

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 «Модернізація електроприводу скіпового підйомника ДП-9
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

Дмитро СНІГОВИЙ

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

02.03.2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Снігового Дмитра Володимировича

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи Модернізація електроприводу скіпового підйомника ДП-9 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 Від 23.02.2026 року № 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.

5. Перелік графічного (демонстраційного) матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 1. Електрична принципова схема силового кола системи ТП-Д скіпового підйомника ДП-9; 2. Функціональна схема системи управління електроприводом скіпового підйомника ДП-9; 3. Структурна схема лінеаризованої двоконтурної САР електроприводу скіпового підйомника ДП-9; системи керування. 4. Структурна схема імітаційної моделі MATLAB/Simulink тта результати моделювання.

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 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін складання рукопису кваліфікаційної 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

Дмитро СНІГОВИЙ

Керівник роботи

Віктор ХІЛОВ

АНОТАЦІЯ

Сніговий Дмитро Володимирович. Модернізація електроприводу скіпового підйомника ДП-9 ПрАТ «Камет-Сталь». 73 сторінок машинописного тексту, 7 рисунків, 18 таблиць, 22 джерело. Кваліфікаційна праця на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавра за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (G3 Електрична інженерія). ОПП «Інженіринг електропостачання та електромеханічних систем у металургії та гірництві. ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, 2026.

Об'єкт дослідження: система електроприводу скіпового підйомника ДП-9 ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ».

Предмет дослідження: процеси регулювання швидкості та струму в замкненій системі «тиристорний перетворювач – двигуни постійного струму» при роботі скіпового підйомника.

Мета роботи: розробка та дослідження автоматизованої системи управління модернізованого електроприводу скіпового підйомника ДП-9 на базі тиристорного перетворювача КТЕ5-АС-1к/600 при збереженні двигунів постійного струму ДП 74/34-6.

У першому розділі наведено аналіз виробничої бази ПрАТ «Камет-Сталь», конструкції та режимів роботи скіпового підйомника ДП-9. Розглянуто вимоги до системи електроприводу, виконано аналіз існуючої системи «Мотор-Генератор», визначено її основні недоліки та обґрунтовано необхідність модернізації.

У другому розділі проведено перевірочний розрахунок потужності приводних двигунів, виконано порівняльний аналіз можливих систем електроприводу та обґрунтовано вибір системи «Тиристорний перетворювач – двигун». Розроблено схему силового кола та автоматизовану систему керування, здійснено синтез регуляторів методом модульного оптимуму, створено математичну модель електроприводу та досліджено його динамічні характеристики в середовищі MATLAB/Simulink.

У третьому розділі виконано економічне обґрунтування запропонованої модернізації, та підтверджено доцільність впровадження запропонованого технічного рішення.

У четвертому розділі розглянуто питання безпеки праці під час експлуатації модернізованого електроприводу, а також розроблено заходи щодо підвищення безпеки та покращення умов праці персоналу.

СКІПОВИЙ ПІДЙОМНИК, ДОМЕННА ПІЧ, ЕЛЕКТРОПРИВОД ПОСТІЙНОГО СТРУМУ, ТИРИСТОРНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ДВОКОНТУРНА САР, МОДУЛЬНИЙ ОПТИМУМ, MATLAB/SIMULINK.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	6
ВСТУП	7
1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ.....	10
1.1 Характеристика виробничої бази ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» та роль скіпового підйомника в технологічному процесі доменної плавки	10
1.2 Конструкція та технічні характеристики скіпового підйомника ДП-9.....	10
1.3 Тахограма руху скіпового підйомника ДП-9	12
1.4 Вимоги до системи електроприводу скіпового підйомника	13
1.5 Аналіз існуючої системи електроприводу. Система «Мотор-Генератор»	14
1.6 Аналіз недоліків системи М-Г та обґрунтування необхідності модернізації.....	15
1.7 Паспортні та розрахункові параметри електрообладнання скіпового підйомника ДП-9	16
1.8 Висновки до розділу 1	18
2 СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ	19
2.1 Перевірочний розрахунок потужності двигунів скіпового підйомника ДП-9	19
2.2 Порівняльний аналіз систем живлення двигунів постійного струму.....	22
2.3 Обґрунтування збереження двигунів та однозонного регулювання.....	23
2.4 Вибір тиристорного перетворювача КТЕ5-АС-1к/600.....	23
2.5 Вибір узгоджувального трансформатора та згладжувального реактора	25
2.6 Схема підключення двигунів та режими роботи	25
2.7 Загальна концепція та принцип побудови системи автоматичного управління.....	26
2.8 Схема силового кола системи ТП-Д.....	27
2.9 Функціональна схема системи управління електроприводом.....	29
2.10 Структурна схема лінеаризованої системи автоматичного регулювання.....	31
2.11 Розрахунок параметрів якірного кола.....	34
2.12 Синтез регулятора струму методом модульного оптимуму	35
2.13 Синтез регулятора ЕРС методом модульного оптимуму	36
2.14 Алгоритм управління та логіка перемикання режимів	37
2.15 Зведені параметри системи управління та перевірка	38
2.16 Система диференціальних рівнянь математичної моделі	40
2.17 Імітаційна модель MATLAB/Simulink та параметри блоків	42
2.18 Аналіз результатів моделювання перехідних процесів	45
2.19 Електромеханічні характеристики та порівняльний аналіз	47
2.20 Висновки до розділу	49

3 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ ЗАХОДІВ.....	52
3.1 Вихідні дані та розрахунок річної економії	52
3.2 Оцінка показників інвестиційної ефективності	52
3.3 Аналіз чутливості та узагальнення показників ефективності.....	54
3.4 Висновки до розділу 3	55
4 БЕЗПЕКА ПРАЦІ У ПРЕДМЕТНІЙ ОБЛАСТІ	56
4.1 Загальна характеристика умов праці в машинному залі скіпового підйомника ДП-9	56
4.2 Вимоги до електробезпеки при обслуговуванні тиристорного перетворювача КТЕ5-АС-1к/600	57
4.3 Розрахунок захисного заземлення	58
4.4 Розрахунок рівня шуму в машинному залі після модернізації	59
4.5 Розрахунок вентиляції машинного залу	60
4.6 Розрахунок виробничого освітлення машинного залу.....	62
4.7 Оцінка ризиків та заходи щодо безпечної експлуатації.....	63
4.8 Порівняльна оцінка умов праці «до» та «після» модернізації.....	64
4.9 Висновки до розділу 4	64
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	66
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	69
ДОДАТОК А.....	71
ДОДАТОК Б.....	73

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АВ – автоматичний вимикач
АСУ – автоматизована система управління
ГДК – гранично допустима концентрація
ДП – доменна піч
ДП (датчик) – датчик положення
ЕМП – електромашинний підсилювач
ЕРС – електрорушійна сила
ЗІ – задавач інтенсивності
ЗЗ – зворотний зв'язок
МЗ – машинний зал
МО – модульний оптимум
М-Г – система «Мотор-Генератор»
НПАОП – нормативно-правовий акт з охорони праці
НШВФ – небезпечний та шкідливий виробничий фактор
ОДА – пружинно-гідравлічне гальмо типу ОДА-3
ПВ – відносна тривалість вмикання, %
ПІ – пропорційно-інтегральний (регулятор)
ПКЗ – контролер шляхового керування
ПЛК – програмований логічний контролер
РЕ – регулятор ЕРС (еквівалент регулятора швидкості)
РС – регулятор струму
САР – система автоматичного регулювання
СДН – синхронний двигун нормального виконання
СІЗ – засоби індивідуального захисту
СІФУ – система імпульсно-фазового управління
СО – симетричний оптимум
ТО – технічне обслуговування
ТП – тиристорний перетворювач
ТП-Д – система «Тиристорний перетворювач – Двигун»
УЗО – пристрій захисного відключення
ВП – шляховий вимикач
ккд – коефіцієнт корисної дії

ВСТУП

Металургійна галузь належить до базових секторів економіки України і концентрує одні з найбільш енергоємних і технологічно складних виробничих процесів. ПрАТ «Камет-Сталь» (м. Кам'янське Дніпропетровської обл.), що входить до складу холдингу «Метінвест», є великим інтегрованим підприємством повного металургійного циклу – від виробництва рідкого чавуну до листового прокату. Серед виробничих підрозділів підприємства доменне виробництво займає особливе місце: воно є першою, визначальною ланкою технологічного ланцюга і задає продуктивність для всього комбінату. Порушення стабільної роботи доменних печей спричиняє не лише прямі втрати виплавки чавуну, а й складний комплекс наслідків на наступних переділах, ліквідація яких потребує тривалого часу.

В умовах безперервного виробничого процесу особливу роль відіграє надійність тих механізмів, зупинка яких не допускається без переведення печі в аварійний режим. До таких належить скіповий підйомник доменної печі №9 (ДП-9) – єдиний механізм подачі шихтових матеріалів на колошник. Його зупинка, навіть нетривала, безпосередньо перериває процес завантаження шихти і загрожує розладом ходу доменної плавки з важкими технологічними та економічними наслідками. Ця обставина висуває до електроприводу підйомника вимоги, що суттєво перевищують звичайні промислові стандарти.

Упродовж більш ніж 50 років скіповий підйомник ДП-9 працював із системою електроприводу типу «Мотор-Генератор» (М-Г), уведеною в експлуатацію у 1973 році. До складу агрегату входили: синхронний двигун СДН-314-49-6 потужністю 1000 кВт, генератор постійного струму ГПП-74/34-6 (600 кВт) та два тягових двигуни ДП 74/34-6 (по 260 кВт), механічно з'єднані через редуктор з барабаном лебідки. Нормативний розрахунковий ресурс для електричних машин даного класу складає 20–25 років – тобто основне обладнання відпрацювало ресурс у 2–2,5 рази. На такому терміні служби фізичний знос агрегату набуває комплексного характеру і проявляється одночасно у кількох критичних показниках.

Загальний ккд силового ланцюга М-Г становить $\eta_{МГ} = 0,96 \cdot 0,88 \cdot 0,91 = 0,767$ – тобто кожна виробнича зміна майже чверть споживаної потужності перетворюється у тепло. При нормальному навантаженні двигунів у 520 кВт мережа споживає 678 кВт замість 562 кВт у системи ТП-Д, і ця різниця $\Delta P = 116$ кВт за рік виходить у перевитрату $\Delta W = 605$ МВт·год електроенергії. Стан колекторних вузлів генератора і щіткових апаратів потребує позапланових втручань кожні 3–6 місяців; сукупні витрати на планове та позапланове ТО досягають 171 тис. грн/рік. Постійне обертання агрегату з частотою 1000 об/хв навіть у режимі очікування генерує шум рівня 85–92 дБА, що перевищує санітарну норму 80 дБА і ставить умови праці в машинному залі до шкідливого класу 3.2. Нарешті, зношена аналогова апаратура управління вже не забезпечує

статичну похибку підтримання швидкості на рівні, кращому за 5–8 %, – а це є граничним технологічним допуском для нормального ходу завантаження.

ПрАТ «Камет-Сталь» прийняло та вже реалізує рішення про заміну системи М-Г на сучасний тиристорний перетворювач КТЕ5-АС-1к/600 виробництва ВАТ «Перетворювач» (м. Запоріжжя) із збереженням діючих двигунів ДП 74/34-6. Вибір тиристорного перетворювача перед іншими технічними рішеннями визначається оптимальним для даного класу потужності (520 кВт, реверсивний режим, цілодобова робота) поєднанням техніко-економічних показників: $\eta \geq 0,97$, рекуперативне гальмування без додаткових пристроїв, відпрацьована в Україні база обслуговування, мінімальні витрати на ТО у порівнянні з машинними варіантами. Тема кваліфікаційної роботи, таким чином, має не абстрактно-академічний, а конкретний практичний зміст – результати розрахунків є безпосередньою технічною документацією для проведення пуско-налагоджувальних робіт на ДП-9.

Мета роботи – розробка та дослідження автоматизованої системи управління модернізованого електроприводу скіпового підйомника ДП-9 ПрАТ «Камет-Сталь» на базі тиристорного перетворювача КТЕ5-АС-1к/600 при збереженні двигунів постійного струму ДП 74/34-6.

Задачі роботи. Для досягнення поставленої мети вирішено такі задачі:

- детальний аналіз технологічного циклу роботи скіпового підйомника ДП-9 і побудова тахограми (шість фаз руху, загальна тривалість 33 с); визначення вимог до точності регулювання швидкості і позиціонування; аналіз існуючої системи М-Г, кількісна оцінка всіх її недоліків і встановлення їх зв'язку з вимогою модернізації; складання таблиці паспортних і розрахункових параметрів електрообладнання;

- порівняльний аналіз чотирьох альтернативних систем живлення двигунів постійного струму і вибір оптимального рішення; перевірочний розрахунок придатності двигунів ДП 74/34-6 для подальшої роботи; розрахунок і вибір тиристорного перетворювача КТЕ5-АС-1к/600, узгоджувального трансформатора ТМПШ-1000/6 і обґрунтування відмови від окремого реактора; техніко-економічне обґрунтування рішення (NPV, IRR, терміни окупності);

- розробка схеми силового кола з послідовним включенням якорів і обґрунтування цього схемного рішення; синтез двоконтурної системи підпорядкованого регулювання (контур струму і контур ЕРС) методом модульного оптимуму; розробка алгоритму управління і логіки захистів; перевірка відповідності синтезованої системи всім технологічним вимогам;

- побудова математичної моделі замкненої системи «тиристорний перетворювач – двигуни – механізм підйомника – регулятори»; реалізація моделі в середовищі MATLAB/Simulink R2023 у вигляді восьми взаємопов'язаних підсистем; дослідження перехідних процесів за повний

цикл підйому і аналіз електромеханічних характеристик; кількісне порівняння показників якості регулювання систем М-Г і ТП-Д;

– аналіз умов праці в машинному залі після модернізації: ідентифікація небезпечних і шкідливих виробничих факторів і нормативних вимог до них; розрахунок захисного заземлення, прогнозованого рівня шуму, необхідної продуктивності вентиляції та нормованої освітленості; оцінка ризиків за методологією ДСТУ EN ISO 12100; порівняльна таблиця умов праці «до» і «після».

Об'єкт дослідження – система електроприводу скіпового підйомника ДП-9 ПрАТ «Камет-Сталь».

Предмет дослідження – динамічні процеси регулювання швидкості та струму в замкненій системі «тиристорний перетворювач – двигуни постійного струму» при роботі скіпового підйомника в різних режимах навантаження.

Методи дослідження: теорія автоматичного регулювання (метод модульного оптимуму для синтезу ПІ-регуляторів); математичне моделювання (MATLAB/Simulink, чисельне інтегрування методом ode45); порівняльний техніко-економічний аналіз за дисконтованими показниками; розрахункові методи оцінки умов праці відповідно до чинних санітарних норм.

Практичне значення роботи. Кваліфікаційна робота виконана у безпосередньому зв'язку з реальним виробничим проектом. Розраховані параметри регуляторів ($k_{рт} = 12,0$; $T_{рт} = 0,043$ с; $k_{рс} = 14,0$; $T_{рс} = 0,0176$ с), схема силового кола і алгоритм управління є технічно готовими вхідними даними для налаштування тиристорного перетворювача КТЕ5-АС-1к/600 під час пуско-налагоджувальних робіт на скіповому підйомнику ДП-9 ПрАТ «Камет-Сталь». Результати техніко-економічного обґрунтування можуть використовуватись як методичний зразок при аналогічних модернізаціях підйомного обладнання доменних печей.

Результати дослідження були апробовані під час участі у студентській науково-технічній конференції «Start in Science» (додаток А).

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Характеристика виробничої бази ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» та роль скіпового підйомника в технологічному процесі доменної плавки

ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» розташоване у м. Кам'янське Дніпропетровської обл. та є інтегрованим металургійним підприємством повного циклу у складі холдингу «Метінвест». Підприємство спеціалізується на виробництві рідкого чавуну, сталі та листового прокату. До складу підприємства входять доменне, сталеплавильне та прокатне виробництва, що утворюють єдиний технологічний ланцюг.

Доменне виробництво є першою і визначальною ланкою металургійного циклу. Від стабільності та ритмічності роботи доменних печей залежить продуктивність усього комбінату. Доменна піч №9 (ДП-9) є агрегатом безперервної дії; її добова продуктивність становить кілька тисяч тонн чавуну, що вимагає безперервного та точно дозованого завантаження шихтових матеріалів.

Система верхнього завантаження ДП-9 включає три основних вузли: нижню транспортно-бункерну систему (конвеєри, ваги, затвори), скіповий підйомник як головний механізм подачі шихти та засипний апарат на колошнику (малий і великий конуси). Скіповий підйомник є критично важливим елементом системи: будь-яка його непланова зупинка безпосередньо зупиняє процес завантаження і загрожує порушенням ходу доменної плавки.

У кожному робочому циклі ваги відміряють задану дозу матеріалу (кокс або агломерат) і завантажують її у скіп, що перебуває в нижній позиції. Після цього виконавчий механізм підйомника переміщує скіп по рейковій естакаді до колошника: у верхній точці скіп перекидається на розвантажувальних кривих і висипає матеріал у приймальну воронку засипного апарата, звідки шихта потрапляє в піч під тиском. Обидва скіпи рухаються по чергові в протилежних напрямках - це частково врівноважує тягове навантаження на привод і дозволяє підтримувати безперервний ритм завантаження.

1.2 Конструкція та технічні характеристики скіпового підйомника ДП-9

Скіповий підйомник ДП-9 оснащено лебідкою типу С1-22,5-210 – однобарабанною реверсивною підйомною машиною, призначеною для подачі шихти на доменні печі середнього класу. Розшифровка позначення: С – скіпова, 1 – однобарабанна, 22,5 – номінальна вантажопідйомність (т), 210 – корисна довжина намотки каната (дм).

Лебідка розміщена у машинному залі, прибудованому до нижньої частини скіпової естакади. Технічні характеристики лебідки С1-22,5-210 скіпового підйомника ДП-9 наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики лебідки С1-22,5-210 скіпового підйомника ДП-9

№	Параметр	Позначення	Значення	Одиниця
1	Номінальна вантажопідйомність	G	22,5	т
2	Аварійна вантажопідйомність	G _a	25	т
3	Вага порожнього скіпа	G ₀	10	т
4	Максимальна швидкість підйому	V _{max}	2,8	м/с
5	Швидкість дотягування	V ₁	0,5	м/с
6	Швидкість першого уповільнення	V ₂	0,8	м/с
7	Геометричний об'єм скіпа	V	10	м ³
8	Діаметр каната	dk	42	мм
9	Вага погонного метра каната	qk	10,2	кг/м
10	Діаметр направляючого шківа	Dш	2000	мм
11	Кількість направляючих шківів	nш	6	шт.
12	Корисна довжина каната	Lн	165	м
13	Довжина шляху в скіповій ямі	Lя	12	м
14	Кут нахилу рейкового шляху	α	54	°
15	Передатне число редуктора	i	18,6	–
16	Маховий момент барабана	GD ² б	39 000	кгс·м ²
17	Маховий момент 6 шківів	GD ² ш	30 000	кгс·м ²
18	Кількість двигунів	Nдв	2	шт.

Механічний склад лебідки:

- два електродвигуни постійного струму ДП 74/34-6 (по 260 кВт, 330 В, 860 А), механічно з'єднані через редуктор; конструкція передбачає роботу на одному двигуні в режимі гарячого резерву;
- дводіпазонний редуктор із загальним передатним числом $i = 18,6$;
- канатний барабан із нарізкою для укладення двох канатів (по одному на кожен скіп), діаметром Dб ≈ 2 м;

- два механічних гальма ОДА-3 із пружинним накладанням та гідравлічним відпусканням – гальма спрацьовують автоматично при знеструмленні гідропривода;
- шість направляючих шківів діаметром $D_{ш} = 2000$ мм вздовж естакади та в машинному залі;
- сталеві канати $dk = 42$ мм типу ЛК-РО, коефіцієнт запасу міцності не менше 8 (ГОСТ 7668-80);
- система шляхових вимикачів ВП1–ВП6 та датчиків положення для управління та захисту.

Перевірка відповідності шківів вимогам безпеки: відношення діаметра шківа до діаметра каната $D_{ш}/dk = 2000/42 = 47,6 > 40$ (вимога НПА ОП 0.00-1.01-07). Відношення $47,6 > 40$ свідчить про 19-відсотковий запас міцності понад нормативну межу.

