Таблиця 3.2 – Розрахунок дисконтованих грошових потоків

Рік	Грошовий потік, грн	Коефіцієнт дисконтування	Дисконтований потік, грн
0	-1020000	1,000	-1020000
1	1199556	0,870	1043614
2	1199556	0,756	906556
3	1199556	0,658	789676
4	1199556	0,572	686146
5	1199556	0,497	596179

Сума дисконтованих надходжень: $\Sigma PV = 4022171$ грн.

Чистий приведений дохід: $NPV = 4022171 - 1020000$; $NPV = 3002171$ грн.

Оскільки $NPV > 0$, інвестиційний проєкт є економічно доцільним.

3.2.3 Розрахунок індексу прибутковості (PI)

Індекс прибутковості визначається як відношення суми дисконтованих надходжень до початкових інвестицій.

$$PI = 4022171 / 1020000$$
$$PI = 3,94$$

Критерій ефективності: $PI > 1$.

Отримане значення свідчить про високу інвестиційну привабливість проєкту.

3.2.4 Розрахунок внутрішньої норми прибутковості (IRR)

IRR визначає таку ставку дисконту, за якої: $NPV = 0$.

Ітераційним методом отримано: $IRR \approx 112\%$.

Порівняємо: $IRR = 112\% > r = 15\%$.

Отже, дохідність проєкту значно перевищує нормативну вартість капіталу підприємства.

3.2.5 Термін окупності

Простий термін окупності: $Ток = K / E_{заг}$; $Ток = 1020000 / 1199556$;
 $Ток = 0,85$ року.

Дисконтований термін окупності становить приблизно: $Тдок \approx 1,0$ року.

3.3 Аналіз чутливості інвестиційного проєкту

3.3.1 Мета аналізу чутливості

Аналіз чутливості є одним із найважливіших етапів оцінювання інвестиційного проєкту та дозволяє визначити вплив зміни основних факторів на його економічну ефективність. Основною метою аналізу є встановлення ступеня стійкості проєкту модернізації системи керування шлаковозом до можливих змін зовнішніх та внутрішніх умов експлуатації.

Для проєкту покращення режимів роботи шлаковоза в умовах конвертерного цеху ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» аналіз чутливості проводиться за такими параметрами:

- обсяг капітальних вкладень;
- величина річного економічного ефекту;
- тариф на електроенергію;
- витрати на ремонти обладнання;
- ставка дисконтування.

Базові параметри проєкту, табл.3.2.

Таблиця 3.2 – Базові параметри розрахунку

Показник	Позначення	Значення
Капітальні вкладення	K	1 020 000 грн
Річний економічний ефект	$E_{\text{заг}}$	1 199 556 грн
Розрахунковий період	n	5 років
Ставка дисконту	r	15 %
Чистий приведений дохід	NPV	3 002 171 грн
Індекс прибутковості	PI	3,94
Внутрішня норма прибутковості	IRR	112 %

3.3.2 Аналіз впливу зміни капітальних вкладень

Розглянемо зміну капітальних витрат у межах ± 20 % від базового значення, табл.3.3.

Таблиця 3.3 – Вплив капітальних вкладень на NPV

Зміна капітальних витрат	Капітальні вкладення, грн	NPV , грн
-20 %	816 000	3 206 171
-10 %	918 000	3 104 171
0 %	1 020 000	3 002 171
+10 %	1 122 000	2 900 171
+20 %	1 224 000	2 798 171

Отримані результати показують, що навіть при збільшенні капітальних витрат на 20 % проєкт залишається високоефективним, а значення NPV залишається додатним.

3.3.2 Аналіз впливу зміни річного економічного ефекту

Найбільший вплив на економічну ефективність має величина щорічної економії, табл.3.4.

Таблиця 3.4 – Чутливість проєкту до зміни економічного ефекту

Зміна економічного ефекту	Річний ефект, грн	NPV, грн
-30 %	839 689	1 809 520
-20 %	959 645	2 206 926
-10 %	1 079 600	2 604 548
0 %	1 199 556	3 002 171
+10 %	1 319 512	3 399 793
+20 %	1 439 467	3 797 415

Навіть при зниженні економічного ефекту на 30 % значення NPV залишається позитивним, що свідчить про високу стійкість проєкту.

3.3.3 Аналіз впливу тарифу на електроенергію

Частина економічного ефекту формується за рахунок зменшення споживання електроенергії. Тому тариф на електроенергію є одним із важливих факторів, табл.3.5.

Таблиця 3.5 – Вплив зміни тарифу на електроенергію

Тариф, грн/кВт·год	Річна економія електроенергії, грн
6,0	324 000
7,0	378 000
8,0	432 000
9,0	486 000
10,0	540 000

Зі зростанням вартості електроенергії економічна ефективність модернізації підвищується, оскільки збільшується вартість зекономлених енергоресурсів.

3.3.4 Аналіз впливу ставки дисконтування

Для оцінки інвестиційної привабливості проєкту проведемо розрахунок NPV при різних значеннях ставки дисконту, табл.3.6.

Таблиця 3.6 – Вплив ставки дисконтування на *NPV*

Ставка дисконту, %	<i>NPV</i> , грн
10	3 527 900
15	3 002 171
20	2 578 481
25	2 233 850
30	1 949 112

Навіть при ставці дисконту 30 % проект залишається ефективним, оскільки значення *NPV* залишається додатним.

3.3.5 Визначення критичного значення економічного ефекту

Критичним вважається таке значення річного економічного ефекту, при якому: $NPV=0$

Для даного проекту мінімально допустимий річний економічний ефект становить приблизно: $E_{кр} \approx 305\,000$ грн/рік.

Запас фінансової стійкості:

$$Z = ((1\,199\,556 - 305\,000) / 1\,199\,556) \cdot 100\% \\ Z \approx 74,6\%$$

Таким чином, фактичний економічний ефект може зменшитися майже на три чверті, і проект все одно залишатиметься економічно доцільним.

3.3.6 Сценарний аналіз

Для комплексної оцінки ризиків розглянемо три сценарії розвитку проекту, табл.3.7.

Таблиця 3.7 – Сценарний аналіз

Показник	Песимістичний	Базовий	Оптимістичний
Капітальні витрати, грн	1 224 000	1 020 000	950 000
Річний економічний ефект, грн	900 000	1 199 556	1 450 000
<i>NPV</i> , грн	1 560 000	3 002 171	4 250 000
<i>PI</i>	2,27	3,94	5,47
Термін окупності, років	1,36	0,85	0,66

У всіх сценаріях значення *NPV* є додатним, а термін окупності не перевищує півтора року.