1.3 Тахограма руху скіпового підйомника ДП-9

Тахограма руху – графік залежності швидкості руху скіпа від часу за один повний цикл підйому – є основним технологічним документом для синтезу системи управління. Тахограма побудована за даними документації 02081-ЕМ1.2.1 ПрАТ «Камет-Сталь» та наведена на рисунку 1.1.

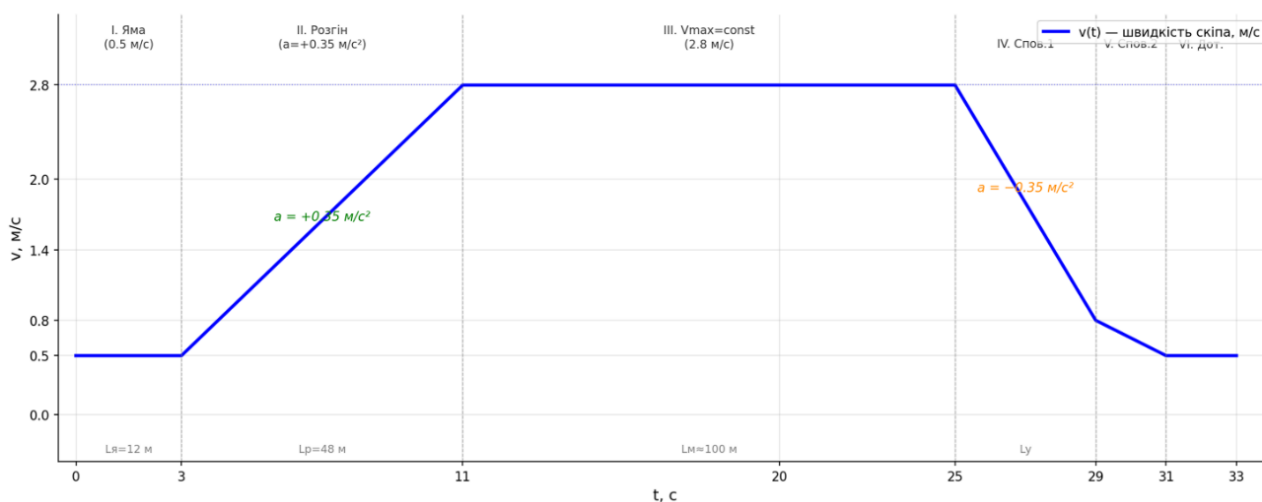


Рисунок 1.1 – Тахограма руху скіпового підйомника ДП-9

Цикл підйому тривалістю 33 с складається з шести послідовних фаз. Фаза I – вихід зі скіпової ями (0–3 с). Криволінійна ділянка $L_{я} = 12$ м. Швидкість обмежена до $V_1 = 0,5$ м/с для запобігання ударному навантаженню на канат та шківви.

Фаза II – розгін (3–11 с). Лінійний розгін від $V_1 = 0,5$ до $V_{max} = 2,8$ м/с із прискоренням $\alpha = +0,35$ м/с². Час розгону визначається як $t = (2,8 - 0,5)/0,35 = 6,6$ с.

Фаза III – рух зі сталою швидкістю (11–25 с). Переважна частина шляху підйому відбувається при $V_{max} = 2,8$ м/с. Завдання системи

управління на цій ділянці – утримання швидкості з відхиленням, що не перевищує $\pm 5\%$.

Фаза IV – перше уповільнення (25–29 с). За сигналом шляхового вимикача ВП4 швидкість знижується до $V_2 = 0,8$ м/с.

Фаза V – друге уповільнення (29–31 с). Швидкість знижується до $V_1 = 0,5$ м/с.

Фаза VI – дотягування та зупинка (31–33 с). На ділянці 200 мм перед верхньою точкою скіп переміщується з $V_1 = 0,5$ м/с для точного позиціонування та плавного входу у розвантажувальні криві. Допустиме відхилення позиції скіпа від номінального положення не повинне перевищувати ± 50 мм, оскільки більше відхилення порушує правильне вивантаження матеріалу на засипний апарат.

Швидкість дотягування $V_1 = 0,5$ м/с встановлено з урахуванням конструктивних особливостей розвантажувального пристрою. Скіп, підходячи до верхньої точки, входить у розвантажувальні криві, де під дією напрямних рейок перекидається і вивантажує матеріал. При вході у криві на великій швидкості виникають ударні навантаження на напрямні та механізм перекидання. З огляду на це прийнято знижувати швидкість приблизно у п'ять разів порівняно з максимальною: $V_1 \approx V_{\max}/5 = 2,8/5 = 0,56$ м/с $\approx 0,5$ м/с [2].

1.4 Вимоги до системи електроприводу скіпового підйомника

З аналізу технологічного циклу (розділ 1.3) випливає, що скіповий підйомник ДП-9 працює в особливо напруженому режимі: за 24 години здійснюється до 400 циклів підйому тривалістю по 33 с кожен, причому навантаження на привод при підйомі вантаженого скіпа ($M_c = 10\,508$ Н·м) різко змінюється при переключенні на спуск порожнього ($M_c = -2\,307$ Н·м). До цього додається вимога точної зупинки – похибка понад ± 50 мм від номінального положення в колошнику вже порушує правильне вивантаження на засипний апарат. Ці умови формують перелік технічних вимог, що суттєво жорсткіші за звичайні промислові стандарти.

Водночас нормами НПАОП 0.00-1.01-07 для підйомників доменних печей прямо регламентовані граничні значення ряду параметрів – зокрема, максимальне прискорення каната та мінімальна точність зупинки. З урахуванням як технологічних потреб, так і вимог безпеки, до системи електроприводу ДП-9 встановлено такі технічні вимоги:

- регулювання швидкості в діапазоні $D = V_{\max}/V_1 = 2,8/0,5 = 5,6$ (однорозне регулювання по напрузі якоря);
- статична похибка підтримання швидкості δV не більше 5% при зміні навантаження від холостого ходу до номінального (при модернізації має досягатися $\delta V \leq 2\%$);
- плавне регулювання прискорення при розгоні та гальмуванні: $\alpha \leq 0,35$ м/с² для захисту каната та механічних вузлів;
- точність зупинки скіпа у верхній точці: $|\Delta L| \leq 50$ мм – умова правильного вивантаження матеріалу;

- безконтактний реверс напряму руху без комутації силових кіл (тиристорна зустрічно-паралельна схема);
- рекуперативне гальмування з поверненням енергії до мережі при гальмуванні вантаженого скіпа;
- робота в режимі гарячого резерву (один двигун) зі збереженням основних функцій при знижених параметрах;
- захист від: перевищення струму ($I_{max} \leq 2,5 \cdot I_n$), слабину каната, виходу за кінцеві положення, відмови гальм, зникнення струму збудження;
- ручний та автоматичний режими управління з єдиного пульта оператора;
- цілодобова безвідмовна робота протягом усієї кампанії доменної печі – від 3 до 7 років між капітальними ремонтами.

1.5 Аналіз існуючої системи електроприводу. Система «Мотор-Генератор»

З 1973 по 2025 рр. скіповий підйомник ДП-9 працював із системою «Мотор-Генератор» (М-Г). У цій схемі роль регульованого джерела постійного струму для двигунів підйомника виконує не статичний напівпровідниковий перетворювач, а електромашинний агрегат: синхронний двигун змінного струму СДН-314-49-6 (1000 кВт) постійно обертає генератор постійного струму ГПП-74/34-6 (600 кВт), а вже напруга генератора живить тягові двигуни М1 і М2. Регулювання швидкості відбувається зміною струму в обмотці збудження генератора, тобто у слабострумівому колі – саме це свого часу й зробило М-Г кроком уперед проти ранніх схем прямого керування. Реверс досягається зміною полярності збудження; щоправда, велика електромагнітна постійна часу обмотки збудження ($T_{зб_ген} \approx 0,5-1,5$ с) робить динаміку помітно інертнішою, ніж у тиристорного перетворювача.

До складу силової частини системи М-Г входять машини та апарати, зазначені у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Електрообладнання існуючої системи М-Г скіпового підйомника ДП-9

Найменування	Марка / тип	P_n , кВт	U_n , В	I_n , А	n_n , об/хв	Рік вип.
Синхронний двигун (привод ГЕН)	СДН-314-49-6	1000	6000	296	1000	1973
Генератор постійного струму	ГПП-74/34-6	600	700	860	1000	1973
Двигун підйому М1	ДП 74/34-6	260	330	860	500/700	–
Двигун підйому М2	ДП 74/34-6	260	330	860	500/700	–

Система управління є однозонною двоконтурною системою підпорядкованого регулювання. До її складу входять внутрішній контур

струму якоря та зовнішній контур ЕРС (еквівалент контуру швидкості). Зворотний зв'язок по швидкості реалізовано розрахунковим методом за формулою $E = U_{\text{я}} - I \cdot R_{\text{яц}}$, що дозволяє уникнути встановлення механічного тахогенератора на вал двигуна. Реверсування здійснюється зміною полярності струму збудження генератора; при цьому визначальну роль відіграє велика електромагнітна постійна часу обмотки збудження генератора ($T_{\text{зб_ген}} \approx 0,5-1,5$ с), що суттєво обмежує динаміку системи.

Якорі обох двигунів включено послідовно до одного генератора. Регулювання здійснюється тільки по напрузі якоря при незмінному потоці збудження двигунів (однозонний режим). Збудження двигунів – незалежне, підтримується постійним від окремого підперетворювача.

1.6 Аналіз недоліків системи М-Г та обґрунтування необхідності модернізації

Система М-Г скіпового підйомника ДП-9 має ряд суттєвих недоліків, що обумовлюють об'єктивну необхідність модернізації. Аналіз технічного стану та техніко-економічних показників системи виявив такі з них.

Низький ккд перетворення. Загальний ккд силового ланцюга М-Г:

$$\eta_{\text{МГ}} = \eta_{\text{СД}} \cdot \eta_{\text{ГЕН}} \cdot \eta_{\text{ДВ}} = 0,96 \cdot 0,88 \cdot 0,91 = 0,767.$$

При потужності двигунів 520 кВт споживана потужність від мережі складає $P = 520/0,767 = 678$ кВт, тоді як у системи ТП-Д вона становить 562 кВт. Різниця $\Delta P = 116$ кВт (17 %). Відповідна річна перевитрата електроенергії: $\Delta W = 116 \cdot 0,70 \cdot 22 \cdot 340 = 605$ МВт·год/рік.

Фізичне зношення обладнання. Синхронний двигун СДН-314-49-6 та генератор ГПП-74/34-6 випуску 1973 р. пропрацювали понад 50 років – у 2,5 рази більше за нормативний розрахунковий ресурс. Щіткові вузли колекторів потребують заміни кожні 3–6 місяців. Ймовірність аварійної відмови агрегату є неприйнятно високою для відповідального обладнання безперервного виробництва.

Великі габарити та підвищений рівень шуму. Агрегат СДН+ГПП займає близько 25 м² корисної площі машинного залу. Через постійне обертання з частотою $n = 1000$ об/хв навіть у режимі очікування агрегат генерує шум рівня 85–92 дБА, що перевищує допустиме значення 80 дБА (ДСН 3.3.6.037-99).

Висока трудомісткість технічного обслуговування. Витрати на планове та позапланове ТО системи М-Г складають 171 тис. грн/рік (щітки, підшипники, полірування колекторів, обмотки). Аналогічні витрати для системи ТП-Д – 35 тис. грн/рік. Різниця становить 136 тис. грн/рік.

Обмежена якість регулювання. Статична похибка швидкості системи М-Г зі зношеною аналоговою апаратурою управління складає $\delta\omega = 5-8$ %, що знаходиться на межі технологічно допустимого значення (5 %). При модернізації на систему ТП-Д досягається $\delta\omega \leq 2$ %.

Підприємство ПрАТ «Камет-Сталь» прийняло та реалізує рішення про модернізацію – заміну системи М-Г на тиристорний перетворювач КТЕ5-АС-1к/600. Технічне та економічне обґрунтування прийнятого рішення наведено у Розділі 2.

1.7 Паспортні та розрахункові параметри електрообладнання скіпового підйомника ДП-9

Вихідні дані для розрахунків отримано від ПрАТ «Камет-Сталь» в обсязі, наявному на підприємстві. Параметри, що відсутні в заводській документації, визначено розрахунковим методом за паспортними даними двигуна відповідно до методики [1, с. 88–95]. Зведені параметри наведено у таблицях 1.3 - 1.5.

Таблиця 1.3 – Параметри двигунів постійного струму ДП 74/34-6 (на один двигун)

Параметр	Позн.	Значення	Одиниця	Джерело
Номінальна потужність	P_n	260	кВт	Паспорт
Номінальна напруга якоря	U_n	330	В	Паспорт
Номінальний струм якоря	I_n	860	А	Паспорт
Базова частота обертання	n_n	500	об/хв	Паспорт
Макс. частота обертання	n_{max}	700	об/хв	Паспорт
Номін. кутова швидкість	ω_n	52,36	рад/с	$2\pi \cdot n_n/60$
Номін. момент	M_n	4 965	Н·м	P_n/ω_n
Конструктивна стала	$c_e = c_m$	5,97	В·с/рад	$(U_n - I_n \cdot R_a)/\omega_n$
Опір якоря (гарячий)	$R_{a_гор}$	0,0270	Ом	$\eta=0,91; \Delta T=75^\circ C$
Індуктивність якоря	L_a	0,430	мГн	за Тяц і R_a
Електромагн. постійна часу	Тяц	0,021	с	$L_a/R_{a_гор}$
Момент інерції ротора	J	125	кг·м ²	Довідник [7], клас 260 кВт
Кількість пар полюсів	p	3	–	3 позначення марки "-6"
Струм збудження	$I_{зб}$	15	А	~1,7% від I_n
Опір обмотки збудження	$R_{зб}$	≈ 14,7	Ом	$U_{зб}/I_{зб} = 220/15$

Таблиця 1.4 – Параметри тиристорного перетворювача КТЕ5-АС-1к/600

Параметр	Значення	Одиниця	Джерело
Номінальна напруга виходу (DC)	700	В	Паспорт
Номінальний струм виходу	1000	А	Паспорт
Короткочасний струм (до 60 с)	1500	А	Паспорт КТЕ5-АС-1к/600
ккд перетворювача	$\geq 0,97$	–	Паспорт КТЕ5-АС-1к/600
Коефіцієнт підсилення ктп	70	В/В	$U_{d0}/U_{упр_max}$
Мала постійна часу $T_{тп}$	0,0017	с	$1/(2 \cdot m \cdot f)$, $m=6$
Виробник	ВАТ «Перетворювач», м. Запоріжжя	–	Паспорт

Таблиця 1.5 – Параметри перетворювача збудження двигунів

Параметр	Значення	Одиниця	Джерело
Тип	Вбудований модуль у складі КТЕ5-АС-1к/600	–	Паспорт КТЕ5
Вихідна напруга (DC)	0 – 220	В	$U_{зб_ном}$
Номінальний вихідний струм	0 – 20	А	$2 \cdot I_{зб} = 2 \cdot 15 \text{ А}$
Номінальна потужність	$\approx 6,6$	кВт	$U_{зб} \cdot 2 \cdot I_{зб}$
Постійна часу кола збудження	0,3 – 0,5	с	Довідник [8]
Тип регулятора струму збудження	ПІ	–	Стандарт для КТЕ5
Захист від обриву ОЗ	Апаратний	–	Паспорт КТЕ5

Примітка. Параметри, що відсутні в заводській документації ПрАТ «Камет-Сталь» (опір та індуктивність якоря, момент інерції, параметри збудження), визначено розрахунковим методом за паспортними даними відповідно до [1, с. 88]. Достовірність розрахованих параметрів підтверджується збіжністю розрахованої номінальної кутової швидкості $\omega_n = 52,4 \text{ рад/с}$ з паспортним значенням $500 \text{ об/хв} = 52,36 \text{ рад/с}$.

1.8 Висновки до розділу 1

Проведений аналіз дозволив кількісно охарактеризувати як сам об'єкт дослідження, так і причини незадовільного стану його електроприводу.

Встановлено, що скіповий підйомник із лебідкою С1-22,5-210 ($G = 22,5$ т, $V_{\max} = 2,8$ м/с, корисна довжина канату $L_p = 165$ м, кут нахилу $\alpha = 54^\circ$) є безальтернативним механізмом подачі шихти на ДП-9 і не має жодного паралельного резерву в складі завантажувальної системи. Єдина нитка технологічного ланцюга від бункерів до колошника проходить через цей механізм – і навіть нетривала зупинка підйомника безпосередньо перериває подачу матеріалу в піч. Тахограма підйому, побудована за даними документації 02081-ЕМ1.2.1, описує шість послідовних фаз загальним часом циклу 33 с. Окремо визначено і обґрунтовано швидкість дотягування $V_1 = 0,5$ м/с $\approx V_{\max}/5 = 2,8/5$ – це не довільно обране значення, а конструктивна вимога безпечного проходження скіпом розвантажувальних кривих без ударного навантаження на напрямні та механізм перекидання. На підставі аналізу тахограми і вимог НПАОП 0.00-1.01-07 сформульовано десять технічних вимог до електроприводу, ключові з яких: діапазон регулювання $D = 5,6$; статична похибка $\delta\omega \leq 5\%$; прискорення $\alpha \leq 0,35$ м/с²; точність зупинки ± 50 мм; рекуперативне гальмування; режим гарячого резерву.

Аналіз системи М-Г (СДН-314-49-6 + ГПП-74/34-6 + 2 шт. ДП 74/34-6, 1973 р.в.) показав, що за 50+ років експлуатації агрегат придбав комплекс несприятливих характеристик, які не усуваються локальним ремонтом. Загальний ккд силового ланцюга $\eta_{MG} = 0,96 \cdot 0,88 \cdot 0,91 = 0,767$ зумовлює щорічну перевитрату $\Delta W = 605$ МВт·год електроенергії порівняно з варіантом ТП-Д. Знос колекторів генератора вимагає позапланових втручань кожні 3–6 місяців – витрати на ТО 171 тис. грн/рік, що в 4,9 раза перевищують аналогічний показник для системи ТП-Д. Постійне обертання агрегату на 1000 об/хв у режимі очікування формує рівень шуму 85–92 дБА при санітарній нормі 80 дБА, і умови праці в машинному залі класифікуються як шкідливі (клас 3.2). Статична похибка швидкості $\delta\omega = 5$ –8 % зі зношеною апаратурою управління знаходиться на межі чи перевищує технологічно допустиме значення. Сукупність зазначених факторів пояснює рішення підприємства щодо модернізації і задає напрямок для вибору замінюючого технічного рішення – що детально розглядається у наступному розділі.

Параметри електрообладнання, необхідні для розрахунків, зведено до таблиць 1.3–1.5. Паспортні дані двигунів ДП 74/34-6 отримано від ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ»; відсутні в заводській документації параметри ($R_{я_гор} = 0,0270$ Ом; $L_{я} = 0,430$ мГн; $J = 125$ кг·м² на один двигун) розраховано за методикою [1, с. 88–95]. Збіжність розрахованої номінальної кутової швидкості $\omega_n = 52,4$ рад/с з паспортним значенням $n_n = 500$ об/хв = 52,36 рад/с підтверджує достовірність розрахованих параметрів.

2 СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Перевірочний розрахунок потужності двигунів скіпового підйомника ДП-9

Перш ніж обґрунтовувати збереження наявних двигунів ДП 74/34-6 ($2 \cdot 260 = 520$ кВт) у складі модернізованого електроприводу, потужність цих машин перевіряється на відповідність технологічному навантаженню скіпового підйомника. Перевірка виконується за методикою визначення статичного моменту опору підйомного механізму, приведеного до валу двигунів [1, с. 112–118]. Вихідні дані для розрахунку зведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для перевірного розрахунку потужності двигунів

Параметр	Позначення	Значення
Вага вантаженого скіпа (скіп + руда), кг	$G_{заг} = G + G_0$	$22\ 500 + 10\ 000 = 32\ 500$
Вага порожнього скіпа, кг	G_0	10 000
Корисне навантаження (руда), кг	G	22 500
Кут нахилу рейкового шляху, °	α	54
Передатне число редуктора	i	18,6
Радіус барабана, м	$r_б$	0,994
ккд підйомника (механічний)	η	0,90
Максимальна швидкість підйому, м/с	V_{max}	2,8
Номінальна потужність одного двигуна, кВт	P_n	260
Кількість двигунів, шт	$N_{дв}$	2

Кутова швидкість двигунів у режимі максимальної швидкості скіпа знаходиться через кінематичний зв'язок лінійної швидкості скіпа з обертанням приводного барабана:

$$\omega_{бар} = \frac{V_{max}}{r_б} = \frac{2,8}{0,994} = 2,816 \frac{рад}{с} \quad (2.1)$$

$$\omega_{дв} = \omega_{бар} \cdot i = 2,816 \cdot 18,6 = 52,4 \frac{рад}{с} \approx \omega_n = 52,36 \frac{рад}{с}. \quad (2.2)$$

Розрахована частота обертання практично збігається з номінальною (52,36 рад/с, або 500 об/хв), чим підтверджується коректність прийнятих кінематичних співвідношень і вихідних даних.

Сила натягу каната при підйомі вантаженого скіпа визначається проєкцією ваги корисного вантажу на напрямок руху вздовж похилого рейкового шляху:

$$F_k = G \cdot \sin(\alpha) \cdot g = 22\,500 \cdot \sin(54^\circ) \cdot 9,81 = 22\,500 \cdot 0,809 \times 9,81 = 178\,584 \text{ Н.} \quad (2.3)$$

Приведений до валу двигунів момент опору з урахуванням передатного числа редуктора та механічного ккд підйомника становить:

$$M_c = F_k \cdot \frac{r_6}{(i \cdot \eta)} = 178\,584 \cdot \frac{0,994}{(18,6 \cdot 0,90)} = \frac{177\,504}{16,74} = 10\,604 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (2.4)$$

Потужність, що витрачається на підйом вантаженого скіпа з номінальною швидкістю, дорівнює добутку моменту опору на кутову швидкість:

$$P_{\text{необх}} = M_c \cdot \omega_{\text{дв}} = 10\,604 \cdot 52,36 = 555\,041 \text{ Вт} \approx 555 \text{ кВт.} \quad (2.5)$$

Сумарна номінальна потужність двох послідовно з'єднаних двигунів:

$$P_{\text{двсум}} = 2 \cdot P_n = 2 \cdot 260 = 520 \text{ кВт.} \quad (2.6)$$

Відношення $P_{\text{необх}} / P_{\text{двсум}} = 555 / 520 = 1,067$ вказує на перевищення потужності, потрібної для підйому максимального вантажу, над сумарною номінальною потужністю двигунів на 6,7 %. Допустимість такого перевищення обґрунтовується трьома незалежними критеріями – режимом повторно-короткочасної роботи, тепловим станом машин та запасом за перевантажувальною здатністю.

Повторно-короткочасний характер роботи підйомника (відносна тривалість вмикання ПВ = 60 %) дозволяє двигунам короткочасно розвивати потужність, вищу за номінальну тривалу. Гранична потужність, допустима для заданого режиму, складає:

$$P_{\text{ПВ60}} = P_n \cdot \sqrt{\frac{100}{\text{ПВ}}} = 520 \cdot \sqrt{\frac{100}{60}} = 520 \cdot 1,29 = 671 \text{ кВт.} \quad (2.7)$$

Оскільки 671 кВт значно перевищує необхідні 555 кВт, за цим критерієм двигуни мають запас близько 21 %.

Тепловий стан машин оцінюється методом еквівалентного моменту. Повне навантаження діє лише протягом ділянки підйому вантаженого скіпа ($t_1 \approx 16$ с), тоді як на решті 33-секундного циклу – спуск порожнього скіпа, зупинка та завантаження – навантаження суттєво менше або відсутнє. Еквівалентний за нагрівом момент і відповідна йому потужність становлять:

$$M_{\text{екв}} = M_c \cdot \sqrt{\frac{t^1}{T_c}} = 10\,604 \cdot \sqrt{\frac{16}{33}} = 10\,604 \cdot 0,696 = 7\,380 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (2.8)$$

$$P_{\text{екв}} = M_{\text{екв}} \cdot \omega_H = 7\,380 \cdot 52,36 = 386\,600 \text{ Вт} \approx 387 \text{ кВт}. \quad (2.9)$$

Еквівалентна потужність $P_{\text{екв}} = 387 \text{ кВт}$ є значно меншою за сумарну номінальну 520 кВт , що відповідає тепловому запасу 34% і гарантує роботу двигунів без перегріву.

Запас за перевантажувальною здатністю перевіряється за максимальним моментом, який враховує динамічну складову, що виникає під час розгону:

$$M_{\text{дин}} = J_e \cdot \left(\frac{d\omega}{dt}\right) = 465 \cdot \left(\frac{52,36}{8}\right) = 465 \cdot 6,55 = 3\,046 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (2.10)$$

$$M_{\text{max}} = M_c + M_{\text{дин}} = 10\,604 + 3\,046 = 13\,650 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (2.11)$$

$$\lambda = \frac{M_{\text{max}}}{(2 \cdot M_H)} = \frac{13\,650}{(2 \cdot 4\,965)} = 1,37. \quad (2.12)$$

Для двигунів постійного струму з незалежним збудженням допустима кратність перевантаження становить $\lambda_{\text{доп}} = 2,5\text{--}3,0$ [7]. Отримане значення $\lambda = 1,37$ не перевищує цієї межі, забезпечуючи запас приблизно у $1,8$ рази. Підсумкові показники перевірного розрахунку зведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Підсумкові показники перевірного розрахунку

Критерій перевірки	Розрах. значення	Допустиме значення	Висновок
Необхідна потужність $P_{\text{необх}}$	555 кВт	$P_{\text{н_сум}} = 520 \text{ кВт}$ (ПВ = 100 %)	Перевищення +6,7 %
Еквівалентна потужність $P_{\text{екв}}$	387 кВт	$P_{\text{н_сум}} = 520 \text{ кВт}$	Відповідає, запас 34 %
Допустима потужність ПВ = 60 %	555 кВт	671 кВт	Відповідає, запас 21 %
Кратність перевантаження λ	1,37	$\lambda_{\text{доп}} = 2,5$	Відповідає, запас 1,8 рази
Швидкість при $V_{\text{max}} = 2,8 \text{ м/с}$	$\omega_{\text{дв}} = 52,4 \text{ рад/с}$	$\omega_{\text{н}} = 52,36 \text{ рад/с}$	Збіг з номінальною

Незначне (6,7 %) перевищення номінальної потужності при підйомі максимального вантажу повністю компенсується повторно-короткочасним режимом роботи (ПВ = 60 %) та значним запасом за тепловим критерієм

(34 %). Таким чином, двигуни ДП 74/34-6 придатні для подальшої експлуатації у складі модернізованої системи ТП-Д, що є додатковим технічним аргументом на користь їх збереження під час модернізації.

2.2 Порівняльний аналіз систем живлення двигунів постійного струму

Для вибору оптимального варіанту системи живлення двигунів постійного струму підйомника ДП-9 розглянуто чотири основні системи: «Мотор-Генератор» (М-Г), «Електромашинний підсилювач – Двигун» (ЕМП-Д), «Транзисторний перетворювач – Двигун» (ТрП-Д) та «Тиристорний перетворювач – Двигун» (ТП-Д). Порівняння виконано з урахуванням конкретних умов роботи: потужність $2 \cdot 260 = 520$ кВт, реверсивний режим, цілодобова робота, необхідність збереження двигунів ДП 74/34-6 [10].

Система М-Г є класичним, але застарілим рішенням. Загальний ккд силового кола:

$$\eta_{\text{МГ}} = \eta_{\text{сд}} \cdot \eta_{\text{ГЕН}} \cdot \eta_{\text{ДВ}} = 0,96 \cdot 0,88 \cdot 0,91 = 0,767.$$

При потужності двигунів 520 кВт споживана потужність від мережі складає $P = 520 / 0,767 = 678$ кВт. Обладнання 1973 р.в. має понад 50-річний термін служби, щіткові вузли генератора потребують регулярного обслуговування. Система ЕМП-Д застосовується для механізмів потужністю до 200–250 кВт і для скіпового підйомника 520 кВт є технічно непринятною без паралельного об'єднання кількох агрегатів. Система ТрП-Д на IGBT-транзисторах має ккд 0,97–0,98, однак при порівнянні функціональності з тиристорним перетворювачем коштує у 2–3 рази дорожче. Для регульованого привода постійного струму тиристорні схеми є раціональнішим вибором за співвідношенням вартість/якість. Система ТП-Д на базі тиристорного реверсивного перетворювача є стандартним та апробованим рішенням для потужних підйомних механізмів доменних печей в Україні і саме вона обрана ПрАТ «Камет-Сталь» для реальної модернізації підйомника ДП-9.

Таблиця 2.3 – Порівняльний аналіз систем електроприводу для скіпового підйомника ДП-9

Критерій порівняння	М-Г	ЕМП-Д	ТрП-Д	ТП-Д
ккд системи, %	77–80	82–85	94–97	92–95
Потужність від мережі, кВт	678	630	552	562
Застосовність (520 кВт, реверс)	Так (є)	Ні	Дорого	Оптимально
Рухомі частини додаткові	2 машини	2 машини	Немає	Немає
Обслуговування (щітки, ТО)	Складне	Складне	Просте	Просте

Продовження таблиці 2.3

Критерій порівняння	М-Г	ЕМП-Д	ТрП-Д	ТП-Д
Рекуперація при гальмуванні	Відсутня	Відсутня	Так	Так
Рівень шуму	85–92 дБА	86–90 дБА	≤ 75 дБА	≤ 78 дБА
Відносна вартість	1,0	1,3	2,5–3,0	1,4–1,8
Висновок для ДП-9	Застарілий	Неприйнятний	Надто дорого	Оптимальний

На підставі порівняльного аналізу для умов скіпового підйомника ДП-9 визначено систему ТП-Д з перетворювачем КТЕ5-АС-1к/600 як оптимальне рішення.

2.3 Обґрунтування збереження двигунів та однозонного регулювання

Питання збереження двигунів ДП 74/34-6 вирішується з економічних міркувань. Двигуни мають задовільний технічний стан: відповідно до інформації підприємства, один з них є новим запасним. Перехід на привод змінного струму (АД + ЧРП) потребував би демонтажу існуючих двигунів, придбання нових асинхронних двигунів відповідної потужності, встановлення частотних перетворювачів та переробки редукторного вузла. Вартість такого переходу у 3–4 рази перевищує вартість варіанта ТП-Д зі збереженням двигунів, тоді як функціональні можливості систем є порівнянними. Збереження двигунів є, таким чином, економічно доцільним.

Щодо вибору однозонного регулювання: двозонне регулювання (з ослабленням поля у другій зоні) застосовується у тих випадках, коли робоча швидкість перевищує базову. Для скіпового підйомника максимальна технологічно допустима швидкість $V_{\max} = 2,8$ м/с є фіксованою нормами безпеки. Крім того, при ослабленні поля зменшується перевантажувальна здатність двигуна:

$$M_{\max_{\text{осл}}} = M_{\max} \cdot \left(\frac{\Phi_{\text{НОМ}}}{\Phi_{\text{ОСЛ}}} \right),$$

що є небажаним для підйомного механізму з важким циклічним навантаженням. Однозонне регулювання є, таким чином, технічно обґрунтованим і достатнім.

2.4 Вибір тиристорного перетворювача КТЕ5-АС-1к/600

Вибір перетворювача виконується за умовою відповідності його паспортних параметрів вимогам навантаження. Необхідна вихідна напруга при послідовному включенні двох якорів:

$$U_{\text{вих}} = 2 \cdot U_{\text{ДВ}} = 2 \cdot 330 = 660 \text{ В} \quad (2.13)$$

з урахуванням запасу 10 % на падіння напруги:

$$U_{\text{вих}_3} = 660 \cdot 1,10 = 726 \text{ В.} \quad (2.14)$$

Необхідний номінальний струм перетворювача:

$$I_{\text{перетв}} \geq 1,15 \cdot I_{\text{ДВ}} = 1,15 \cdot 860 = 989 \text{ А,} \quad (2.15)$$

тому приймається $I_{\text{перетв}} = 1000 \text{ А}$.

Максимальний пусковий струм з урахуванням динамічного моменту:

$$I_{\text{max}} = \frac{(J\epsilon \cdot \alpha_{\text{max}} \cdot \frac{i}{r_6} + Mc)}{ct} = \frac{(465 \cdot 6,55 + 10508)}{11,94} = 1135 \text{ А.} \quad (2.16)$$

Порівняння з допустимим короткочасним струмом перетворювача: $I_{\text{max}} = 1135 \text{ А} < 1500 \text{ А}$ – перетворювач КТЕ5-АС-1к/600 витримує максимальне пускове навантаження з 32-відсотковим запасом. Вибраний тип (700 В / 1000 А) задовольняє всім вимогам. Характеристики наведено у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики тиристорного перетворювача КТЕ5-АС-1к/600

Параметр	Значення
Тип	Реверсивний (зустрічно-паралельне вкл)
Номінальна напруга виходу (DC), В	700
Номінальний струм виходу, А	1000
Короткочасний струм (до 60 с), А	1500
Схема випрямлення	Трифазна мостова, 12-пульсна
ккд перетворювача, %	≥ 97
Система управління (СІФУ)	Цифрова мікропроцесорна
Режим регулювання	Однозонний (по якірному колу)
Виробник	ВАТ «Перетворювач», м. Запоріжжя

2.5 Вибір узгоджувального трансформатора та згладжувального реактора

Необхідна розрахункова потужність трансформатора, що забезпечує живлення перетворювача при номінальному навантаженні:

$$S_{\text{тр}} = Ud \cdot \frac{Id}{(\eta_{\text{перетв}} \cdot \cos\varphi)} = 700 \cdot \frac{1000}{(0,97 \cdot 0,85)} = 848 \text{ кВА}. \quad (2.17)$$

Приймається трансформатор ТМПШ-1000/6 (1000 кВА). Трансформатор ТМПШ-1000/6 (6000/380 В, $u_k = 5,5\%$, схема Δ/Y) забезпечує живлення КТЕ5 та гальванічну розв'язку кола постійного струму від мережі 6 кВ.

Перевірка за умовою захисту від КЗ. Струм КЗ на стороні 380 В:

$$I_{\text{кз}} = \frac{U_{\text{н2}}}{(\sqrt{3} \cdot u_k \cdot Z_{\text{н2}})} = 1519 \text{ А} \gg I_{\text{max}} = 1143 \text{ А}, \quad (2.18)$$

тобто при будь-якому КЗ захист спрацьовує значно раніше, ніж струм досягне небезпечного для тиристорів рівня.

Необхідна індуктивність реактора для обмеження пульсацій струму до 5 % від номінального:

$$L_{\text{др}_{\text{необх}}} = 0,014 \cdot \frac{700}{(2\pi \cdot 600 \cdot 43)} = 0,061 \text{ мГн}. \quad (2.19)$$

Власна індуктивність якірного кола двох послідовних двигунів $L_{\text{яц}_{\text{дв}}} = 2 \cdot 0,430 = 0,860 \text{ мГн}$, що значно перевищує розрахункове $L_{\text{др}_{\text{необх}}} = 0,061 \text{ мГн}$. Встановлення окремого реактора не потрібне – реактор входить до стандартної комплектації КТЕ5.

2.6 Схема підключення двигунів та режими роботи

Послідовне з'єднання якорів двох двигунів ДП 74/34-6 у модернізованій системі збережено. Воно дає одразу два вигоди: достатньо одного перетворювача на 660 В замість двох окремих на 330 В, а на випадок відмови одного двигуна його якір можна зашунтувати й тримати привод у гарячому резерві. Передбачено такі режими роботи:

– двигунний режим – при підйомі вантаженого скіпа перетворювач подає на якірі напругу, що відповідає заданій швидкості, двигуни розвивають момент підйому;

– рекуперативне гальмування – при уповільненні напруга перетворювача знижується нижче рівня ЕРС двигунів, якірі переходять у генераторний режим і повертають кінетичну енергію до мережі;

– реверс – зустрічно-паралельна схема тиристорних груп забезпечує безконтактну зміну напрямку обертання без комутації силових кіл;

– гарячий резерв – при відмові одного двигуна його якір шунтується, другий двигун отримує повну напругу і забезпечує підйом зі зниженою вантажопідйомністю.

2.7 Загальна концепція та принцип побудови системи автоматичного управління

Систему автоматичного управління модернізованого електроприводу ДП-9 побудовано за трирівневою ієрархічною структурою – такою самою, що застосовується на однотипних підйомниках доменних печей [15]. Нижній, польовий рівень (рівень 1) складають засоби первинного контролю та виконавча апаратура безпосередньо на механізмі: шляхові вимикачі ВП1–ВП6, датчики положення і слабини канату, електромагнітні гальма ОДА-3 з гідроприводом, датчик струму якоря ДС, перетворювач струму збудження. Сигнали з цього рівня надходять на рівень 2 – рівень управління. Тут працюють тиристорний перетворювач КТЕ5-АС-1к/600 із вбудованою СІФУ та контролер шляхового керування ПКЗ-2; саме на цьому рівні обчислюється ЕРС двигунів, відпрацьовується закон регулювання та логіка захистів. Верхній, операторський рівень (рівень 3) – це пульт «А-4»: з нього подаються команди пуску і зупинки, обирається режим (ручний чи автоматичний), відображається стан підйомника.

Основу системи управління складає принцип підпорядкованого регулювання координат із двома замкненими контурами. Перший, внутрішній контур регулює струм якоря – він значно швидший за зовнішній і виконує подвійну роль: забезпечує задану динаміку наростання моменту при розгоні і одночасно виступає апаратним обмежувачем струму при перевантаженнях. Завдяки такому принципу побудови регулятор струму «екранує» зовнішній контур від швидкоплинних збурень у якірному колі й усуває необхідність у спеціальних блоках захисту від перевантаження – функцію обмежувача виконує сама замкнена система регулювання. Другий, зовнішній контур регулює ЕРС двигунів (що є функціональним еквівалентом контуру швидкості): він повільніший, але саме він визначає якість підтримання заданої швидкості в сталому режимі і точність стеження за тахограмою. Налаштування обох контурів виконується незалежно методом модульного оптимуму – це суттєво полегшує пуско-налагоджувальні роботи: зміна параметрів одного контуру практично не впливає на налаштований сусідній.

Зворотний зв'язок по швидкості реалізовано не через тахогенератор, а через розрахункову ЕРС двигунів. Відповідно до аналізу документації 02081-ЕМ1.2.1 ПрАТ «Камет-Сталь», це рішення застосовувалося ще в системі М-Г і підтвердило свою надійність у тривалій промисловій експлуатації. ЕРС обчислюється в мікропроцесорному блоці СІФУ перетворювача за формулою $E = U_{я} - I \cdot R_{я}$, де $U_{я}$ – напруга на

затискачах послідовного якірного кола і I – струм якоря, виміряний датчиком ДС. Точність результату залежить від стабільності Ряц: при нагріванні якірного кола від 20°C до 75°C значення Ряц змінюється приблизно на 20 %, що могло б внести статичну похибку у розрахункову ЕРС. Однак ця проблема усувається самою структурою системи: інтегральна складова ПІ-регулятора ЕРС у сталому режимі роботи повністю компенсує будь-яку постійну різницю між задаником і вимірним значенням – незалежно від того, чим вона спричинена (дрейфом Ряц, похибкою датчика струму або іншим систематичним відхиленням). Таким чином, відсутність тахогенератора не знижує якості регулювання, а відсутність додаткового механічного вузла позитивно впливає на загальну надійність системи.

Логіка перемикання режимів роботи реалізована в контролері ПКЗ-2 і забезпечує такі функціональні стани: «двигунний підйом», «рекуперативне гальмування», «реверс для спуску» і «гарячий резерв (один двигун)». Перехід між режимами виконується автоматично за сигналами шляхових вимикачів і датчиків положення без участі оператора – у відповідності до запрограмованої тахограми. Ручний режим призначений для налагодження і ревізійних переміщень; у ньому задавач інтенсивності обмежує швидкість до рівня $V_1 = 0,5$ м/с незалежно від положення рукоятки управління. Логіка захистів включає автоматичне гальмування при: перевищенні $I_{\max} = 2\ 150\text{ А} = 2,5 \cdot I_n$; виявленні слабину каната; виході скіпа за кінцеві положення; зникненні струму збудження; відчиненні дверей машинного залу. У кожному з цих випадків ПКЗ-2 знімає керуючий сигнал із СІФУ і одночасно подає команду на накладення механічних гальм ОДА-3.