3.4 Висновки до розділу

Встановлено, що впровадження системи покращення режимів роботи шлаковоза забезпечує:

- 1) зниження втрат від буксування колісних пар;
- 2) збільшення ресурсу бандажів на 50 %;
- 3) скорочення ремонтних витрат редукторів на 20 %;
- 4) скорочення ремонтних витрат тягових двигунів на 18 %;
- 5) загальний річний економічний ефект 1,20 млн грн.

Основні показники ефективності інвестицій зведені у табл.3.8.

Таблиця 3.8 – Основні показники ефективності інвестицій

Показник	Значення
Капітальні вкладення	1,02 млн грн
Річний економічний ефект	1,20 млн грн
Простий термін окупності	0,85 року
NPV	3,00 млн грн
PI	3,94
IRR	112 %

Отримані результати підтверджують високу економічну ефективність модернізації електропривода шлаковоза та доцільність впровадження запропонованих технічних рішень у конвертерному цеху ПрАТ «Камет-Сталь».

Проведений аналіз чутливості показав, що проект модернізації системи керування шлаковозом є стійким до зміни основних економічних параметрів.

Основні результати аналізу:

- 1) найбільший вплив на ефективність має величина річного економічного ефекту;
- 2) зміна капітальних вкладень у межах ± 20 % не призводить до втрати інвестиційної привабливості;
- 3) проект залишається ефективним навіть при ставці дисконту до 30%;
- 4) запас фінансової стійкості становить близько 75 %;
- 5) у всіх розглянутих сценаріях значення NPV є додатним.

Отже, модернізація електропривода шлаковоза та впровадження системи протибуксального керування характеризуються високою економічною стійкістю, низьким рівнем інвестиційного ризику та можуть бути рекомендовані до впровадження в умовах конвертерного цеху ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ».



4 БЕЗПЕКА ПРАЦІ У ПРЕДМЕТНІЙ ОБЛАСТІ

4.1 Загальна характеристика умов праці в конвертерному цеху ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ»

Конвертерний цех ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» належить до виробництв із підвищеним рівнем професійного ризику та характеризується наявністю значної кількості небезпечних і шкідливих виробничих факторів. Технологічний процес виробництва сталі пов'язаний із використанням високотемпературних агрегатів, переміщенням великих мас рідкого металу та шлаку, експлуатацією потужного електромеханічного обладнання, вантажопідіймальних механізмів та промислового транспорту.

Особливістю конвертерного виробництва є поєднання у межах одного виробничого простору джерел теплового, механічного, електричного, хімічного та психофізіологічного впливу на працівників. У зв'язку з цим забезпечення безпечних умов праці є одним із найважливіших завдань під час експлуатації технологічного обладнання та транспортних засобів, зокрема шлаковозів.

Шлаковоз є складовою транспортної системи конвертерного цеху та призначений для транспортування ковшів із рідким шлаком від місця його утворення до шлакових відвалів або дільниць подальшої переробки. Робота шлаковоза здійснюється в умовах підвищеної температури навколишнього середовища, значного теплового випромінювання та інтенсивного руху технологічного транспорту, що обумовлює необхідність особливої уваги до питань охорони праці.

Технологічний цикл роботи конвертерного цеху супроводжується виконанням таких операцій:

- виплавка сталі у кисневих конвертерах;
- випуск рідкої сталі;
- зливання та транспортування шлаку;
- обслуговування технологічних агрегатів;
- переміщення вантажів мостовими кранами;
- транспортування ківшів залізничним технологічним транспортом.

Кожна із зазначених операцій створює потенційну небезпеку для персоналу та вимагає застосування комплексу технічних і організаційних заходів безпеки.

З точки зору охорони праці умови роботи в конвертерному цеху характеризуються значним тепловим навантаженням. Температура рідкого металу під час випуску становить близько 1600 °С, а температура шлаку може досягати 1300–1500 °С. У зоні розташування шлакових ківшів виникають потужні потоки інфрачервоного випромінювання, які впливають як на персонал, так і на елементи електрообладнання. Тривалий вплив теплового випромінювання може призводити до перегрівання організму



працівників, зниження працездатності та підвищення ризику виробничого травматизму.

Одним із найбільш небезпечних факторів є можливість контакту працівників із рідким металом або шлаком. Порушення технології транспортування, пошкодження ківшів або виникнення аварійних ситуацій можуть призвести до розливу розплавлених матеріалів, що супроводжується ризиком отримання важких термічних опіків та виникнення пожеж.

Під час роботи конвертерного цеху у повітря робочої зони надходять пил та газоподібні продукти металургійного виробництва. Основними шкідливими речовинами є:

- оксид вуглецю;
- оксиди азоту;
- діоксид сірки;
- металевий пил;
- аерозолі оксидів заліза;
- частинки шлаку.

Наявність пилогазових викидів негативно впливає на органи дихання працівників та може спричиняти професійні захворювання. Для забезпечення нормативних умов праці застосовуються системи загальнообмінної та місцевої вентиляції, а також засоби індивідуального захисту органів дихання.

Важливим фактором виробничого середовища є шум. Основними джерелами шуму виступають:


- кисневі конвертери;
- компресорне обладнання;
- вентилятори газоочисток;
- мостові крани;
- електричні машини;
- залізничний технологічний транспорт.

Рівні шуму в окремих виробничих зонах можуть перевищувати допустимі значення, що призводить до підвищеної втомлюваності персоналу, зниження концентрації уваги та професійних захворювань органів слуху.

Крім шуму, на працівників впливають вібрації, що виникають під час роботи технологічного обладнання та руху шлаковозів по рейкових коліях. Тривалий вплив вібрації може негативно позначатися на стані опорно-рухового апарату та нервової системи працівників.

Особливу небезпеку становить електричний струм. У конвертерному цеху експлуатується велика кількість електрообладнання напругою до 1000 В і вище. До такого обладнання належать:

- тиристорні перетворювачі;
- тягові двигуни шлаковозів;
- кранове електрообладнання;
- трансформаторні підстанції;

- 
- силові розподільчі пристрої;
 - кабельні мережі.

Можливість пошкодження ізоляції, виникнення коротких замикань або появи напруги на металевих конструкціях вимагає застосування надійних систем захисного заземлення, автоматичного відключення живлення та постійного контролю технічного стану електрообладнання.

Суттєвим джерелом небезпеки є рухомий технологічний транспорт. У межах конвертерного цеху одночасно можуть працювати:

- шлаковози;
- сталевози;
- локомотиви;
- мостові крани;
- спеціалізовані транспортні машини.