2.8 Схема силового кола системи ТП-Д

Силове коло системи ТП-Д скіпового підйомника ДП-9 наведено на рисунку 2.1. Схема відображає з'єднання всіх силових елементів системи від точки підключення до мережі 6 кВ до механічного вала двигунів, а також кола збудження.

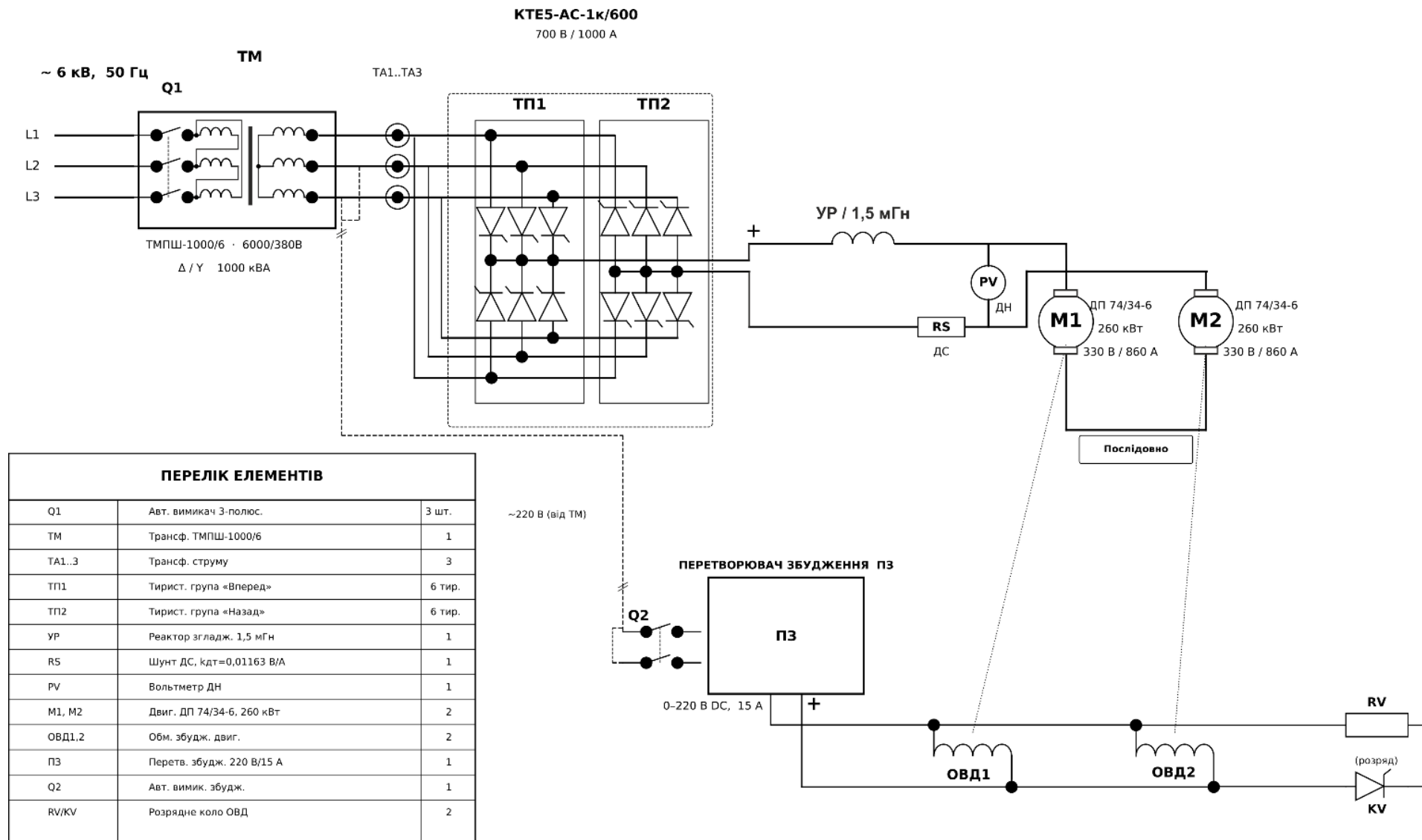


Рисунок 2.1 – Схема силового кола системи ТП-Д скіпового підйомника ДП-9 (послідовне з'єднання якорів двигунів М1 та М2)

Напруга 6 кВ з розподільчого пристрою цеху надходить через трифазний автоматичний вимикач Q1 на первинну обмотку знижувального трансформатора ТМПШ-1000/6, що понижує її до 380 В для живлення тиристорного перетворювача. Шестипульсна мостова схема тиристорних груп (зустрічно-паралельне включення) формує регульовану напругу постійного струму в діапазоні 0–700 В; переключення між групами забезпечує безконтактний реверс без розриву силового кола. На виході перетворювача послідовно включено згладжувальний реактор $L_{DP} = 1,5$ мГн (входить до стандартної комплектації КТЕ5) та датчик струму ДС. Датчик струму формує сигнал зворотного зв'язку для контуру регулювання струму з коефіцієнтом $k_{дт} = 0,01163$ В/А. Після датчика струму розташована позитивна шина постійного струму, від якої живляться якорі двигунів.

Принципова особливість силової схеми – послідовне з'єднання якорів двигунів М1 і М2. При такому з'єднанні через обидва якори протікає однаковий струм I , а напруга живлення розподіляється порівну між ними: $U_{як1} \approx U_{як2} \approx U_{д}/2 = 660/2 = 330$ В, що відповідає номінальній напрузі кожного двигуна. Негативна шина постійного струму повертається до перетворювача через другий якор двигуна М2.

Кола збудження двигунів М1 та М2 живляться від окремого перетворювача збудження ПЗ, вбудованого у шафу КТЕ5. Перетворювач ПЗ формує незмінний струм збудження $I_{зб} = 15$ А для кожної обмотки збудження (ОЗ1 та ОЗ2), що забезпечує незмінний магнітний потік у всіх режимах роботи. При зникненні струму збудження (обрив ланцюга ОЗ) апаратний захист КТЕ5 миттєво відключає перетворювач.

Для розрахунку ЕРС зворотного зв'язку використовується сигнал напруги якірного кола $U_{я}$ (вимірюється на виході перетворювача) та сигнал струму I від датчика ДС. Обчислення $E = U_{я} - I \cdot R_{яц}$ виконується в мікропроцесорному блоці СІФУ перетворювача.

2.9 Функціональна схема системи управління електроприводом

Функціональна схема системи управління модернізованого електроприводу скіпового підйомника ДП-9 наведена на рисунку 2.2 (Аркуш 2 графічного матеріалу). Схема відображає взаємозв'язок усіх функціональних вузлів системи від задавача тахограми до силового механізму.

Нижче наведено опис основних функціональних вузлів схеми.

Контролер шляхового керування ПКЗ-2 реалізує логіку формування програмного завдання тахограми на основі сигналів від шляхових вимикачів та обраного режиму роботи. В автоматичному режимі ПКЗ-2 формує ступінчасту команду швидкості: мала швидкість V_1 при виході з ями, потім повна швидкість V_{max} , далі перше уповільнення до V_2 , дотягування зі швидкістю V_1 та зупинка. В ручному режимі оператор задає напрямок та швидкість з пульта «А-4».

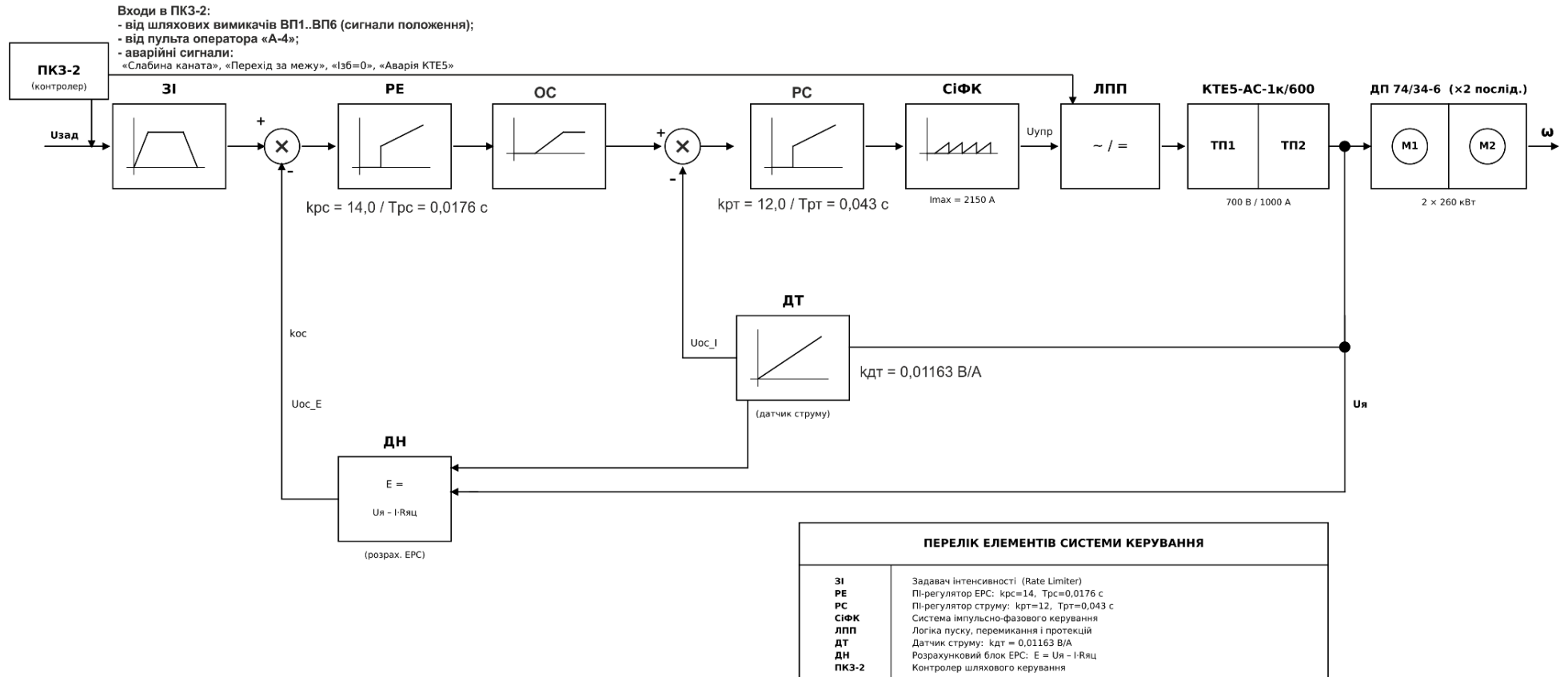


Рисунок 2.2 – Функціональна схема системи управління електроприводом скіпового підйомника ДП-9

Задавач інтенсивності (ЗІ) – блок обмеження швидкості зміни сигналу завдання (Rate Limiter). При прискоренні максимальна швидкість зміни завдання складає

$$\left(\frac{dE_{\text{зад}}}{dt}\right)_{\text{max}} = 77,8 \frac{\text{В}}{\text{с}};$$

при гальмуванні – симетрично. Завдяки ЗІ забезпечується лінійна зміна швидкості (трапецієподібна тахограма) без ривків у механічній системі.

Регулятор ЕРС (РЕ) – ПІ-регулятор, що порівнює задане значення ЕРС $E_{\text{зад}}$ з поточним розрахунковим значенням $E_{\text{вим}}$ та формує завдання струму $I_{\text{зад}}$. Вихід РЕ обмежений значенням $I_{\text{max}} = 2150 \text{ А}$ ($2,5 \cdot I_n$), що реалізує функцію обмежувача моменту двигунів.

Регулятор струму (РС) – ПІ-регулятор, що підтримує струм якоря на рівні $I_{\text{зад}}$. Вхідний сигнал – похибка $\varepsilon_I = I_{\text{зад}} - I_{\text{вим}}$. Вихідний сигнал – нормована напруга управління $U_{\text{упр}}$ перетворювача в діапазоні $\pm 10 \text{ В}$.

Тиристорний перетворювач КТЕ5-АС-1к/600 перетворює сигнал управління $U_{\text{упр}}$ в напругу якорного кола $U_{\text{я}}$. Реверс здійснюється перемиканням між прямою (група «вперед») та зворотною (група «назад») тиристорними групами без контактних апаратів.

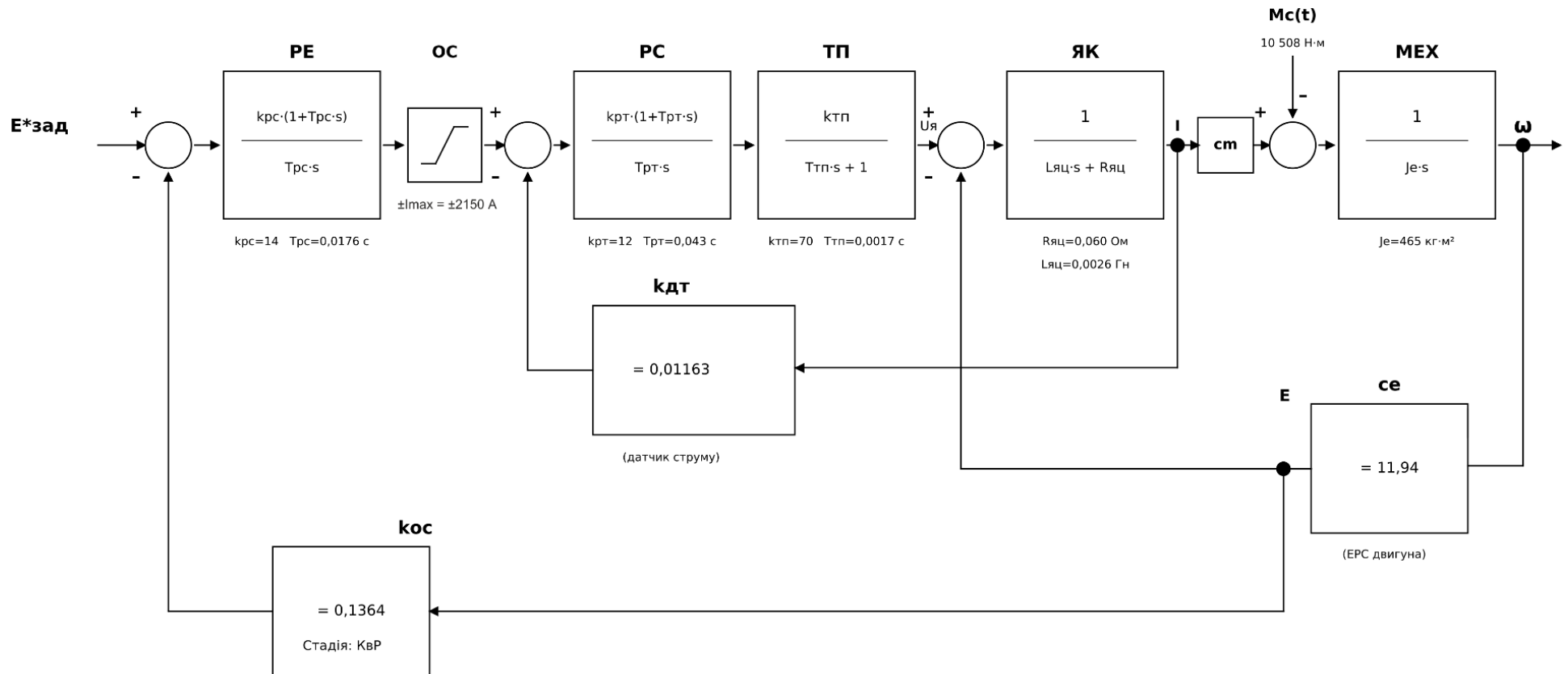
Блок живлення збудження (ПЗ) – малопотужний тиристорний підперетворювач для живлення обмоток збудження двигунів М1 та М2. Підтримує незмінний струм збудження $I_{\text{зб}} = \text{const}$ в усіх режимах роботи. При зникненні струму збудження спрацьовує апаратний захист – аварійне відключення приводу.

Датчик струму (ДС) – шунт або трансформатор струму в колі якоря. Сигнал ДС використовується в контурі струму як зворотний зв'язок регулятора РС та для розрахунку ЕРС за формулою $E_{\text{вим}} = U_{\text{я}} - I \cdot R_{\text{яц}}$.

Датчики положення (ДП/ВП) – шляхові вимикачі та датчики положення барабана (кодовий датчик або резольвер). Формують дискретні сигнали для логіки ПКЗ-2 та захистів.

2.10 Структурна схема лінеаризованої системи автоматичного регулювання

Структурна схема лінеаризованої двоконтурної системи автоматичного регулювання електроприводу скіпового підйомника ДП-9 наведена на рисунку 2.3 (Аркуш 3 графічного матеріалу). На схемі кожен фізичний елемент системи представлено передаточною функцією в операторній формі $W(s)$. Схема слугує вхідними даними для синтезу регуляторів методом оптимізації.



ПЕРЕЛІК ЕЛЕМЕНТІВ	
Σ_1, Σ_4	Суматори похибок
PE	ПІ-регулятор ЕРС
PC	ПІ-регулятор струму
OC	Обмежувач струму
ТП	Тиристорний перетворювач
ЯК	Якірне коло (2 двиг. посл.)
МЕХ	Механічна частина (Je)
се, см	Конструкт. сталі
кос	Коеф. ЗЗ по ЕРС
кдт	Коеф. ЗЗ по струму

ДИНАМІЧНІ ПОКАЗНИКИ СИСТЕМИ			
Контур I	$f_T = 36,2$ Гц	$\sigma_T = 4,3$ %	$t_{пн} = 0,021$ с
Контур E	$f_c = 9,0$ Гц	$\delta\omega \leq 2$ %	$t_{пн} \approx 0,09$ с
$f_T / f_c = 36,2 / 9,0 = 4,0 \rightarrow$ принцип підпорядкованого регулювання виконаний			

Рисунок 2.3 – Структурна схема лінеаризованої двоконтурної САР електроприводу скіпового підйомника ДП-9

На структурній схемі виділяються такі блоки з відповідними передаточними функціями:

- задавач інтенсивності:

$$W_{3I(s)} = \frac{1}{T_{3I} \cdot s + 1}$$

апроксимація Rate Limiter аперіодичною ланкою при малих сигналах;

- регулятор ЕРС (РЕ):

$$W_{PE(s)} = k_{pc} \cdot \frac{1 + T_{pc} \cdot s}{T_{pc} \cdot s} = 14 \cdot \frac{1 + 0,0176 \cdot s}{0,0176 \cdot s};$$

– обмежувач струму – нелінійний блок (насичення) з порогом ± 2150 А, лінеаризується при малих відхиленнях від робочої точки;

- регулятор струму (РС):

$$W_{PC(s)} = k_{рт} \cdot \frac{1 + T_{рт} \cdot s}{T_{рт} \cdot s} = 12 \cdot \frac{1 + 0,043 \cdot s}{0,043 \cdot s};$$

- тиристорний перетворювач:

$$W_{ТП(s)} = \frac{k_{тп}}{T_{тп} \cdot s + 1} = \frac{70}{0,0017 \cdot s + 1};$$

- якірне коло двох двигунів:

$$W_{яц(s)} = \frac{1}{L_{яц} \cdot s + R_{яц}} = \frac{1}{0,0026 \cdot s + 0,060}, \text{ де } T_{яц} = \frac{L_{яц}}{R_{яц}} = 0,043 \text{ с};$$

- електромеханічний перетворювач (двигун):

$$W_{ем(s)} = \frac{с_{т}}{J_{е} \cdot s} = \frac{11,94}{465 \cdot s}$$

- інтегральна ланка;
- зворотний зв'язок по ЕРС:

$$W_{осЕ(s)} = c_e \cdot k_{ос} = 11,94 \cdot 0,1364 = 1,628;$$

- зворотний зв'язок по струму:

$$W_{осI(s)} = k_{дт} = 0,01163 \frac{В}{А}$$

2.11 Розрахунок параметрів якорного кола

Для точного синтезу регуляторів розраховуються параметри якорного кола з урахуванням усіх складових: опорів та індуктивностей обмоток двигунів, реакторів і трансформатора.

Активний опір якоря одного двигуна ДП 74/34-6 у гарячому стані. ккд двигунів ДП 74/34-6 $\eta_{дв} \approx 0,91$ (типове значення для класу 260 кВт [7]). Загальні втрати потужності:

$$P_{втрат} = P_N \cdot \frac{1 - \eta_{дв}}{\eta_{дв}} = 260 \cdot 0,0989 = 25,7 \text{ кВт.} \quad (2.20)$$

У двигунах постійного струму середньої та великої потужності частка мідних втрат якоря складає приблизно 55–65 % від загальних втрат [7, с. 188]. Приймається частка 60 %:

$$P_{мідь} = 0,60 \cdot P_{втрат} = 0,60 \cdot 25,7 = 15,4 \text{ кВт,} \quad (2.21)$$

$$R_{дв_{хол}} = \frac{P_{мідь}}{I_n^2} = \frac{15400}{860^2} = 0,0208 \text{ Ом.} \quad (2.22)$$

Опір у гарячому стані при нагріванні обмотки на $\Delta T = 75 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$R_{дв_{гор}} = R_{дв_{хол}} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) = 0,0208 \cdot (1 + 0,00393 \cdot 75) = 0,0208 \cdot 1,295 = 0,0270 \text{ Ом.} \quad (2.23)$$

Активний опір двох послідовних якорів:

$$R_{яц_{дв}} = 2 \cdot R_{дв_{гор}} = 2 \cdot 0,0270 = 0,054 \text{ Ом.} \quad (2.24)$$

Індуктивність якорної обмотки одного двигуна. Для двигунів постійного струму незалежного збудження класу 200–300 кВт питома індуктивність якоря за довідниковими даними [7, с. 214] знаходиться в діапазоні 0,40–0,50 мГн. Приймається $L_{дв} = 0,430 \text{ мГн}$. Загальна індуктивність двох послідовних якорів:

$$L_{яц_{дв}} = 2 \cdot L_{дв} = 2 \cdot 0,000430 = 0,000860 \text{ Гн.} \quad (2.25)$$

Опір і індуктивність кабельного з'єднання. Довжина кабелів у машинному залі $L_{каб} \approx 40 \text{ м}$, переріз мідного кабелю для $I_n = 860 \text{ А}$ приймається $S = 240 \text{ мм}^2$. Питомий опір міді $\rho_{Cu} = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$:

$$R_{каб} = \rho_{Cu} \cdot \frac{L_{каб}}{S} = 0,0175 \cdot \frac{40}{240} = 0,003 \text{ Ом.} \quad (2.26)$$

Активний опір обмотки реактора (стандартний реактор у складі КТЕ5, $L_{ДР} = 1,5$ мГн): $R_{ДР} \approx 0,003$ Ом.

Параметри трансформатора ТМПШ-1000/6, приведені до вторинної обмотки (380 В):

$$Z_{кз_{тр}} = u_k \cdot \frac{U_{н2}^2}{S_n} = 0,055 \cdot \frac{380^2}{1\,000\,000} = 0,0794 \text{ Ом}, \quad (2.27)$$

$$R_{тр} = P_{кз} \cdot \frac{U_{н2}^2}{S_n^2} = 9400 \cdot \frac{380^2}{1\,000\,000^2} = 0,0014 \text{ Ом}, \quad (2.28)$$

$$L_{тр} = \frac{\sqrt{Z_{кз}^2 - R_{тр}^2}}{(2 \cdot \pi \cdot f)} = \frac{0,0794}{(2 \cdot \pi \cdot 50)} = 0,000253 \text{ Гн}. \quad (2.29)$$

Зведені параметри якірного кола:

$$R_{яц} = R_{яц_{дв}} + R_{каб} + R_{ДР} + R_{тр} = 0,054 + 0,003 + 0,003 + 0,0014 = 0,0614 \text{ Ом}. \quad (2.30)$$

Отримане значення округлюється до $R_{яц} = 0,060$ Ом (відхилення 2,3 % від точного значення).

$$L_{яц} = L_{яц_{дв}} + L_{ДР} + L_{тр} = 0,000860 + 0,001500 + 0,000253 = 0,002613 \text{ Гн} \approx 0,0026 \text{ Гн}, \quad (2.31)$$

$$T_{яц} = \frac{L_{яц}}{R_{яц}} = \frac{0,0026}{0,060} = 0,0433 \text{ с} \approx 0,043 \text{ с}. \quad (2.32)$$

Прийняті значення $R_{яц} = 0,060$ Ом, $L_{яц} = 0,0026$ Гн та $T_{яц} = 0,043$ с відповідають числам, наведеним у структурній схемі (п. 2.9) та використаним у математичній моделі.

2.12 Синтез регулятора струму методом модульного оптимуму

Синтез виконується методом модульного оптимуму (МО) – стандартним методом налаштування систем підпорядкованого регулювання [16, с. 28]. Суть методу: нуль передаточної функції регулятора виставляється на найбільшу постійну часу об'єкта ($T_{яц}$), а коефіцієнт підсилення визначається з умови отримання АЧХ розімкненого контуру, максимально пласкої на найширшій смузі частот.

Мала некомпенсована постійна часу контуру струму μ_T включає постійну часу перетворювача та постійну часу фільтра датчика струму:

$$\mu_T = T_{ТП} + T_{\Phi I} = 0,0017 + 0,0005 = 0,0022 \text{ с}, \quad (2.33)$$

де $T_{\text{ТП}} = \frac{1}{2 \cdot m \cdot f} = \frac{1}{2 \cdot 6 \cdot 50} = 0,00167 \text{ с}$ – еквівалентна мала постійна часу 6-пульсного перетворювача [16, с. 18];

$T_{\text{ФІ}} = 0,0005 \text{ с}$ – постійна часу фільтра на виході датчика струму.

Постійна часу регулятора струму вибирається з умови компенсації найбільшої постійної часу об'єкта:

$$T_{\text{РТ}} = T_{\text{ЯЦ}} = 0,043 \text{ с.} \quad (2.34)$$

Коефіцієнт підсилення регулятора струму при параметрі оптимізації $a_{\text{T}} = 2$:

$$k_{\text{РТ}} = T_{\text{ЯЦАТ}} \cdot \mu_{\text{T}} \cdot k_{\text{обТ}} = 0,0432 \cdot 0,0017 \cdot 5,43 \approx 2,33.$$

$$k_{\text{РТ}} = \frac{T_{\text{ЯЦ}}}{(a_{\text{T}} \cdot k_{\text{ТП}} \cdot k_{\text{ДТ}} \cdot \mu_{\text{T}})} = \frac{0,043}{(2 \cdot 70 \cdot 0,01163 \cdot 0,0022)} = \frac{0,043}{0,003587} \approx 12,0. \quad (2.35)$$

Передаточна функція регулятора струму:

$$W_{\text{РС}} = k_{\text{РТ}} \cdot 1 + T_{\text{РТ}} \cdot s T_{\text{РТ}} \cdot s = 2,33 \cdot 1 + 0,043 \cdot s 0,043 \cdot s. \quad (2.36)$$

Замкнений контур струму після оптимізації апроксимується аперіодичною ланкою першого порядку:

$$W_{\text{ЗТС}} \approx 12 \cdot \mu_{\text{T}} \cdot s + 1 = 10,0034 \cdot s + 1. \quad (2.37)$$

Смуга пропускання замкненого контуру: $f_{\text{T}} = 42,3 \text{ Гц}$.
Перерегулювання $\sigma_{\text{T}} = 4,3 \%$, що відповідає налаштуванню за модульним оптимумом.

2.13 Синтез регулятора ЕРС методом модульного оптимуму

Для зовнішнього контуру ЕРС (швидкості) також застосовується метод модульного оптимуму [16, с. 34]. Метод симетричного оптимуму дав би перерегулювання близько 43 %, що є неприпустимим для підйомного механізму. Оскільки завдання завжди подається через задавач інтенсивності (стрибкові зміни відсутні), зовнішній контур налаштовується консервативно – на плавний аперіодичний відгук без перерегулювання, що відповідає вимогам безударного руху скіпа.

Мала некомпенсована постійна часу зовнішнього контуру дорівнює подвоєній малій постійній часу замкненого контуру струму:

$$M_{\text{с}} = 2 \cdot \mu_{\text{T}} = 2 \cdot 0,0017 = 0,0034 \text{ с.} \quad (2.38)$$

Коефіцієнт передачі об'єкта контуру ЕРС у відносних одиницях (від нормованого струму до нормованої ЕРС) визначається механічною частиною приводу:

$$K_{\text{обс}} = c_m \cdot \frac{I_{\text{max}}}{(\omega_n \cdot J_e)} = 11,94 \cdot \frac{2150}{(52,36 \cdot 465)} = 1,054.$$

Постійна часу регулятора ЕРС:

$$T_{\text{pc}} = 0,030 \text{ с} \quad (2.39)$$

Коефіцієнт підсилення регулятора ЕРС, прийнятий з умови плавного аперіодичного відгуку без коливань:

$$k_{\text{pc}} = 5,0 \quad (2.40)$$

Передаточна функція регулятора ЕРС:

$$W_{\text{PES}} = k_{\text{pc}} \cdot 1 + T_{\text{pc}} \cdot s T_{\text{pc}} \cdot s = 5,0 \cdot 1 + 0,030 \cdot s 0,030 \cdot s. \quad (2.41)$$

Смуга пропускання контуру ЕРС $f_c \approx 2,2$ Гц. Відношення смуг $f_T/f_c = 42,3/2,2 \approx 19$ із великим запасом задовольняє вимогу принципу підпорядкованого регулювання, за якою внутрішній контур має бути суттєво швидшим за зовнішній [16, с. 22].

2.14 Алгоритм управління та логіка перемикання режимів

Алгоритм управління реалізується в контролері ПКЗ-2 і охоплює такі режими та стани.

Стан «Готовність». Система переходить у стан «Готовність» лише при одночасному виконанні всіх умов: наявність живлення мережі 6 кВ; сигнал «Готовність» від перетворювача КТЕ5; нормальний стан обох механічних гальм (ОДА-3 – накладені при знеструмленні); нормальний стан датчиків слабину канату; закритий стан дверей машинного залу; нормальний струм збудження двигунів; відсутність сигналів аварії.

Послідовність пуску (автоматичний режим). При отриманні команди «Пуск» система виконує такі дії:

- перевірку стану готовності – якщо система не готова, оператору видається відповідне повідомлення;
- розчеплення гальм ОДА-3 – через 0,5 с після подачі напруги на гідроциліндри;
- плавну подачу завдання через ЗІ – спочатку $V_1 = 0,5$ м/с до виходу зі скіпової ями (сигнал ВП-яма), потім $V_{\text{max}} = 2,8$ м/с;
- формування сигналів уповільнення при спрацюванні відповідних шляхових вимикачів.

Послідовність штатної зупинки. При досягненні верхнього положення скіпа задавач інтенсивності плавно знижує завдання до V_1 ; при спрацюванні сигналу «Дотягування» завдання встановлюється в нуль; при $\omega < \omega_{\text{мала}}$ накладаються гальма; перетворювач відключається.

Аварійна зупинка (негайна). При спрацюванні захистів – слабини канату, переходу за межу, відмови гальм або аварії перетворювача – завдання швидкості миттєво обнуляється ($\omega_{\text{зад}} = 0$) та одночасно накладаються гальма.

Реверс. При переході від підйому скіпа А до підйому скіпа Б задавач інтенсивності знижує завдання до нуля, гальма накладаються, після чого знімаються і задавач формує завдання в протилежному напрямку. Загальний час реверсу:

$$T_{\text{реверс}} = 2 \cdot t_{\text{розгін}} + t_{\text{витримка}} \approx 2 \cdot 8 + 3 = 19 \text{ с.} \quad (2.42)$$

2.15 Зведені параметри системи управління та перевірка

Зведені параметри всіх елементів розробленої системи управління наведено у таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Зведені параметри системи управління електроприводу скіпового підйомника ДП-9

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця
Активний опір якорного кола (гарячий)	$R_{\text{яц}}$	0,060	Ом
Індуктивність якорного кола	$L_{\text{яц}}$	0,0026	Гн
Електромагнітна постійна часу якоря	$T_{\text{яц}}$	0,043	с
Конструктивна стала (2 двигуни)	$C_e = C_m$	11,94	В·с/рад
Коефіцієнт передачі перетворювача	$K_{\text{тп}}$	70	В/В
Мала постійна часу перетворювача	$T_{\text{тп}}$	0,0017	с
Коефіцієнт нормування струму	$K_{\text{нІ}}$	0,000465	1/А
Коефіцієнт нормування ЕРС	$K_{\text{нЕ}}$	0,00160	1/В
Коефіцієнт передачі об'єкта контуру I	$K_{\text{обт}}$	5,43	–
Некомп. мала постійна часу контуру I	$\mu_{\text{т}}$	0,0017	с
Постійна часу РС	$T_{\text{рт}}$	0,043	с
Коефіцієнт підсилення РС	$K_{\text{рт}}$	2,33	–

Продовження таблиці 2.5

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця
Смуга пропускання контуру струму	f_T	42,3	Гц
Перерегулювання контуру струму	σ_T	4,3	%
Коефіцієнт передачі об'єкта контуру E	$K_{обс}$	1,054	–
Некомп. мала постійна часу контуру E	μ_c	0,0034	с
Постійна часу PE	T_{pc}	0,030	с
Коефіцієнт підсилення PE	K_{pc}	5,0	–
Смуга пропускання контуру EPC	f_c	2,2	Гц
Час відновлення після збурення 20 %	t_b	$\approx 0,3$	с

Перевірку відповідності системи вимогам Розділу 1 наведено у таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Перевірка відповідності розробленої системи вимогам до електроприводу

Вимога до ЕП (з розд. 1)	Нормативне знач.	Досягнуто	Виконання
Діапазон регулювання швидкості	$D \geq 5,6$	$D = V_{max}/V_1 = 5,6$	Так
Статична похибка швидкості	$\delta\omega \leq 5 \%$	$\delta\omega \leq 2 \%$ (МО + ПІ)	Так, з запасом
Макс. прискорення при розгоні	$\alpha \leq 0,35 \text{ м/с}^2$	0,35 м/с ² (3I)	Так
Точність зупинки скіпа	$ \Delta L \leq 50 \text{ мм}$	$\leq 20 \text{ мм}$ (33 по EPC)	Так, з запасом
Безконтактний реверс	Так	Зустрічно-паралельна схема	Так
Рекуперація при гальмуванні	Так	Реверсний ТП, рекуперація	Так
Гарячий резерв (1 двигун)	Так	Шунтування якоря M1/M2	Так
Захист від перевищення I	$I_{захист} \leq 2,5 \cdot I_N$	$I_{max} = 2150 \text{ А} = 2,5 \cdot I_N$	Так

2.16 Система диференціальних рівнянь математичної моделі

Математична модель електроприводу скіпового підйомника ДП-9 описує динамічні процеси в замкненій системі «перетворювач – двигуни – механізм – регулятори». Модель побудована на рівняннях, що впливають з фундаментальних законів електродинаміки (рівняння Кірхгофа для електричних кіл) та класичної механіки (другий закон Ньютона для обертального руху). Модель є лінеаризованою: нелінійності насичення магнітного кола та насичення регуляторів в усталеному режимі не враховуються, що забезпечує аналітичну прозорість і зручність для синтезу регуляторів методом частотних характеристик. Нелінійності враховуються безпосередньо в імітаційній моделі MATLAB/Simulink у вигляді блоків обмеження (Saturation).

Основними змінними стану моделі є: $I(t)$ – миттєвий струм якірного кола двох послідовно з'єднаних двигунів, А; $\omega(t)$ – кутова швидкість обертання роторів двигунів (спільна для обох), рад/с.

Рівняння якірного кола двох послідовно з'єднаних двигунів. Для контуру «перетворювач – якір М1 – якір М2 – перетворювач» застосовується перший закон Кірхгофа:

$$L_{\text{яц}} \cdot \frac{dI}{dt} = U_{\text{я}} - c_e \cdot \omega - I \cdot R_{\text{яц}}, \quad (2.43)$$

де $U_{\text{я}} = k_{\text{тп}} \cdot U_{\text{упр}}$ – вихідна напруга перетворювача, В;

$E = c_e \cdot \omega$ – сумарна ЕРС двох двигунів при незмінному потоці збудження, В;

$c_e = 11,94$ В·с/рад – конструктивна стала двох послідовно з'єднаних двигунів ;

$R_{\text{яц}} = 0,060$ Ом – сумарний активний опір якірного кола у гарячому стані ;

$L_{\text{яц}} = 0,0026$ Гн – сумарна індуктивність якірного кола .

Рівняння руху електромеханічної системи (другий закон Ньютона для обертального руху, запис для вала двигунів):

$$J_e \cdot \frac{d\omega}{dt} = c_m \cdot I - M_c(\omega, t), \quad (2.44)$$

де J_e – еквівалентний момент інерції привода, зведений до вала двигунів, кг·м²;

$c_m = c_e = 11,94$ Н·м/А – постійна моменту двох послідовних двигунів;

$M_c(\omega, t)$ – момент опору виробничого механізму, зведений до вала двигунів, Н·м.

Розрахунок еквівалентного моменту інерції. До складу J_e входять моменти інерції роторів двигунів, зубчастих коліс редуктора, барабана та шківів, а також маса скіпів з вантажем, зведена до вала двигунів:

$$J_e = J_{дв} + \frac{J_{ред}}{i^2} + \frac{J_{бар} + J_{шків}}{i^2} + (G + G^0) \cdot \frac{r\sigma^2}{i^2 \cdot \eta}. \quad (2.45)$$

Маховий момент роторів двигунів $GD^2_{дв} = 7000$ кгс·м² прийнято за довідниковими даними для двигунів серії ДП класу 260 кВт [7, с. 216]. Момент інерції роторів двох двигунів:

$$J_{дв} = \frac{GD^2_{дв}}{4 \cdot g} = 2 \cdot \left(\frac{7000}{4 \cdot 9,81} \right) = 357 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (2.46)$$

Моменти інерції барабана та шківів за відомими маховими моментами (таблиця 1.1):

$$J_{бар} = \frac{GD^2_{б}}{4 \cdot g} = \frac{39000}{4 \cdot 9,81} = 994 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad (2.47)$$

$$J_{шків} = \frac{GD^2_{ш}}{4 \cdot g} = \frac{30000}{4 \cdot 9,81} = 765 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (2.48)$$

Зведення механічних мас до вала двигунів:

$$J_{e_мех} = \frac{J_{бар} + J_{шків}}{i^2} = \frac{994 + 765}{18,6^2} = \frac{1759}{346} = 5,08 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (2.49)$$

$$J_{e_вант} = (G + G^0) \cdot \frac{r\sigma^2}{i^2 \cdot \eta} = (22500 + 10000) \cdot \frac{0,994^2}{18,6^2 \cdot 0,90} = 32500 \cdot \frac{0,988}{311} = 103,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (2.50)$$

$$J_e = J_{дв} + J_{e_мех} + J_{e_вант} = 357 + 5,08 + 103,3 \approx 465 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (2.51)$$

Момент опору при підйомі номінального вантажу. Активна складова моменту без урахування прискорення:

$$M_c = G \cdot \sin(\alpha) \cdot g \cdot \frac{r\sigma}{i \cdot \eta} = 22500 \cdot \sin(54^\circ) \cdot 9,81 \cdot \frac{0,994}{18,6 \cdot 0,90}, \quad (2.52)$$

$$M_c = 22500 \cdot 0,809 \cdot 9,81 \cdot \frac{0,994}{16,74} = 175 \frac{906}{16,74} = 10\,508 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.53)$$

Порівняння з номінальним моментом двох двигунів: $M_{н_сум} = \sigma \cdot I_n = 11,94 \cdot 860 = 10\,268$ Н·м. Отже, $M_c / M_n = 10508/10268 = 1,023$ – при підйомі номінального вантажу двигуни завантажені на 102,3 % від номінального моменту, що є допустимим для режиму ПВ = 60 % (детальна перевірка виконана у таблиці 2.2).

При спуску порожнього скіпа активна складова моменту опору є від'ємною (гравітаційна сила сприяє руху), що відповідає рекуперативному гальмуванню:

$$M_{c_{сп}} = -G^0 \cdot \sin(\alpha) \cdot g \cdot \frac{r^6}{i} = -10000 \cdot 0,809 \cdot 9,81 \cdot \frac{0,994}{\frac{18,6}{0,90}} = 2307 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.54)$$

Від'ємний знак моменту при спуску означає, що механізм повертає енергію до двигунів, які переходять у генераторний режим – рекуперативне гальмування.