Під час руху транспортних засобів існує ризик наїзду на працівників, зіткнення рухомого складу або сходження його з рейок. Саме тому особливого значення набуває технічний стан тягового електропривода шлаковоза, який повинен забезпечувати точне регулювання швидкості, плавний пуск і надійне гальмування.

Для машиніста шлаковоза характерним є значне психофізіологічне навантаження. Під час керування транспортним засобом необхідно одночасно контролювати:

- стан рейкової колії;
- швидкість руху;
- стан ковша зі шлаком;
- сигнали технологічного персоналу;
- параметри електропривода;
- дорожню обстановку на маршруті руху.

Висока відповідальність за безпечне транспортування рідкого шлаку вимагає постійної концентрації уваги та швидкого прийняття рішень у нестандартних ситуаціях.

Модернізація електропривода шлаковоза на базі системи «тиристорний випрямляч – двигун постійного струму» спрямована не лише на покращення енергетичних та експлуатаційних показників, а й на підвищення рівня безпеки праці. Завдяки плавному регулюванню швидкості, обмеженню пускових струмів, зменшенню буксування колісних пар та підвищенню стійкості руху знижується ймовірність виникнення аварійних ситуацій під час транспортування шлаку.

Таким чином, умови праці в конвертерному цеху ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» характеризуються комплексним впливом небезпечних і шкідливих виробничих факторів різної природи. Забезпечення безпечної експлуатації шлаковоза потребує впровадження сучасних технічних рішень у галузі електропривода, автоматизації, електробезпеки та охорони праці, що дозволяє мінімізувати виробничі ризики та створити безпечні умови роботи персоналу.

4.2 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Під час експлуатації шлаковоза в конвертерному цеху на працівників можуть впливати наступні небезпечні та шкідливі виробничі фактори.

Фізичні фактори:

- рухомі частини машин та механізмів;
- рухомий залізничний транспорт;
- підвищена температура поверхонь обладнання;
- теплове випромінювання від шлакових ковшів;
- підвищений рівень шуму;
- вібрації;
- підвищена запиленість повітря;
- недостатня освітленість окремих виробничих зон;
- підвищена напруга електричних мереж.

Хімічні фактори.

У зоні роботи шлаковоза можуть утворюватися:

- оксид вуглецю (CO);
- діоксид сірки (SO₂);
- оксиди азоту;
- металевий пил;
- аерозолі металургійного виробництва.

Психофізіологічні фактори.

До психофізіологічних факторів належать:

- висока відповідальність за безпечне транспортування ковшів;
- підвищене нервово-емоційне навантаження;
- необхідність тривалої концентрації уваги;
- робота в умовах обмеженої видимості та високої температури.

4.3 Аналіз безпеки ураження електричним струмом


Система електропривода шлаковоза живиться від трифазної мережі змінного струму напругою 380/660 В. Тиристорний випрямляч формує регульовану напругу для двигуна постійного струму.

Основними причинами ураження електричним струмом можуть бути:

- пошкодження ізоляції кабелів;
- дотик до струмоведучих частин;
- порушення захисного заземлення;
- поява напруги на металевих корпусах обладнання;
- помилки персоналу під час ремонту.

Для забезпечення електробезпеки передбачаються:

- захисне заземлення корпусів електрообладнання;
- автоматичне відключення живлення при коротких замиканнях;
- блокування дверей електрошаф;
- застосування попереджувальної сигналізації;
- використання діелектричних засобів захисту.



Опір контуру заземлення повинен відповідати вимогам чинних нормативних документів та забезпечувати надійне спрацювання захистів.

4.4 Заходи щодо захисту від теплового випромінювання

Одним із найбільш небезпечних факторів є інтенсивне теплове випромінювання від ківшів з рідким шлаком.

Для зниження впливу теплового випромінювання необхідно:

- застосовувати теплозахисні екрани;
- використовувати кабіни машиніста із теплоізоляцією;
- встановлювати термостійке скло;
- застосовувати системи кондиціонування та вентиляції;
- використовувати спеціальний термостійкий спецодяг.

Працівники повинні бути забезпечені:

- костюмами металурга;
- теплоізоляційним взуттям;
- захисними окулярами;
- щитками для захисту обличчя;
- захисними рукавицями.

4.5 Захист від шуму та вібрацій

Основними джерелами шуму є:

- тягові двигуни;
- редуктори;
- колісні пари;
- рейкові стики;
- робота конвертерного обладнання.

Рівень шуму в окремих виробничих зонах може перевищувати допустимі значення.

Для зниження шуму передбачаються:

- застосування вібродемпфуючих матеріалів;
- регулярне обслуговування редукторів;
- балансування обертових елементів;
- шумоізоляція кабіни машиніста.

Персонал повинен використовувати індивідуальні засоби захисту органів слуху.

4.6 Забезпечення пожежної безпеки

Умови конвертерного виробництва характеризуються наявністю джерел займання та значної кількості електрообладнання.

Основними причинами виникнення пожеж можуть бути:

- короткі замикання;
- перегрів електрообладнання;
- пошкодження кабельних ліній;
- порушення технологічного процесу.



Для забезпечення пожежної безпеки передбачаються:

- автоматичні вимикачі захисту;
- контроль температури двигунів;
- застосування негорючих кабелів;
- використання вогнестійких матеріалів.

Первинними засобами пожежогасіння повинні бути:

- вуглекислотні вогнегасники;
- порошкові вогнегасники;
- пожежні крани;
- ящики з піском.

Усі працівники повинні проходити первинний та повторний протипожежний інструктаж.

4.7 Безпека під час модернізації електропривода

Під час виконання монтажних і налагоджувальних робіт необхідно дотримуватися вимог безпеки при роботі в електроустановках.

До робіт допускається персонал, який:

- пройшов навчання з охорони праці;
- має відповідну групу з електробезпеки;
- пройшов медичний огляд;
- ознайомлений з проєктною документацією.

Перед початком робіт необхідно:

- 1) зняти напругу;
- 2) виконати перевірку відсутності напруги;
- 3) встановити переносні заземлення;
- 4) вивісити попереджувальні плакати;
- 5) оформити наряд-допуск.

4.8 Вплив запропонованої модернізації на безпеку праці

Впровадження системи автоматичного регулювання електропривода шлаковоза дозволяє суттєво підвищити рівень безпеки праці.

Основні переваги модернізації:

- 1) зменшення буксування колісних пар;
- 2) підвищення стійкості руху шлаковоза;
- 3) зменшення динамічних ударів;
- 4) зниження ризику сходу з рейок;
- 5) автоматичне обмеження перевантажень двигуна;
- 6) покращення умов праці машиніста;
- 7) підвищення надійності транспортного процесу.