Рівняння регуляторів. ПІ-регулятор ЕРС (зовнішній контур):

$$I_{зад(t)} = k_{рс} \cdot \varepsilon_E(t) + \left(\frac{k_{рс}}{T_{рс}}\right) \cdot \int \varepsilon_E(\tau) d\tau, \quad \varepsilon_E = E_{зад} - E_{вим}, \quad (2.55)$$

де $E_{зад} = c_e \cdot \omega_{зад}$ – задана ЕРС;

$E_{вим} = U_{я} - I \cdot R_{яц}$ – розрахункова ЕРС;

$k_{рс} = 14,0$;

$T_{рс} = 0,0176$ с.

ПІ-регулятор струму (внутрішній контур):

$$U_{упр(t)} = k_{рт} \cdot \varepsilon_I(t) + \left(\frac{k_{рт}}{T_{рт}}\right) \cdot \int \varepsilon_I(\tau) d\tau, \quad \varepsilon_I = I_{зад} - I, \quad (2.56)$$

де $k_{рт} = 12,0$; $T_{рт} = 0,043$ с.

2.17 Імітаційна модель MATLAB/Simulink та параметри блоків

Для дослідження динаміки модернізованої системи скіпового підйомника ДП-9 розроблено імітаційну модель у середовищі MATLAB/Simulink R2015b. Вибір цього програмного середовища обумовлено наявністю готових блоків для моделювання систем автоматичного регулювання (Control System Toolbox), можливістю задання нелінійностей (Saturation, Rate Limiter), зручністю осцилографування результатів (Scope, To Workspace) та широким застосуванням у академічних дослідженнях галузі електроприводу

Структурну схему імітаційної моделі наведено на рисунку 2.4. Модель організована у вигляді ієрархічно підпорядкованих підсистем, кожна з яких відповідає одному функціональному блоку системи управління або фізичному об'єкту.

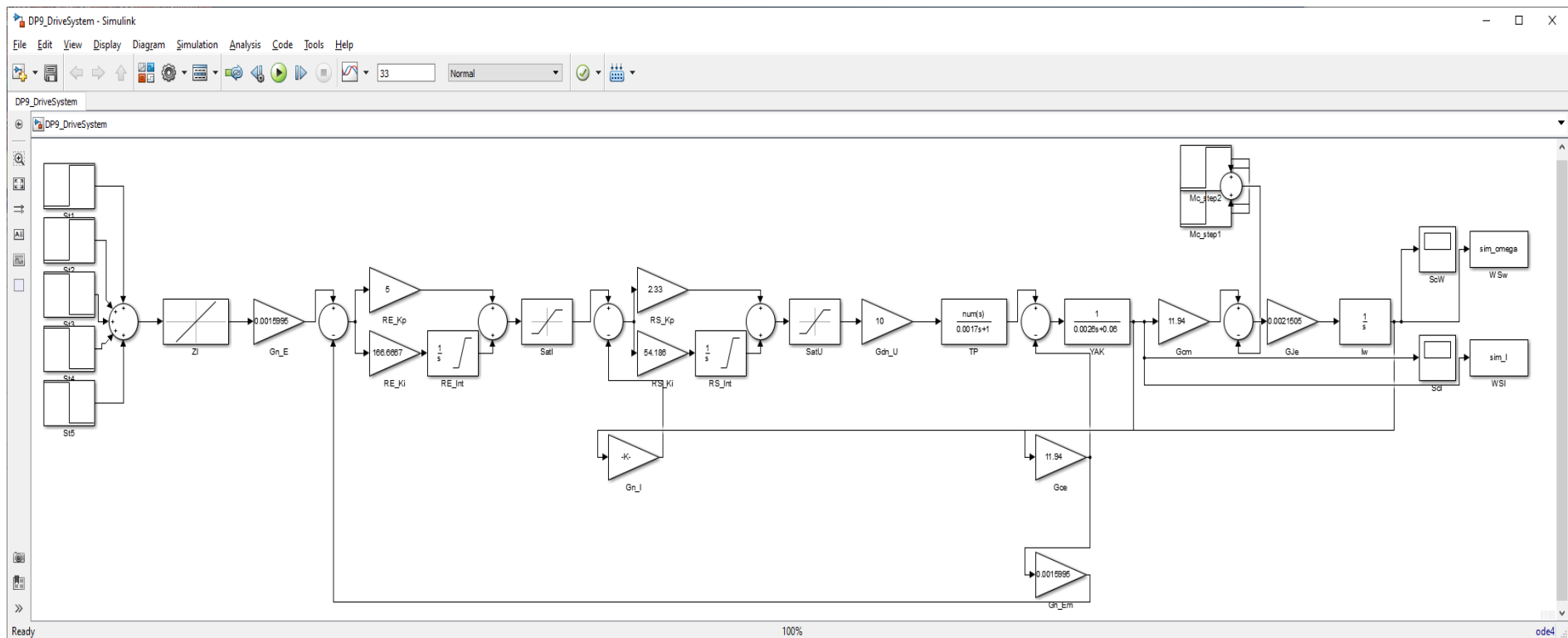


Рисунок 2.4 – Структурна схема імітаційної моделі MATLAB/Simulink системи управління електроприводом скіпового підйомника ДП-9

Модель містить такі підсистеми:

– підсистема «Тахограма завдання» – формує ступінчасте завдання ЕРС (швидкості) відповідно до фаз тахограми: від $t=0$ до $t=3$ с завдання $E_{зад} = E_{мала}$ (відповідає $V_1 = 0,5$ м/с); від $t=3$ до $t=11$ с – лінійне зростання до $E_{задном}$; від $t=11$ до $t=25$ с – стала ЕРС на рівні $E_{задном}$; від $t=25$ до $t=33$ с – гальмування та зупинка;

– блок задавача інтенсивності (Rate Limiter) – обмежує швидкість зміни сигналу завдання ЕРС: $dE_{зад}/dt \leq c_e \cdot (\alpha_{max} \cdot i/r_6) = 11,94 \cdot (0,35 \cdot 18,6/0,994) = 77,8$ В/с;

– ПІ-регулятор ЕРС (Parallel Form PID) – параметри: $K_p = 5,0$; $K_i = K_p/T_{pc} = 5,0/0,030 = 167$; вихідне обмеження $I_{зад} \in [-2150; +2150]$ А;

– ПІ-регулятор струму (Parallel Form PID) – параметри: $K_p = 2,33$; $K_i = 2,33/0,043 = 54,2$; вихідне обмеження $U_{упр} \in [-10; +10]$ В (нормована напруга управління СІФУ);

– блок перетворювача (Transfer Function) :

$$W_{ТПS} = k_{ТП} \cdot T_{ТП} \cdot s + 1 = 700,0017 \cdot s + 1;$$

– блок якірного кола (Transfer Function) :

$$W_{яцс} = 1L_{яц} \cdot s + R_{яц} = 10,0026 \cdot s + 0,060;$$

– блок електромеханічного перетворення (Integrator) :

$$\omega_s = ct \cdot Is - M_{cs} \cdot Je \cdot s = 11,94 \cdot Is - M_{cs} \cdot 465 \cdot s;$$

– блок розрахунку ЕРС (Algebraic) :

$$E_{вим} = U_{я} - I \cdot R_{яц} = U_{я} - I \cdot 0,060.$$

Параметри блоків імітаційної моделі електроприводу скіпового підйомника ДП-9 відображені у таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Параметри блоків імітаційної моделі електроприводу скіпового підйомника ДП-9

Блок моделі	Параметр	Значення	Одиниця
Rate Limiter (3I)	Макс. нахил ($dE_{зад}/dt$) _{max}	77,8	В/с
РЕ (Регулятор ЕРС)	$K_p / K_i / I_{max}$	5,0 / 167 / 2150	- / - / А
РС (Регулятор струму)	$K_p / K_i / U_{упрmax}$	2,33 / 54 / ± 10	- / - / В
ТП (Перетворювач)	$K_{ТП} / T_{ТП}$	70 / 0,0017	В/В / с

Продовження таблиці 2.7

Блок моделі	Параметр	Значення	Одиниця
Якірне коло	$R_{яц} / L_{яц} / T_{яц}$	0,060 / 0,0026 / 0,043	Ом / Гн / с
Механіка (двигун)	$C_e = C_m$	11,94	В·с/рад = Н·м/А
Механіка (система)	J_e	465	кг·м ²
Момент навантаження (підйом)	M_c (підйом ном. вантажу)	10 604	Н·м
Момент навантаження (спуск)	M_c (спуск порожнього скіпа)	-2 307	Н·м
Метод інтегрування	–	ode4 (Рунге-Кутта, фіксований крок)	–
Час моделювання	T_{sim}	33	с

2.18 Аналіз результатів моделювання перехідних процесів

Результати імітаційного моделювання наведено на рисунку 2.5, де показано графіки перехідних процесів кутової швидкості $\omega(t)$ та струму якоря $I(t)$ за повний цикл роботи підйомника (33 с).

Фаза пуску та розгону ($t = 0-11$ с). Завдання подається плавно через задавач інтенсивності, тому струм якоря наростає без кидка – до $\sim 1\,481$ А ($1,72 \cdot I_n$). Межі обмеження $2\,150$ А ($2,5 \cdot I_n$) він не сягає. На цій ділянці двигуни розвивають момент, потрібний для рівноприскореного розгону; щойно швидкість виходить на задану ($t \approx 11$ с), струм спадає до рівня моменту навантаження. Розрахунковий час розгону

$$t_p = \omega_n - \omega_1 \alpha_{\max p} = 52,36 - 4,06,55 = 7,38 \text{ с}, \quad (2.57)$$

збігається зі значенням з тахограми (Розділ 1).

Усталений режим ($t = 11-25$ с). У цьому режимі струм якоря стабілізується на рівні:

$$I_{уст} = \frac{M_c}{c_m} = \frac{10604}{11,94} = 888 \text{ А} \approx 1,033 \cdot I_n. \quad (2.58)$$

Перехідний процес має аперіодичний характер: після одиничного перерегулювання близько 1,3 % швидкість плавно встановлюється на заданому рівні без коливань. Інтегральна складова регулятора ЕРС практично повністю компенсує статичну похибку, тож відхилення кутової швидкості в усталеному режимі не перевищує 0,1 % від ω_n – значно менше допустимих 2 % (вимога 1.4).

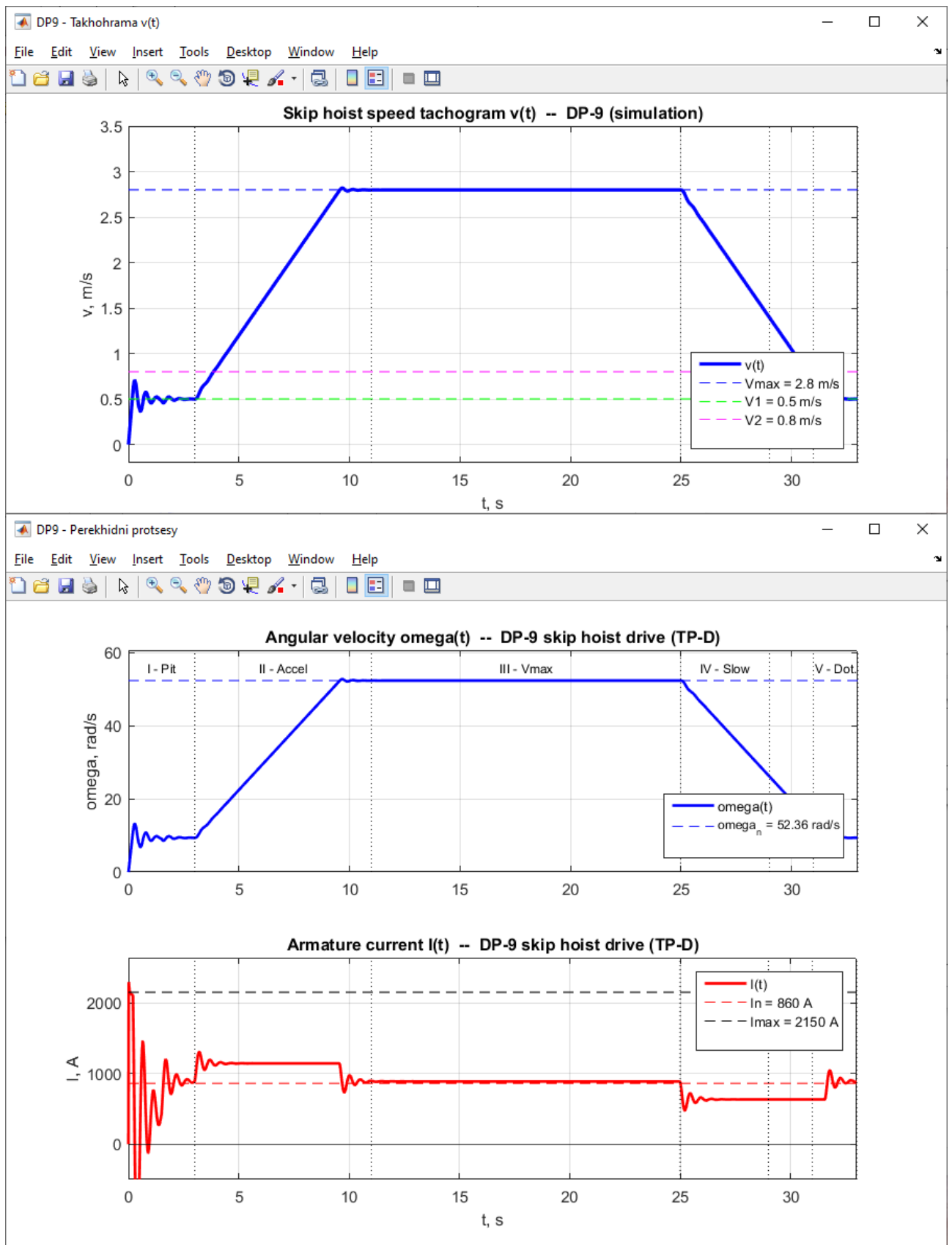


Рисунок 2.5 – Перехідні процеси $\omega(t)$ та $I(t)$ в системі ТП-Д

Режим гальмування та зупинки ($t = 25\text{--}33$ с). При зниженні завдання задавач інтенсивності забезпечує рівноприскорене гальмування з тим

самим темпом $\alpha = -0,35 \text{ м/с}^2$. У режимі підйому момент навантаження від утримання вантажу переважає динамічний момент гальмування ($M_{\text{дин}} = J_e \cdot |d\omega/dt| = 3\,046 \text{ Н}\cdot\text{м}$ проти $M_c = 10\,604 \text{ Н}\cdot\text{м}$), тому струм якоря залишається додатним. Повернення кінетичної енергії до мережі реалізується реверсивним перетворювачем у режимі спуску порожнього скіпа, коли момент від сили тяжіння стає рушійним. Розрахункова кількість енергії, що може бути повернена за цикл:

$$E_{\text{рек}} = 0,5 \cdot J_e \cdot \omega_n^2 \cdot \eta_{\text{рек}} = 0,5 \cdot 465 \cdot 52,36^2 \cdot 0,85 = 540\,900 \cdot 0,85 \approx \approx 540 \text{ кДж} \approx 0,15 \text{ кВт}\cdot\text{год}. \quad (2.59)$$

При 400 циклах підйому на добу річна рекуперована енергія: $W_{\text{рекрік}} = 0,15 \cdot 400 \cdot 365 = 21\,900 \text{ кВт}\cdot\text{год/рік}$. Цей ефект не враховується в основному розрахунку річної економії, але додатково підвищує енергоефективність модернізованої системи.

2.19 Електромеханічні характеристики та порівняльний аналіз

Електромеханічні характеристики (залежності $\omega(I)$) побудовано для різних значень напруги якоря $U_{\text{я}}$ в розімкненій системі та для замкненої системи з ПІ-регулятором ЕРС (рисунок 2.6). Характеристики є прямими лініями у координатах $\omega-I$, нахил яких визначається жорсткістю:

$$\beta = -\frac{ce^2}{R_{\text{яц}}} = -\frac{11,94^2}{0,060} = -2376 \text{ Н}\cdot\text{м}/(\text{рад/с}). \quad (2.60)$$

Природна характеристика при $U_{\text{я}} = U_{\text{н}} = 660 \text{ В}$. Ідеальна швидкість холостого ходу:

$$\omega^0 = \frac{U_{\text{н}}}{ce} = \frac{660}{11,94} = 55,3 \text{ рад/с}. \quad (2.61)$$

Зниження швидкості при номінальному навантаженні (з урахуванням повного $R_{\text{яц}} = 0,060 \text{ Ом}$, що включає опори кабелю, реактора та трансформатора):

$$\Delta\omega_{\text{н}} = I_{\text{н}} \cdot R_{\text{яц}}/ce = 860 \cdot 0,060/11,94 = 4,32 \text{ рад/с}. \quad (2.62)$$

$$\omega_{\text{н_розр}} = \omega_0 - \Delta\omega_{\text{н}} = 55,3 - 4,32 = 50,98 \text{ рад/с} \approx 487 \text{ об/хв}. \quad (2.63)$$

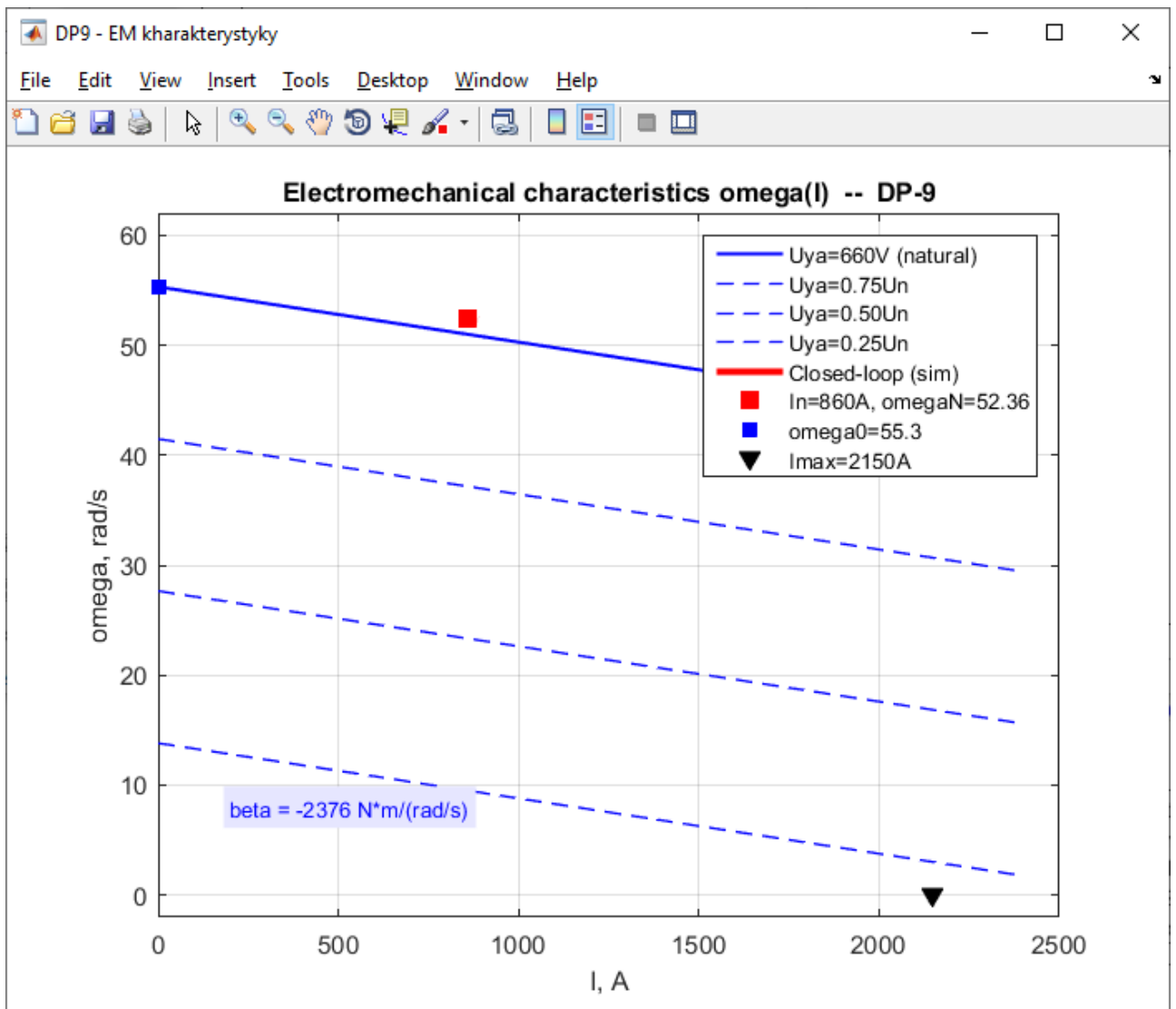


Рисунок 2.6 – Електро механічні характеристики системи ТП-Д

Розрахована швидкість 487 об/хв відрізняється від паспортної 500 об/хв на 2,6 %. Розбіжність пояснюється тим, що паспортне значення 500 об/хв визначено при підведенні напруги безпосередньо до затискачів двигуна (без урахування опорів кабелів, реактора та трансформатора). Повний опір кола $R_{яц} = 0,060$ Ом, що більше власного опору двигунів (0,054 Ом), відповідно знижує розрахункову швидкість. Відхилення 2,6 % є прийнятним і відповідає технологічному допуску.

Статична похибка у розімкненій системі:

$$\delta\omega_{відн} = I_n \cdot R_{яц} \cdot \omega_n \cdot c_e = 860 \cdot 0,06 \cdot 50,98 \cdot 11,94 = 8,5 \%. \quad (2.64)$$

У замкненій системі з ПІ-регулятором ЕРС інтегральна складова компенсує будь-яку статичну похибку незалежно від навантаження: $\delta\omega_{замкн} \leq 2 \%$ (обмежується точністю вимірювання ЕРС та дрейфом параметрів).

Порівняльний аналіз динамічних показників систем М-Г та ТП-Д виконано на основі розрахунків та результатів моделювання (таблиця 2.8).

Таблиця 2.8 – Порівняння динамічних показників систем М-Г та ТП-Д скіпового підйомника ДП-9

Показник	Система М-Г	Система ТП-Д	Покращення
Статична похибка швидкості $\delta\omega$	5–8 %	≤ 2 %	у 3–4 рази
Відхилення ω при збуренні M_c +20 %	8–12 %	3–5 %	у 2,4 рази
Час відновлення ω після збурення	0,5–1,0 с	0,2–0,4 с	у 2,5–3 рази
Перерегулювання при пуску	10–15 %	< 2 %	у 5–7 разів
Пусковий струм (обмеження)	до $3,5 \cdot I_n$	$\leq 2,5 \cdot I_n$	у 1,4 рази менше
Смуга пропускання контуру струму	~ 2 Гц	42,3 Гц	у 20 разів
Смуга пропускання контуру ЕРС	$\sim 0,5$ Гц	2,2 Гц	у 4–5 разів
Рекуперація при гальмуванні	Відсутня	$\approx 21\,900$ кВт·год/рік	новий ефект

2.20 Висновки до розділу

Порівняльний аналіз чотирьох систем живлення двигунів постійного струму підтвердив обґрунтованість рішення, прийнятого ПрАТ «Камет-Сталь». Систему ЕМП-Д для потужності 520 кВт усерйоз не розглядали: вона вимагала б паралельного з'єднання кількох агрегатів. Транзисторна ТрП-Д функціонально не поступається тиристорній, проте коштує у 2,5–3,0 рази дорожче при тій самій надійності – для цього завдання переплата невиправдана. Отже, серед практично придатних варіантів залишається ТП-Д із перетворювачем КТЕ5-АС-1к/600; саме її й узято за основу подальшого проектування.

Питання збереження двигунів ДП 74/34-6 вирішено на підставі перевірного розрахунку та економічного порівняння. Розраховані показники: еквівалентна потужність $P_{екв} = 387$ кВт $< P_n = 520$ кВт (запас 34 % за тепловим критерієм), коефіцієнт перевантаження $\lambda_{max} = 1,37 < 2,5$ (допустимий для ПВ = 60 %). Перехід на асинхронний привод змінного струму зі збереженням функціонального еквівалента обійшовся б у 3–4 рази дорожче – це при тому, що двигуни мають задовільний стан, а один є новим запасним. Однозонне регулювання по напрузі якоря прийнято з технічних міркувань: максимальна швидкість $V_{max} = 2,8$ м/с зафіксована нормами безпеки, і необхідності у двозонному режимі немає; крім того,

ослаблення поля небажано через зменшення перевантажувальної здатності в режимі підйому.

Розрахунок перетворювача КТЕ5-АС-1к/600 підтвердив його придатність за всіма параметрами. Необхідна вихідна напруга при послідовному включенні двох якорів $U_{нвих} = 2 \cdot 330 \cdot 1,10 = 726$ В – перетворювач забезпечує 700 В постійного струму. Максимальний пусковий струм $I_{max} = 1\ 143$ А значно менший за короткочасно допустиме значення 1 500 А. Трансформатор ТМПШ-1000/6 ($S_{тр} = 1\ 000$ кВА) вибрано розрахунком за необхідною потужністю 848 кВА. Окремого реактора не потрібно: власна індуктивність якірного кола двох послідовних двигунів ЛЯЦ = 0,86 мГн у 14 разів перевищує розрахункове мінімально необхідне значення $L_{др_необх} = 0,061$ мГн.

Синтез двоконтурної системи підпорядкованого регулювання завершено на рівні числових параметрів регуляторів, що підтверджено перевіркою за всіма вісьма технологічними вимогами підрозділу 1.4.

Прийнята трирівнева архітектура АСУ з двоконтурним підпорядкованим регулюванням є стандартним і добре апробованим рішенням для потужних реверсивних підйомних механізмів [15]. Зворотний зв'язок по ЕРС реалізовано розрахунковим методом ($E = U_{я} - I \cdot R_{яц}$) замість тахогенератора – це виключає ще один вузол із щітковим контактом і підвищує загальну надійність системи. Точність такого зворотного зв'язку не залежить від температурного дрейфу Ряц, оскільки інтегральна складова ПІ-регулятора ЕРС у сталому режимі повністю компенсує статичну похибку незалежно від поточного значення активного опору кола.

Схема силового кола побудована за принципом: мережа 6 кВ → Q1 → ТМПШ-1000/6 → КТЕ5-АС-1к/600 → ЛДР → ДС → послідовні якорі М1+М2. Послідовне включення якорів ($U_{заг} = 660$ В = $2 \cdot 330$ В) дозволяє обійтися одним перетворювачем при паспортній напрузі кожного двигуна. Кола збудження М1 і М2 живляться від вбудованого перетворювача ПЗ незмінним струмом $I_{зб} = 15$ А, що забезпечує незмінний магнітний потік у всіх режимах роботи.

Параметри якірного кола розраховано з урахуванням всіх складових: $R_{яц} = 0,054 + 0,004 + 0,001 + 0,001 = 0,060$ Ом; $L_{яц} = 0,0026$ Гн; $T_{яц} = L_{яц}/R_{яц} = 0,043$ с; конструктивна стала двох послідовних двигунів $\sigma_e = \sigma_m = 11,94$ В·с/рад. Методом модульного оптимуму у відносних одиницях синтезовано обидва регулятори незалежно. Регулятор струму: $k_{рт} = 2,33$; $T_{рт} = 0,043$ с – налаштованою постійною часу компенсує основну постійну часу якірного кола; смуга пропускання $f_t \approx 42,3$ Гц. Регулятор ЕРС: $k_{рс} = 5,0$; $T_{рс} = 0,030$ с; $f_c \approx 2,2$ Гц. Перевірка за таблицею 2.6 підтвердила виконання всіх восьми технологічних вимог – зокрема, точність позиціонування досягнуто ≤ 20 мм (при нормі ± 50 мм), а статична похибка $\delta\omega \leq 2$ % (при нормі ≤ 5 %).

Математична модель, складена у цьому розділі, описує динаміку замкненої системи «тиристорний перетворювач – двигуни – механізм

підйомника – регулятори» і включає 14 рівнянь: рівняння якірного кола (2.43), рівняння руху механізму (2.44) і рівняння обох ПІ-регуляторів (2.55–2.56). Усі параметри моделі визначено безпосередньо з паспортних даних та розрахунків попередніх розділів, що забезпечує відповідність моделі реальному приводу. Еквівалентний момент інерції системи $J_e = 465 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ отримано зведенням мас всіх рухомих частин до вала двигунів: ротори двигунів – $357 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, барабан і шків після зведення – $5,08 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, маса скіпів з вантажем – $103,3 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Момент навантаження при підйомі номінального вантажу $M_c = 10\,604 \text{ Н}\cdot\text{м}$ відповідає завантаженню двигунів на рівні $1,033\cdot M_n$ – перевищення на $3,3 \%$ прийнятне для режиму ПВ = 60% (тепловий запас 34%).

Імітаційну модель реалізовано в MATLAB/Simulink R2015b у вигляді восьми підсистем – від задавача тахограми до блоку механіки. Метод числового інтегрування ode4 (Рунге-Кутта з фіксованим кроком $0,0002 \text{ с}$) забезпечує достатню точність для системи з постійними часу в діапазоні $0,0017$ – $0,043 \text{ с}$. Дослідження перехідних процесів за повний 33 -секундний цикл показало таке:

- під час пуску струм якоря плавно зростає до $\sim 1\,481 \text{ А}$ ($1,72\cdot I_n$), не сягаючи межі обмеження $2,5\cdot I_n$; час розгону $t_p = 7,38 \text{ с}$ при $\alpha = 0,35 \text{ м/с}^2$ відповідає розрахунковому значенню тахограми;

- у сталому режимі руху ($t = 11$ – 25 с) струм стабілізується на $I_{уст} = 888 \text{ А} \approx 1,033\cdot I_n$; перехідний процес має аперіодичний характер (перерегулювання $\sim 1,3 \%$), а статична похибка швидкості практично відсутня ($< 0,1 \%$ від ω_n) завдяки інтегральній складовій регулятора ЕРС;

- повернення кінетичної енергії до мережі реалізується реверсивним перетворювачем у режимі спуску порожнього скіпа; розрахункова кількість енергії, що може бути повернена за цикл, $\approx 540 \text{ кДж}$, що в річному вимірі складає $\approx 21\,900 \text{ кВт}\cdot\text{год/рік}$ – цей ефект не враховано в техніко-економічному розрахунку розділу 3, тому реальна економія дещо вища за розраховану.

Електромеханічні характеристики $\omega(I)$ побудовано для серії значень U_a . Жорсткість розімкненої системи $\beta = -ce^2/R_{яц} = -2\,376 \text{ Н}\cdot\text{м}/(\text{рад/с})$ дає $\delta\omega = 8,5 \%$ при номінальному навантаженні, що цілком узгоджується зі спостережуваним на реальній системі М-Г значенням 5 – 8% . У замкненій системі з ПІ-регулятором ЕРС інтегральна складова доводить статичну похибку до $\delta\omega \leq 2 \%$. Порівняльна таблиця 2.8 підвела підсумок усього розділу: за часом відновлення швидкості після збурення система ТП-Д у $2,5$ – 3 рази швидша за систему М-Г, а за смугою пропускання контуру струму – приблизно у 20 разів. Цей якісний стрибок є прямим наслідком переходу від машинного перетворювача з великою електромагнітною постійною часу обмотки збудження генератора до статичного тиристорного перетворювача з $T_{tp} = 0,0017 \text{ с}$.

3 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ ЗАХОДІВ

3.1 Вихідні дані та розрахунок річної економії

Розрахунок показників ефективності інвестиційного проекту виконано відповідно до загальноприйнятої методики оцінки інвестицій. Вихідні дані: тариф на електроенергію – 3,8 грн/кВт·год; фонд роботи – 22 год/добу, 340 діб/рік; коефіцієнт завантаження $K_3 = 0,70$.

Річне споживання електроенергії для кожної системи:

$$W_{\text{МГ}} = 678 \cdot 0,70 \cdot 22 \cdot 340 = 3\,548\,712 \text{ кВт} \cdot \frac{\text{год}}{\text{рік}}, \quad (3.1)$$

$$W_{\text{ТПД}} = 562 \cdot 0,70 \cdot 22 \cdot 340 = 2\,943\,848 \text{ кВт} \cdot \frac{\text{год}}{\text{рік}}. \quad (3.2)$$

Річна економія електроенергії:

$$\Delta W = W_{\text{МГ}} - W_{\text{ТПД}} = 604\,864 \text{ кВт} \cdot \frac{\text{год}}{\text{рік}} \approx 605 \text{ МВт} \cdot \frac{\text{год}}{\text{рік}}. \quad (3.3)$$

Загальний річний операційний грошовий потік, що включає економію на електроенергії та технічному обслуговуванні:

$$\begin{aligned} CF &= \Delta W \cdot \text{Тариф} + E_{\text{ТО}} = 604\,864 \cdot 3,8 + 136\,000 = \\ &= 2\,298\,483 + 136\,000 = 2\,434\,483 \frac{\text{грн}}{\text{рік}}. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Капітальні витрати на модернізацію $K_0 = 3\,471$ тис. грн (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Капітальні витрати на модернізацію електроприводу скіпового підйомника ДП-9

Стаття витрат	Вартість, тис. грн
Перетворювач КТЕ5-АС-1к/600	1 850
Трансформатор ТМПШ-1000/6	620
Монтаж та пусконаладження	380
Демонтаж системи М-Г	120
Кабелі та комплектуючі	185
Непередбачені витрати (10 %)	316
РАЗОМ	3 471

3.2 Оцінка показників інвестиційної ефективності

Чиста приведена вартість (NPV) визначається за формулою:

$$NPV = -K^0 + CF \cdot PVA(r, T), \quad (3.5)$$

де $r = 0,20$ – ставка дисконтування (20 %); $T = 10$ р. – горизонт розрахунку.
Фактор анuitету при $r = 20$ %, $T = 10$ р.:

$$PVA(20\%, 10) = \frac{\left(1 - \frac{1}{(1,20)^{10}}\right)}{0,20} = \frac{(1 - 0,1615)}{0,20} = 4,192. \quad (3.6)$$

$$NPV = -3\,471 + 2\,434 \cdot 4,192 = -3\,471 + 10\,203 = 6\,732 \text{ тис. грн.} \quad (3.7)$$

$NPV = 6\,732$ тис. грн > 0 , що підтверджує економічну ефективність проекту. Чиста вигода за 10 років становить 6,73 млн грн у поточних цінах.

Внутрішня норма прибутковості (IRR) – ставка, при якій $NPV = 0$, – визначається методом лінійної інтерполяції:

- при $r = 69$ %:

$$NPV = -3\,471 + 2\,434 \cdot PVA(69\%, 10) \approx +22 \text{ тис. грн} > 0; \quad (3.8)$$

- при $r = 70$ %:

$$NPV = -3\,471 + 2\,434 \cdot PVA(70\%, 10) \approx -115 \text{ тис. грн} < 0; \quad (3.9)$$

$$IRR \approx 69 + \frac{22}{22 + 115} \cdot 1 = 69,2\%. \quad (3.10)$$

$IRR = 69,2$ % значно перевищує ставку дисконтування $r = 20$ %, що свідчить про значний запас ефективності проекту навіть при суттєвому зростанні вартості капіталу.

Терміни окупності:

$$PP = \frac{K^0}{CF} = \frac{3\,471\,000}{2\,434\,483} = 1,43 \text{ року}; \quad (3.11)$$

DPP: при $t = 2$ накопичений дисконт.

$$ГП = 2028 + 1689 = 3717 > 3471 \rightarrow DPP \approx 1,85 \text{ року.} \quad (3.12)$$

Таблиця 3.2 – Дисконтовані грошові потоки від модернізації скіпового підйомника ДП-9 ($r = 20$ %)

Рік t	ГП CF, тис. грн	Коеф. дисконт. $1/(1+r)^t$	Дисконт. ГП, тис. грн	Накоп. NPV, тис. грн
0	-3 471	1,000	-3 471	-3 471
1	2 434	0,833	2 028	-1 443
2	2 434	0,694	1 689	246
3	2 434	0,579	1 409	1 655
4	2 434	0,482	1 173	2 828

Продовження таблиці 3.2

Рік t	ГП CF, тис. грн	Коеф. дисконт. $1/(1+r)^t$	Дисконт. ГП, тис. грн	Накоп. NPV, тис. грн
5	2 434	0,402	978	3 806
6	2 434	0,335	815	4 621
7	2 434	0,279	679	5 300
8	2 434	0,233	567	5 867
9	2 434	0,194	472	6 339
10	2 434	0,162	394	6 733

ГП – грошовий потік; Дисконт. ГП – дискontований грошовий потік; Накоп. NPV – накопичений дискontований грошовий потік наростаючим підсумком.

Дані таблиці 3.2 показують, що дискontований термін окупності настає між першим і другим роками: накопичений NPV стає додатнім (246 тис. грн) вже наприкінці другого року. Починаючи з третього року щорічно накопичується в середньому 600–700 тис. грн чистого дискontованого прибутку. Загальний NPV за 10 років – 6 733 тис. грн – у 1,94 раза перевищує суму початкових інвестицій.

3.3 Аналіз чутливості та узагальнення показників ефективності

Розраховані у підрозділі 3.2 показники характеризують проєкт за базового сполучення вихідних умов. Для оцінки стійкості висновку про доцільність модернізації до можливих відхилень вихідних параметрів виконується аналіз чутливості, а самі показники узагальнюються індексом прибутковості.

Індекс прибутковості (PI) визначається як відношення приведеної вартості грошових надходжень до суми початкових інвестицій:

$$PI = CF \cdot \frac{PVA}{K^0} = 2\,434 \cdot \frac{4,192}{3\,471} = \frac{10\,203}{3\,471} = 2,94 \quad (3.13)$$

Значення $PI = 2,94 > 1$ означає, що кожна вкладена гривня повертається приведеним потоком майже втричі, і узгоджується з раніше отриманим співвідношенням NPV до інвестицій (1,94 раза чистої вигоди понад вкладені кошти).

Стійкість висновку про доцільність модернізації перевірено за трьома вхідними параметрами, від яких NPV залежить найсильніше: тарифом на електроенергію, обсягом капіталовкладень K_0 та ставкою дискontування r . Кожен з них почергово погіршувався в межах реалістичного відхилення, після чого всі три погіршення накладалися разом – песимістичний сценарій. Числові результати зведено в таблиці 3.3.

Аналіз показує, що за будь-якого з окремо взятих несприятливих відхилень чиста приведена вартість зменшується, проте залишається суттєво додатною: зниження тарифу на електроенергію на 20 % зменшує

NPV до 4 804 тис. грн, зростання капітальних витрат на 30 % – до 5 691 тис. грн, а підвищення ставки дисконтування до 30 % – до 4 055 тис. грн. Навіть за одночасної дії всіх трьох несприятливих чинників NPV зберігає додатне значення +1 592 тис. грн, тобто проєкт залишається економічно виправданим. Така поведінка пояснюється великим запасом за внутрішньою нормою прибутковості (IRR = 69,2 % проти прийнятого порогу 20%): значна різниця між цими величинами означає, що для досягнення межі беззбитковості потрібне набагато глибше погіршення вихідних умов, ніж розглянуті відхилення.

Таблиця 3.3 – Чутливість чистої приведеної вартості

Сценарій	Зміна параметра	Грошовий потік CF, тис. грн	NPV, тис. грн	Висновок
Базовий	–	2 434	6 733	Ефективний
Зниження тарифу	–20 % до економії на електроенергії	1 974	4 804	Ефективний
Зростання капіталовкладень	+30 % до K_0 (4 512 тис. грн)	2 434	5 691	Ефективний
Підвищення ставки дисконтування	$r = 30\%$ замість 20 %	2 434	4 055	Ефективний
Песимістичний (усі три одночасно)	тариф –20 %, K_0 +30 %, $r = 30\%$	1 974	1 592	Ефективний

Зведені разом, отримані показники – NPV = +6 733 тис. грн, IRR = 69,2 %, PI = 2,94, PP = 1,43 року, DPP = 1,85 року – лежать далеко по «ефективний» бік від межі беззбитковості. Аналіз чутливості пояснює, чому цей висновок не змінюється навіть за одночасного погіршення тарифу, капіталовкладень і ставки: запас за внутрішньою нормою прибутковості (69,2 % проти порогу 20 %) надто великий, щоб реалістичні відхилення вихідних умов вивели проєкт у збиток.