Використання тиристорного електропривода забезпечує плавний пуск і гальмування, що знижує механічні навантаження на обладнання та підвищує загальну безпеку експлуатації.

4.9 Розрахунок штучного освітлення машинного залу

Вихідні дані. Для забезпечення безпечної експлуатації електропривода шлаковоза необхідно створити нормативні умови освітлення машинного залу.

Розміри машинного залу де встановлені тиристорні перетворювачі:

1) довжина приміщення $A = 24$ м;

2) ширина приміщення $B = 12$ м;

3) висота приміщення $H = 6$ м.

Площа приміщення:

$$S = A \cdot B$$
$$S = 24 \cdot 12 = 288 \text{ м}^2.$$

Для машинних залів електротехнічних установок нормативна освітленість становить: $E_n = 300$ лк.

Джерелом світла приймаємо сучасні світлодіодні світильники промислового виконання.

Світловий потік одного світильника: $\Phi_{\text{л}} = 18000$ лм.

Коефіцієнт запасу: $K_3 = 1,5$.

Коефіцієнт нерівномірності: $Z = 1,1$.

Коефіцієнт використання світлового потоку: $\eta = 0,60$.

Визначення індексу приміщення. Індекс приміщення визначається за формулою:

$$i = (A \cdot B) / (h_p \cdot (A + 1B))$$

де h_p – висота підвісу світильників над робочою поверхнею.

Приймаємо: $h_p = 5$ м.

Тоді: $i = (24 \cdot 12) / (5 \cdot (24 + 12))$; $i = 288 / 180$; $i = 1,6$.

Для індексу приміщення $i = 1,6$ приймаємо: $\eta = 0,60$.

Визначення необхідного світлового потоку. Загальний світловий потік освітлювальної установки: $\Phi_{\Sigma} = (E_n \cdot A \cdot B \cdot K_3 \cdot Z) / \eta$

Підставляємо значення:

$$\Phi_{\Sigma} = (300 \cdot 288 \cdot 1,5 \cdot 1,1) / 0,60$$
$$\Phi_{\Sigma} = 237600 \text{ лм.}$$

Визначення кількості світильників. Кількість світильників:

$$N = \Phi_{\Sigma} / \Phi_{\text{л}}$$
$$N = 237600 / 18000$$
$$N = 13,2.$$

Приймаємо: $N = 14$ світильників.

Перевірка фактичної освітленості. Фактичний світловий потік:

$$\Phi\phi = 14 \cdot 18000$$

$$\Phi\phi = 252000 \text{ лм.}$$

Фактична освітленість:

$$E\phi = (\Phi\phi \cdot \eta) / (S \cdot K_3 \cdot Z)$$
$$E\phi = (252000 \cdot 0,60) / (288 \cdot 1,5 \cdot 1,1)$$
$$E\phi = 353 \text{ лк.}$$

Розміщення світильників. Світильники розташовуються у двох рядах по сім світильників у кожному, табл.4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри освітлювальної установки

Показник	Значення
Площа приміщення	288 м ²
Нормативна освітленість	300 лк
Тип світильника	LED промисловий
Світловий потік одного світильника	18000 лм
Кількість світильників	14 шт
Фактична освітленість	353 лк

4.10 Висновки до розділу

Проведений аналіз показав, що експлуатація шлаковоза в умовах конвертерного цеху супроводжується впливом комплексу небезпечних та шкідливих виробничих факторів, серед яких найбільш значущими є підвищена температура, теплове випромінювання, електричний струм, шум, вібрація та рухомі механізми.

Запропонована модернізація системи електропривода на базі системи «тиристорний випрямляч – двигун постійного струму» забезпечує не лише покращення техніко-економічних показників роботи шлаковоза, але й підвищення рівня безпеки праці за рахунок плавного регулювання швидкості, зменшення буксування колісних пар, обмеження перевантажень та підвищення надійності транспортного процесу.

Комплекс запропонованих організаційних і технічних заходів дозволяє забезпечити відповідність умов праці вимогам охорони праці, промислової та пожежної безпеки на металургійних підприємствах.

У результаті розрахунку встановлено, що для машинного залу площею 288 м² необхідно встановити 14 промислових світлодіодних світильників зі світловим потоком 18000 лм кожний. При цьому забезпечується фактична освітленість 353 лк, що перевищує нормативне значення 300 лк та створює безпечні умови праці для обслуговуючого персоналу електропривода шлаковоза.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі на тему «Покращення режимів роботи шлаковозу в умовах конвертерного цеху ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ»» виконано комплексний аналіз конструктивних, електромеханічних та енергетичних аспектів роботи шлаковоза, а також розроблено та обґрунтовано заходи щодо підвищення ефективності та надійності його електропривода.

У першому (аналітичному) розділі встановлено особливості технологічного процесу транспортування шлаку в умовах конвертерного цеху, визначено основні фактори, що впливають на роботу шлаковоза, зокрема значні інерційні навантаження, часті пуски та гальмування, нерівномірність розподілу навантаження на колісні пари та ризик втрати зчеплення з рейковою колією. Показано, що існуючі режими роботи супроводжуються підвищеними втратами енергії та зниженням ресурсу механічного обладнання.


У спеціальному розділі проведено детальний аналіз електромеханічної системи шлаковоза, виконано розрахунок навантажувальних діаграм, параметрів двигуна та тиристорного перетворювача, а також побудовано математичну модель електропривода. Обґрунтовано вибір системи «тиристорний випрямляч – двигун постійного струму», яка забезпечує високий пусковий момент, широкий діапазон регулювання швидкості та можливість реалізації двоконтурної системи автоматичного керування.

Розроблено структурну схему електропривода та виконано синтез системи автоматичного регулювання зі струмовим контуром та контуром електрорушійної сили. Проведено розрахунок налаштувань регуляторів, що дозволило забезпечити високу швидкодію системи, стабільність перехідних процесів та зменшення динамічних навантажень на елементи привода.

Окрему увагу приділено аналізу умов втрати зчеплення колісних пар із рейкою та причинам виникнення буксування. Встановлено, що основними чинниками є нерівномірний розподіл навантаження, різкі пускові режими та недостатня керованість тягового моменту. Запропоновані рішення дозволяють зменшити інтенсивність буксування та підвищити стійкість руху шлаковоза.

У роботі також виконано економічне обґрунтування запропонованих заходів, яке показало, що модернізація електропривода забезпечує суттєве зниження витрат на електроенергію, ремонт та обслуговування обладнання. Розраховані показники ефективності (NPV, IRR, PI) підтверджують високу інвестиційну привабливість проекту та короткий термін його окупності.

У розділі з безпеки праці проаналізовано умови роботи персоналу в конвертерному цеху, визначено основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, включаючи теплове випромінювання, шум, вібрацію, пил, а



також ризики ураження електричним струмом. Запропоновані технічні та організаційні заходи дозволяють підвищити рівень безпеки праці та зменшити виробничі ризики.

У результаті виконаної роботи доведено, що впровадження сучасної системи електропривода шлаковоза на базі тиристорного перетворювача та двигуна постійного струму забезпечує:

- покращення динамічних характеристик транспортної системи;
- зменшення буксування колісних пар;
- підвищення енергоефективності процесу транспортування шлаку;
- зниження експлуатаційних витрат;
- підвищення надійності та ресурсу обладнання;
- покращення умов і безпеки праці персоналу.

Таким чином, мета бакалаврської роботи досягнута, а поставлені завдання виконані в повному обсязі. Отримані результати підтверджують доцільність впровадження запропонованих технічних рішень у конвертерному цеху ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» та можуть бути використані при модернізації діючих шлаковозів на металургійних підприємствах.

Публікації. За результатами виконаних у бакалаврській роботі досліджень опубліковано 3 статті у журналах, збірниках наукових праць і матеріалів науково-технічних конференцій [32-34].



ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кузнєцов Б. І., Нікітін В. В. Автоматизовані електроприводи машин та установок : навч. посіб. Харків : НТУ «ХПІ», 2013. 312 с.
2. ДСТУ EN 15595:2018. Залізничний транспорт. Гальмування. Захист від ковзання коліс. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 48 с.
3. Браславський І. Я., Ільїнський Н. Ф., Садовий О. В. Енергозберігаючий асинхронний електропривод : навч. посіб. Київ : Кондор, 2007. 206 с.
4. Попович М. Г. Теорія електропривода : підручник. Київ : Вища шк., 1993. 494 с.
5. Попович М. Г., Лозинський О. Ю. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи : навч. посіб. Київ : Либідь, 2005. 680 с.
6. Бондаренко Є. В. Основи теорії тяги поїздів : навч. посіб. Дніпро : НГУ, 2017. 167 с.
7. Гребенюк П. Т. Тягові розрахунки залізниць : підручник. Київ : Транспорт України, 2011. 365 с.
8. Сич Є. М., Козаченко Д. М., Соболевська Ю. Г. Залізничний транспорт України : навч. посіб. Київ : Логос, 2014. 444 с.
9. Правила технічної експлуатації залізниць України. Київ : Міністерство інфраструктури України, 2020. 356 с.
10. Bose B. K. Modern Power Electronics and AC Drives. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2002. 711 p.
11. Krishnan R. Electric Motor Drives: Modeling, Analysis and Control. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2001. 626 p.
12. Leonhard W. Control of Electrical Drives. 3rd ed. Berlin : Springer, 2001. 420 p.
13. Pyrhonen J., Jokinen T., Hrabovcova V. Design of Rotating Electrical Machines. 2nd ed. Chichester : Wiley, 2014. 538 p.
14. Steimel A. Electric Traction – Motive Power and Energy Supply. Munich : Oldenbourg Verlag, 2014. 334 p.
15. Iwnicki S. Handbook of Railway Vehicle Dynamics. Boca Raton : CRC Press, 2006. 535 p.
16. Knothe K., Stichel S. Rail Vehicle Dynamics. Cham : Springer, 2017. 319 p.
17. Lewis R., Olofsson U. Wheel–Rail Interface Handbook. Cambridge : Woodhead Publishing, 2009. 640 p.
18. Esveld C. Modern Railway Track. 2nd ed. Zaltbommel : MRT Productions, 2001. 653 p.
19. Sadeghi J. Railway Transportation Systems: Design, Construction and Operation. Boca Raton : CRC Press, 2021. 522 p.
20. Fitzgerald A. E., Kingsley C., Umans S. D. Electric Machinery. 7th ed. New York : McGraw-Hill, 2014. 688 p.
21. IEC 61800-1:2017. Adjustable Speed Electrical Power Drive



Systems. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2017.

22. Goodall R., Roberts C. Concepts and Techniques for Railway Condition Monitoring. London : Railway Technical Publications, 2015. 287 p.

23. Wittenburg J. Dynamics of Systems of Rigid Bodies. Berlin : Springer, 2008. 245 p.

24. Kalker J. J. Three-Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1990. 314 p.

25. Shabana A. A. Dynamics of Multibody Systems. 4th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 392 p.

26. Martyushev N.V. et al. Mathematical Modeling the Performance of an Electric Vehicle DOI: <https://doi.org/10.3390/math11112586>

27. Malozyomov B.V. et al. Mathematical Modelling of Traction Equipment Parameters of Electric Cargo Trucks DOI: <https://doi.org/10.3390/math12040577>

28. Senchenko S.O. et al. Slip modes modeling of electric vehicle asynchronous electric drive DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2023-4-1>

29. Popov S.V. et al. Design of mathematical model of electric car DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.50612>

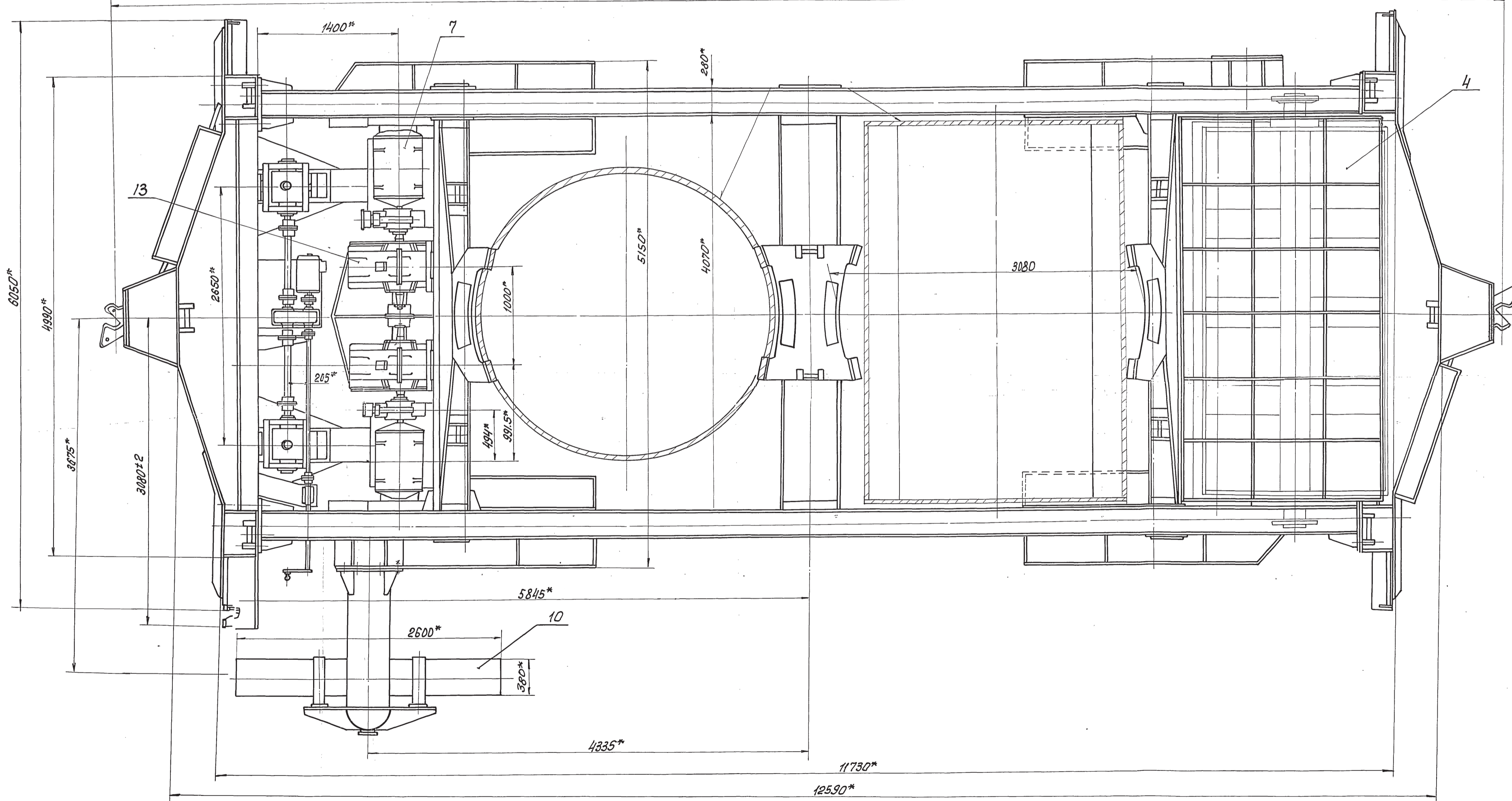
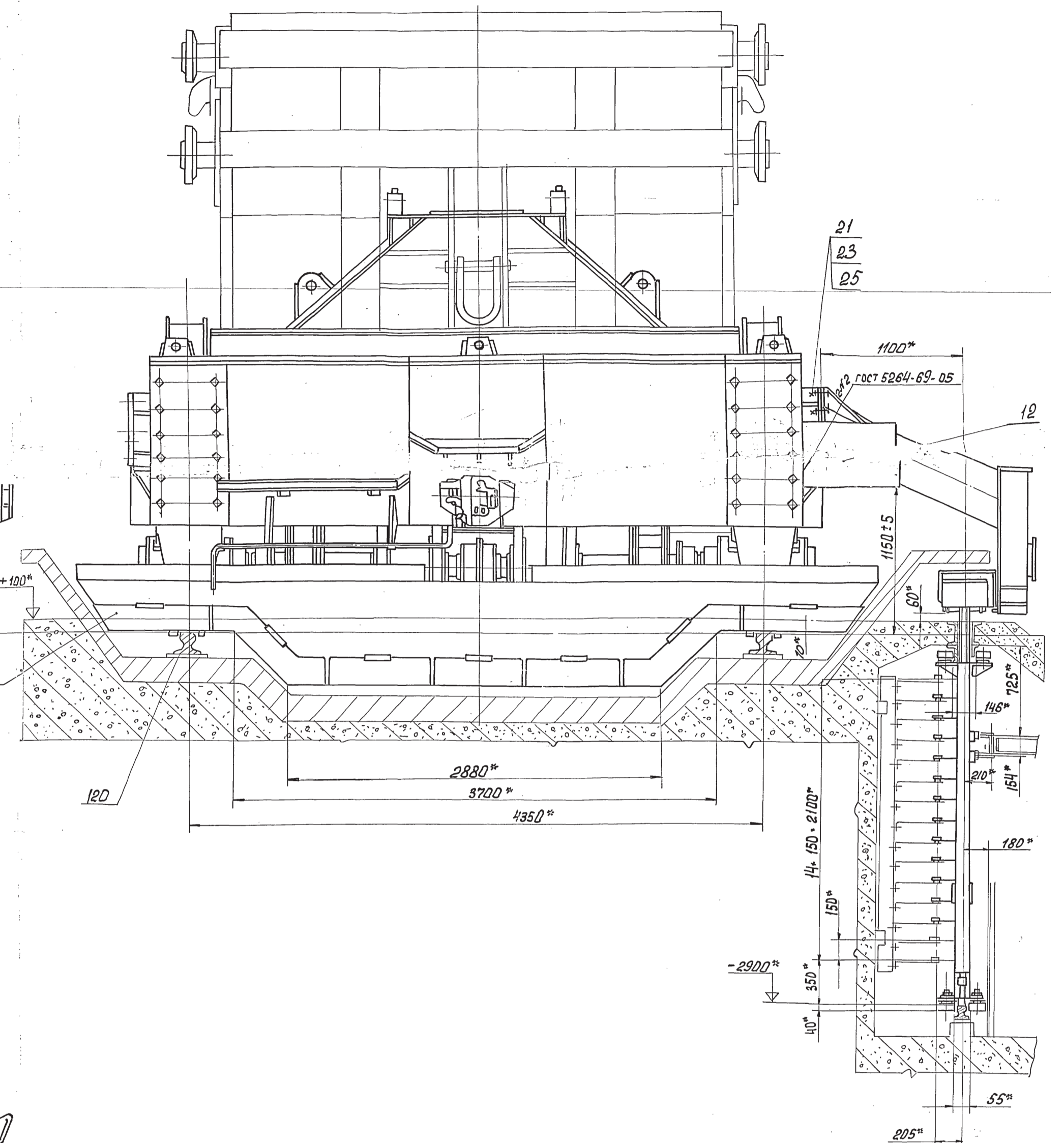
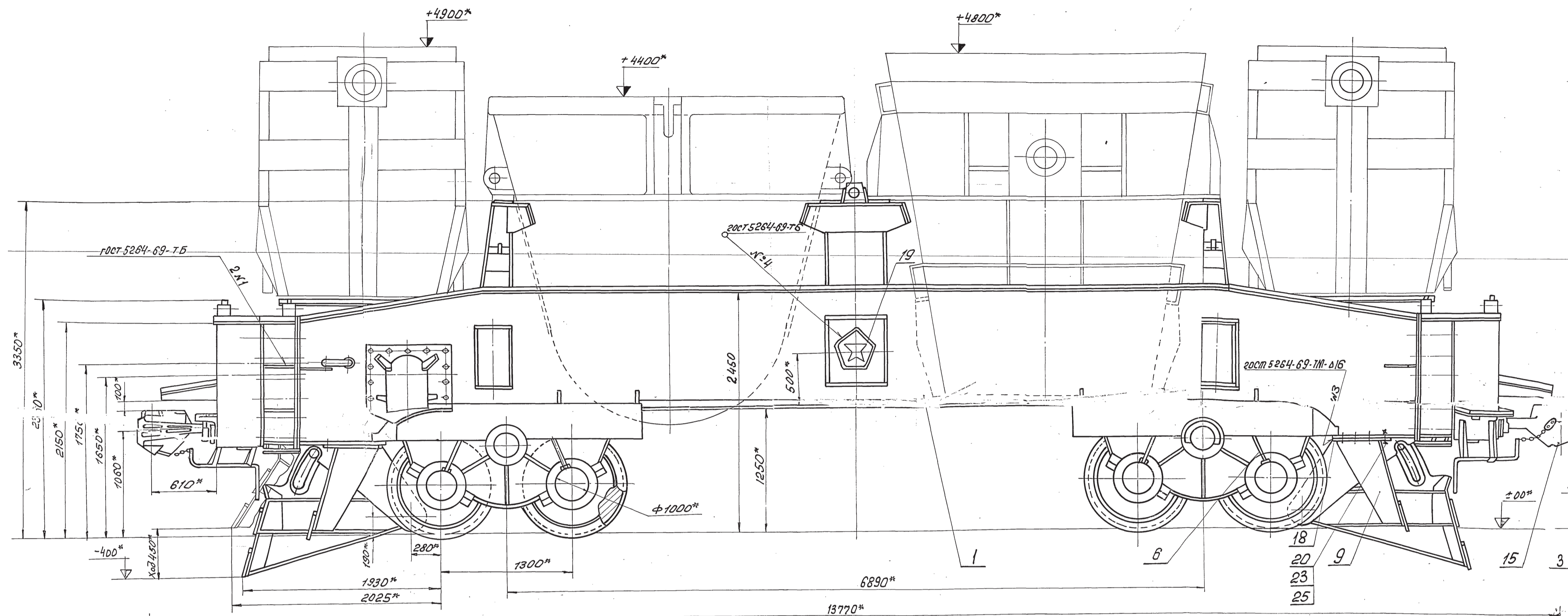
30. Urazel B. et al. Electric Drive Vehicle Model and Simulation with MATLAB DOI: <https://doi.org/10.21597/jist.705205>

31. Soroka K.O. Equations of motion of electric vehicle DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/46056>

32. Стрункін Г.М, Михайлов В.Ю., Койфман О.О., Хілов В.С., Косенко Р.Г. Досвід розробки автоматизованого електроприводу перегінного комплексу для кар'єрних екскаваторів. / Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки, №5, 2025, р.99-107 DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-11>.

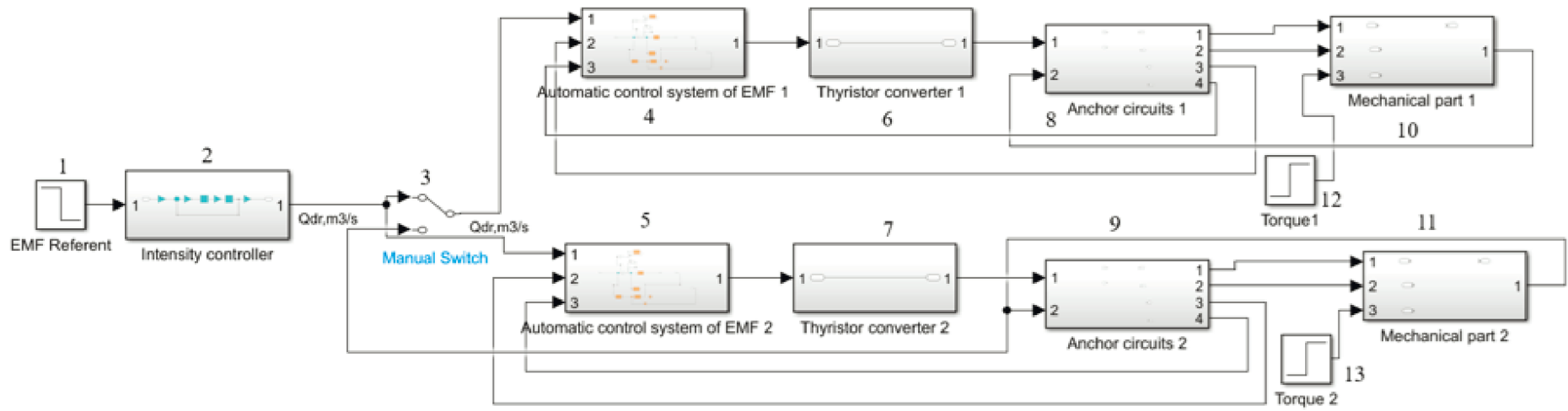
33. Косенко Р.Г., Сніговий Д.В., Хілов В.С. Розробка математичної моделі та дослідження режимів роботи шлаковозу в умовах конвертерного цеху ПРАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ». Матеріали Шістнадцятої Міжнародної наукової конференції студентів та молодих вчених «Сучасні інформаційні технології – 2026» «Modern Information Technology – 2026» (14-15 травня 2026 р., м. Одеса) / МОН України; Національний університет «Одеська політехніка»; Ін-т комп'ют. систем. – Одеса : Наука і техніка, 2026. С.409-412. https://drive.google.com/drive/folders/1uXN7b84231YhSfT_tY6l9eMhPjDr1BKJ

34. Косенко Р.Г., Сніговий Д.В., Хілов В.С. Покращення динаміки тиристорного приводу постійного струму шлаковозу конверторного цеху ПРАТ «КАТЕТ-СТАЛЬ». Збірник тез та анотацій наукових доповідей. Одеса, 2025, Олді+. С.160-163. URL: <https://dspace.mipolytech.education/items/6e2cb261-1e14-4ed9-a6a8-8c2c1c9543c8>



Технічні характеристики:
 вантажопідйомність – 320 тс;
 Навантаження на одну вісь – 54 тс;
 Швидкість руху шлаковоза – 3,82 км/год;
 Максимальне припустиме прискорення -0,2 м/с²;
 тяговий двигун Д806: 32 кВт, 1000 об/хв, паралельного збудження, 220 В;
 редуктор механізму пересування ВКУ-950, і=52,32;
 діаметр ходових коліс – 1 м;
 маса завантаженого шлаковозу – 44 т;
 момент інерції механізму, зведений до валу двигуна - 4,5 кг м;
 маса порожнього шлаковозу – 13 т;
 діапазон регулювання 1:5.

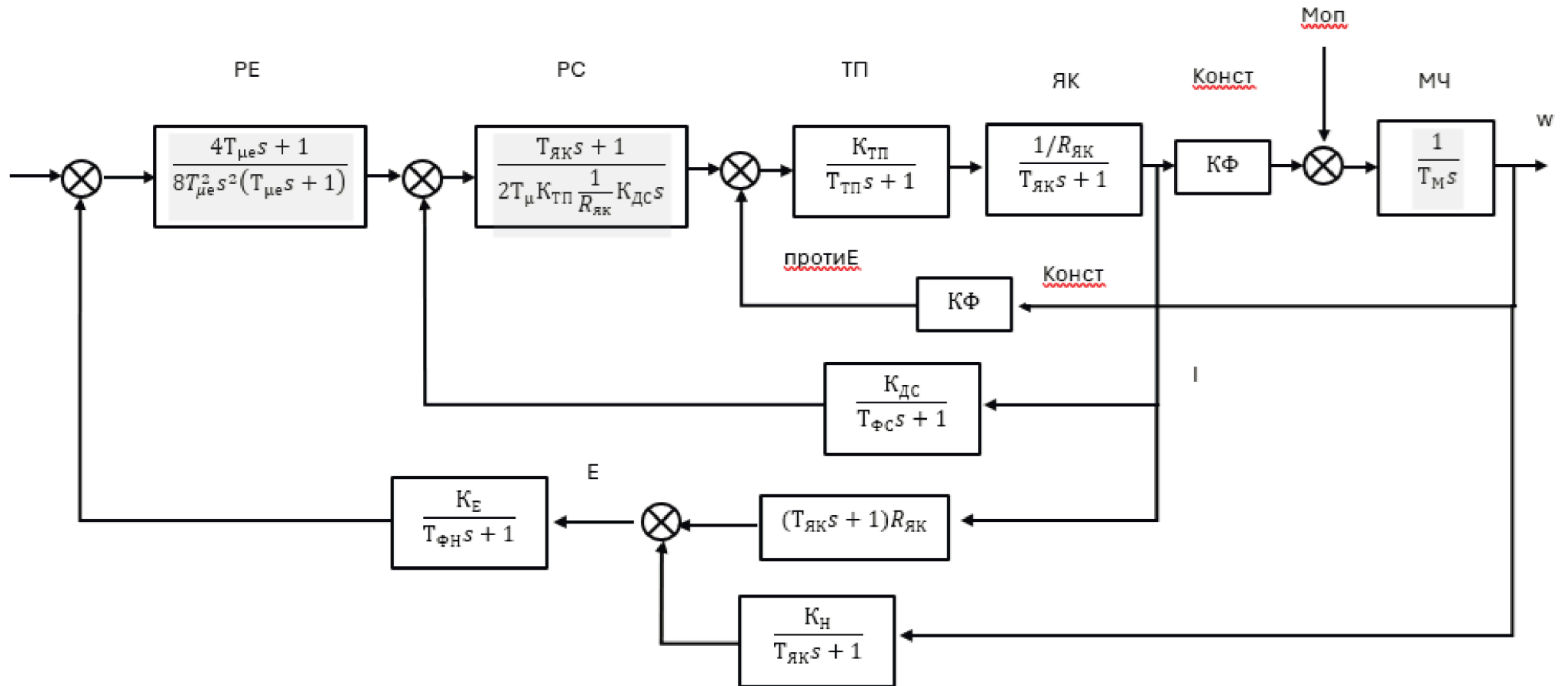
АВЕРС.КРБ 12427822 ЕТР-РР					
Конвертерний цех ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ»					
Зм.	Кіл.	Арх.	Док.	Підп.	Дата
Розроб.	Косенко Р. Г.				
Перевір.	Хлюв В. С.				
Т.контр.					
Шлаковоз				Студія	Архіви
				Н	1 4
Схема розташування електромеханічного обладнання				ТВО "ІНВЕСТ ПОЛТЕХНІКА" ФАВІТ, АВЕРС, ЕІ-23-1п, 2026	
Н.контр. Затверд.					



Позначено:

- 1. EMF Reference – блок завдання ЕРС, здійснює команди на стрибок завдання ЕРС;
- 2. Intensity Controller – блок задавача інтенсивності, який обмежує прискорення; 3. Manual Switch – перемикач завдання на ЕРС;
- 4, 5. Automatic Control System EMF 1, 2 – системи автоматичного керування ЕРС першого та другого приводів;
- 6, 7. Thyristor Converter 1, 2 – тиристорний перетворювач, реалізує залежність вихідної напруги від кута керування та формує напругу живлення двигуна.
- 8, 9 Anchor circuit 1, 2 – якорні кола першого та другого приводів;
- 10, 11 Mechanical part 1, 2 – механічні частини першого та другого приводів;
- 12, 13 Torque 1, 2 – блоки завдання моментів опору

						АВЕРС.КРБ 12427822 ЕТР-Е2					
						Конвертерний цех ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ»					
Зм.	Кіл.	Арк.	Док.	Підп.	Дата	Шлаковоз					
Разроб.	Косенко Р. Г.								Стадія	Аркуш	Аркушів
Перевір.	Хілов В. С.								Н	2	4
Т.контр.											
Н.контр											
Затверд						Функціональна схема системи керування ТВО "ТУ "МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА" ФАВІТ, АВЕРС, ЕІ-23-1п, 2026					



Зм.	Кіл.	Арк.	Док.	Підп.	Дата
Разроб.	Косенко Р. Г.				
Перевір.	Хілов В. С.				
Т.контр.					
Н.контр					
Затверд					

АВЕРС.КРБ 12427822 ЕТР-Е1

Конвертерний цех ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ»

Шлаковоз

Структурна схема системи керування

Стадія	Аркуш	Аркушів
Н	3	4

ТВО "ТУ "МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА"
ФАВІТ, АВЕРС,
Е1-23-1п, 2026