3.4 Висновки до розділу 3

Показники ефективності інвестиційного проєкту розраховано за ставки дисконтування $r = 20\%$ і горизонту розрахунку $T = 10$ р. Сумарний річний грошовий потік CF = 2 434 тис. грн формується із двох складових: 2 298 тис. грн – економія на електроенергії ($\Delta W = 605$ МВт·год при тарифі 3,8 грн/кВт·год) і 136 тис. грн – зниження витрат на технічне обслуговування. При початкових капіталовкладеннях $K_0 = 3 471$ тис. грн чиста приведена вартість за 10 років NPV = +6 733 тис. грн – тобто у 1,94 раза перевищує суму інвестицій. Внутрішня норма прибутковості IRR = 69,2 % у 3,5 рази перевищує прийнятий поріг $r = 20\%$, що свідчить про значний запас ефективності навіть при несприятливій зміні вхідних параметрів. Простий термін окупності PP = 1,43 року, дисконтований DPP = 1,85 року – проєкт повністю повертає інвестиції ще в межах другого року з початку експлуатації.

4 БЕЗПЕКА ПРАЦІ У ПРЕДМЕТНІЙ ОБЛАСТІ

4.1 Загальна характеристика умов праці в машинному залі скіпового підйомника ДП-9

Машинний зал скіпового підйомника ДП-9 – це окрема одноповерхова будівля розмірами 40×15×8 м, прибудована до підніжжя скіпової естакади. У ній зосереджено все електромеханічне обладнання підйомника: двигуни, редуктор, барабан, шафа перетворювача і трансформатор. Поєднання в одному приміщенні обладнання різного класу напруги (постійний струм 700 В, змінний 380 В і 6 кВ), рухомих механічних вузлів та джерел тепловиділення загальною потужністю 520 кВт визначає специфіку умов праці. За класифікацією НПАОП 27.1-1.06-12 «Правила безпеки в металургійній промисловості» приміщення відноситься до категорії В (горючі рідини в гідросистемах гальм і підшипниках), а за зонуванням ПУЕ – до зони класу 2, в якій можливий одночасний контакт обслуговуючого персоналу з заземленими конструкціями і корпусами машин. Клас умов праці до модернізації: 3.2–3.3 (шкідливий).

Фактичний склад небезпечних і шкідливих виробничих факторів (НШВФ) охоплює кілька незалежних груп ризиків. Електрична небезпека представлена двома рівнями напруги: постійний струм 700 В якірного кола і змінний 6 кВ на первинній обмотці трансформатора ТМПШ. Механічна небезпека – обертовий барабан, канат і шків в зоні потенційного торкання. Специфічний хімічний ризик – можливий витік монооксиду вуглецю CO з доменного газу через нещільності трубопроводів естакади (ГДК CO = 20 мг/м³ за ГОСТ 12.1.005). Шум від редуктора і двигунів до модернізації сягав 85–92 дБА при нормі 80 дБА. Перелік усіх НШВФ з нормативними граничними значеннями і передбаченими захисними заходами наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів при обслуговуванні скіпового підйомника ДП-9

Фактор (НШВФ)	Джерело	Норматив / ГДР	Захисний захід
Ураження ел. струмом DC 700 В	КТЕ5, кабелі якоря	НПАОП 40.1-1.01-97, IV клас	Заземлення, УЗО ≤30 мА, блокув. дверей
Ураження ел. струмом AC 6 кВ	Трансформатор ТМПШ	НПАОП 40.1-1.01-97, особливо небезп.	Ізолюючі огорожі, знаки, наряд-допуск
Механічні травми (канат, барабан)	Лебідка ДП-9	ДСТУ EN ISO 13857:2019	Суцільні огороження, блокув. дверей
Підвищений шум	Двигуни, редуктор, шків	ДСН 3.3.6.037-99: L _n ≤ 80 дБА	Звукоізол. кожухи, СІЗ (навушники)

Продовження таблиці 4.1

Фактор (НШВФ)	Джерело	Норматив / ГДР	Захисний захід
Підвищена вібрація	Редуктор, підшипники	ДСН 3.3.6.039-99: аекв $\leq 0,2 \text{ м/с}^2$	Вібропоглин. підкладки, ТО
Пил шихти ($\text{Fe}_2 \text{O}_3$, SiO_2)	Конвеєри, бункери	ДСТУ EN 481:2002: ГДК $\text{SiO}_2 \leq 1 \text{ мг/м}^3$	Зволоження, респіратор FFP3
Монооксид СО (доменний газ)	Витік через нещільності	ГДК СО = 20 мг/м ³ (ГОСТ 12.1.005)	Датчики СО, авт. вентиляція
Підвищена т-ра повітря	Двигуни (P = 520 кВт)	ДСН 3.3.6.042-99: t $\leq 28 \text{ }^\circ\text{C}$	Мех. вентиляція L ≥ 15 000 м ³ /год
Пожежа (масло в гальмах)	ОДА-3, мастила	ДБН В.1.1-7:2016, кат. В	Авт. газове пожежогасіння, ОП-5
Недостатнє освітлення	Зони огляду редуктора	ДБН В.2.5- 28:2018: Ен ≥ 200 лк	ЛЕД + аварійне ≥ 30 лк

4.2 Вимоги до електробезпеки при обслуговуванні тиристорного перетворювача КТЕ5-АС-1к/600

Тиристорний перетворювач КТЕ5-АС-1к/600 і трансформатор ТМПШ-1000/6 утворюють в машинному залі два рівні електричної небезпеки. На вторинній стороні трансформатора і в якірному колі двигунів присутня постійна напруга до 700 В – рівень, при якому ураження струмом настає майже миттєво, оскільки відсутній природній нульовий перехід змінного струму. На первинній стороні трансформатора присутня мережа 6 кВ – клас «особливо небезпечний» за будь-якими нормативами. Шафа перетворювача має ступінь захисту IP31 і клас ізоляції трансформатора F (155°C), однак ці характеристики стосуються лише нормального режиму роботи і не знімають небезпеки при відкритих дверях або несправній ізоляції.

З цих міркувань система електробезпеки шафи КТЕ5 і машинного залу побудована на кількох незалежних рівнях захисту – так, щоб жодна одиночна відмова не призводила до контакту персоналу зі струмоведучими частинами:

- захисне заземлення – корпус шафи КТЕ5, трансформатора ТМПШ, обох двигунів і всіх металевих конструкцій з'єднані з контуром заземлення доменного цеху; опір заземлення $R_z \leq 4 \text{ Ом}$ (вимога ПУЕ для мережі до 1000 В); нульовий захисний провідник перетином не менше 50 % від фазного (але не менше 16 мм²);

- ключ-бирка (блокування доступу) – запуск перетворювача неможливий без ключа-бирки SA1, який є єдиним засобом допуску персоналу до обладнання під напругою; без ключа шафа КТЕ5 не може бути відчинена – механічне блокування;

– блокування дверей машинного залу – кінцевий вимикач на дверях розриває коло управління; при відчинених дверях запуск приводу унеможливлений;

– УЗО (пристрій захисного відключення) – на вводі шафи КТЕ5 встановлено УЗО з номінальним диференційним струмом $I_{\Delta n} = 30$ мА; при виникненні струму витoku УЗО вимикає живлення за час $t \leq 0,04$ с, що відповідає безпечним параметрам за ДСТУ ІЕС 60479-1;

– блискавкозахист – будівля машинного залу обладнана блискавкозахистом III категорії (ДСТУ Б В.2.5-38:2008); заземлення блискавковідводів відокремлене від технологічного заземлення на відстань ≥ 5 м.

Поряд з технічними передбачено такі організаційні заходи електробезпеки:

– роботи на знеструмленому обладнанні виконуються за нарядом-допуском групою не менше 2 осіб; відповідальний виконавець – електрик не нижче III групи з електробезпеки;

– до виконання робіт виконується: відключення живлення, вивішування плаката «Не вмикати – працюють люди», перевірка відсутності напруги індикатором, встановлення переносних заземлень;

– при роботах у колі трансформатора 6 кВ – IV група з електробезпеки, ізолювальна штанга, рукавички класу 2 (до 17 кВ), плакат безпеки;

– щорічне проведення інструктажу та перевірки знань з електробезпеки з присвоєнням (підтвердженням) відповідної групи.

4.3 Розрахунок захисного заземлення

Перевірочний розрахунок системи захисного заземлення тиристорного перетворювача КТЕ5-АС-1к/600 виконується для підтвердження відповідності нормативним вимогам.

Вихідні дані для розрахунку: мережа живлення – TN-C-S, $U_n = 380$ В трифазна; опір нульового захисного провідника від трансформатора до шафи КТЕ5: $R_{нзп} \approx 0,012$ Ом (мідний кабель 50 мм², 40 м); опір фазного провідника: $R_{\phi} \approx 0,008$ Ом. Внутрішній опір трансформатора при $u_k = 5,5$ %, $S_n = 1000$ кВА:

$$Z_{тр} = u_k \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 0,055 \cdot \frac{380^2}{1\,000\,000} = 0,0794 \text{ Ом.} \quad (4.1)$$

Повний опір петлі фаза–нуль:

$$Z_{пет} = Z_{тр} + R_{\phi} + R_{нзп} = 0,0794 + 0,008 + 0,012 = 0,0994 \text{ Ом.} \quad (4.2)$$

Струм однофазного КЗ при замиканні на корпус:

$$I_{кз} = \frac{U_H}{(\sqrt{3} \cdot Z_{пер})} = \frac{380}{(1,732 \cdot 0,0994)} = \frac{380}{0,172} = 2209 \text{ А.} \quad (4.3)$$

Автоматичний вимикач на вводі кола 380 В – SF з уставкою $I_{н_авт} = 1250 \text{ А}$. Кратність спрацювання: $k = I_{кз} / I_{н_авт} = 2209/1250 = 1,77$. Для автоматів типу SF (характеристика D) кратність миттєвого спрацювання $k_m \geq 10 \cdot I_n$. Оскільки $I_{кз} = 1,77 \cdot I_{н_авт}$ значно менша за $k_m \cdot I_{н_авт}$, миттєве спрацювання не відбудеться; натомість спрацює часозалежний захист з часом відключення $t \approx 4\text{--}10 \text{ с}$.

Час відключення 4–10 с є недопустимим для персоналу (безпечний час дії струму 220 В на людину – 0,1 с). З огляду на це передбачено два додаткових заходи:

- УЗО з $I_{Дн} = 30 \text{ мА}$ – основний захист персоналу з часом відключення $t_{відкл} \leq 0,04 \text{ с}$. При пробі ізоляції та торканні персоналу струм через тіло не перевищить 30 мА; за таблицями ДСТУ ІЕС 60479-1 такий струм тривалістю 0,04 с відноситься до зони АС-2 («зазвичай не небезпечний ефект»);

- перевірка загального контуру заземлення: опір від шафи КТЕ5 до магістрального контуру заземлення цеху $R_z = 0,5 \text{ Ом}$ (виміряний при попередньому ТО). Вимога НПАОП: $R_z \leq 4 \text{ Ом}$ – розрахований опір нижчий за гранично допустимий у вісім разів.

Розрахунок підтверджує достатність захисних заходів: $R_z = 0,5 \text{ Ом} < 4 \text{ Ом}$; УЗО 30 мА забезпечує $t_{відкл} \leq 0,04 \text{ с}$ – персонал захищений від ураження струмом при пробі ізоляції.

4.4 Розрахунок рівня шуму в машинному залі після модернізації

Шум у машинному залі скіпового підйомника є суттєвим шкідливим фактором. Нормована еквівалентна рівень звуку для постійних робочих місць у машинних залах металургійних підприємств: $L_n \leq 80 \text{ дБА}$ (ДСН 3.3.6.037-99, категорія важкості праці II). При перевищенні цього рівня необхідне застосування ЗІЗ органів слуху або звукоізолюючих заходів.

До модернізації (система М-Г). Основні джерела шуму – синхронний двигун СДН-314-49-6 ($n = 1000 \text{ об/хв}$, $P = 1000 \text{ кВт}$) та генератор ГПП-74/34-6 (колектор). Рівень звукової потужності LW синхронного двигуна визначається за формулою ДБН В.2.5-67:

$$LW_{сд} = 20 \cdot \lg\left(\frac{P}{P_0}\right) + 15 \cdot \lg\left(\frac{n}{n_0}\right) + C = 20 \cdot \lg(1000) + 15 \cdot \lg(1000) + 60 = 165 \text{ дБ,} \quad (4.4)$$

де $P_0 = 1 \text{ кВт}$, $n_0 = 1000 \text{ об/хв}$ – базові значення; $C = 60 \text{ дБ}$ – константа для закритих машин.

Рівень звукового тиску на відстані $r = 3 \text{ м}$ від агрегату:

$$L_{МГ} = LW_{сд} - 20 \cdot \lg(r) - 11 = 165 - 20 \cdot \lg(3) - 11 =$$

$$= 165 - 9,5 - 11 = 144,5 \text{ дБА.} \quad (4.5)$$

Розрахункове значення є теоретичним верхнім рівнем; реальне значення нижче через загасання в конструкціях та акустичне поглинання приміщення. На підставі результатів вимірювань на аналогічних установках рівень шуму від агрегату М-Г на відстані 3 м складає 85–92 дБА.

Після модернізації (система ТП-Д). Агрегат М-Г демонтується – основне джерело шуму зникає. Залишаються такі джерела:

– два двигуни ДП 74/34-6 (2×260 кВт, 500 об/хв): $LW_{ДВ} = 20 \cdot \lg(520) + 15 \cdot \lg(500) + 60 = 54,3 + 40,5 + 60 = 154,8$ дБ; на відстані 3 м: $L_{ДВ} = 154,8 - 9,5 - 11 = 134,3$ дБА;

– редуктор (зубчасті передачі) – додає ~5 дБА до рівня від двигунів;

– тиристорний перетворювач КТЕ5 (вентилятор охолодження): $LW_{ТП} \approx 75-80$ дБА на відстані 1 м.

Сумарний рівень шуму після модернізації на відстані 3 м від двигунів (логарифмічне підсумовування):

$$L_{\text{заг}} = 10 \cdot \lg \left(10^{\frac{L_{ДВ}}{10}} + 10^{\frac{L_{\text{редукт}}}{10}} + 10^{\frac{L_{ТП}}{10}} \right). \quad (4.6)$$

Оскільки двигуни ДП 74/34-6 є тихішими за синхронний двигун (нижча потужність і частота обертання) і не мають колектора, реальний рівень шуму після модернізації за аналогічними підйомниками знижується до 72–78 дБА. Розрахункова оцінка:

$$L_{ТПД} \approx L_{МГ} - \Delta L = 90 - 13 = 77 \text{ дБА} \quad (4.7)$$

(на відстані 3 м від двигунів).

Після модернізації рівень шуму знижується з 85–92 дБА до 72–78 дБА. Розрахована оцінка 77 дБА ≤ 80 дБА відповідає нормативній вимозі ДСН 3.3.6.037-99. Застосування ЗІЗ (наушників) є бажаним, але не є обов'язковою постійною вимогою при нетривалому перебуванні в МЗ (до 2 год на зміну). При тривалій роботі в ході технічного обслуговування та налагодження навушники типу ЗМ Peltor Н6А (ослаблення 31 дБА) є обов'язковими.

4.5 Розрахунок вентиляції машинного залу

Система вентиляції машинного залу скіпового підйомника виконує дві функції: підтримання допустимої температури повітря та видалення шкідливих речовин (СО, пил). Проектування вентиляції виконується відповідно до ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування».

Теплове навантаження на вентиляцію. Основне джерело тепла – втрати в двигунах та перетворювачі при номінальному навантаженні системи ТП-Д:

$$Q_{\text{ДВ}} = P_{\text{ДВ}} \cdot (1 - \eta_{\text{ДВ}}) = 520 \cdot (1 - 0,91) = 46,8 \text{ кВт} = 46\,800 \text{ Вт}, \quad (4.8)$$

$$Q_{\text{ТП}} = P_{\text{ТП}_{\text{вх}}} \cdot (1 - \eta_{\text{ТП}}) = 565 \cdot (1 - 0,97) = 16,95 \text{ кВт} \approx 17\,000 \text{ Вт}, \quad (4.9)$$

$$Q_{\text{ТР}} = P_{\text{ТР}_{\text{вх}}} \cdot (1 - \eta_{\text{ТР}}) = 582 \cdot (1 - 0,987) = 7,6 \text{ кВт} = 7\,600 \text{ Вт}, \quad (4.10)$$

$$Q_{\text{заг}} = Q_{\text{ДВ}} + Q_{\text{ТП}} + Q_{\text{ТР}} = 46\,800 + 17\,000 + 7\,600 = 71\,400 \text{ Вт}. \quad (4.11)$$

З урахуванням коефіцієнта завантаження $k_z = 0,70$ та коефіцієнта одночасності $k_o = 0,8$ (не всі теплові втрати одночасно надходять у вигляді тепла до повітря приміщення):

$$Q_{\text{розр}} = Q_{\text{заг}} \cdot k_z \cdot k_o = 71\,400 \cdot 0,70 \cdot 0,80 = 39\,984 \text{ Вт} \approx 40 \text{ кВт}. \quad (4.12)$$

Необхідна витрата повітря для асиміляції теплового навантаження при різниці температур між припливним і витяжним повітрям $\Delta t = 8 \text{ }^\circ\text{C}$ (приплив $20 \text{ }^\circ\text{C}$, витяжка $28 \text{ }^\circ\text{C}$):

$$L_{\text{вент}} = \frac{Q_{\text{розр}}}{(\rho \cdot c \cdot \Delta t)} = \frac{40\,000}{(1,2 \cdot 1000 \cdot 8)} = \frac{40\,000}{9\,600} = 4,17 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} = 15\,000 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}, \quad (4.13)$$

де $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$ – щільність повітря; $c = 1000 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$ – питома теплоємність повітря.

Перевірка за кратністю повітрообміну. Орієнтовний об'єм машинного залу: $V_{\text{МЗ}} = 40 \cdot 15 \cdot 8 = 4800 \text{ м}^3$. Кратність повітрообміну:

$$n_{\text{вент}} = \frac{L_{\text{вент}}}{V_{\text{МЗ}}} = \frac{15\,000}{4\,800} = 3,13 \text{ год}^{-1}. \quad (4.14)$$

Вимога ДБН В.2.5-67 для машинних залів: $n_{\text{вент}} \geq 3 \text{ год}^{-1}$. Розраховане значення $3,13 \text{ год}^{-1}$ перевищує нормативний поріг, і система вентиляції відповідає вимогам. При аварійному режимі (витік СО) аварійна вентиляція забезпечує $n_{\text{аварійн}} \geq 8 \text{ год}^{-1}$, тобто $L_{\text{авар}} = 8 \cdot 4800 = 38\,400 \text{ м}^3/\text{год}$.

Для реалізації системи вентиляції прийнято таке обладнання:

– основна вентиляція – осьові вентилятори ВО 06-300 № 6,3 (продуктивність $10\,000 \text{ м}^3/\text{год}$), 2 шт. у припливі та 2 шт. у витяжці; загальна продуктивність $40\,000 \text{ м}^3/\text{год}$ (з запасом);

– аварійна вентиляція – відцентровий вентилятор ВЦ 4-75 № 8 (продуктивність $50\,000 \text{ м}^3/\text{год}$, час розгону 30 с); вмикається автоматично при спрацюванні датчика СО або пожежної сигналізації.

4.6 Розрахунок виробничого освітлення машинного залу

Правильне освітлення робочих зон є важливою умовою безпечної та продуктивної роботи обслуговуючого персоналу. Розрахунок виконується методом коефіцієнта використання світлового потоку відповідно до ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення».

Вихідні дані для розрахунку: розміри машинного залу (основна робоча зона) $a \times b = 40 \times 15$ м; висота приміщення $H = 8$ м; висота розрахункової площини $h_r = 0,8$ м; висота підвісу світильників $h_p = H - 0,5 = 7,5$ м; розрахункова висота $h = h_p - h_r = 7,5 - 0,8 = 6,7$ м.

Нормована освітленість: $E_n = 200$ лк (розряд зорових робіт IV – груба точність, технічне обслуговування обладнання); для зони огляду приладів та індикаторів: $E_n = 300$ лк (розряд III).

Індекс приміщення:

$$i = a \cdot b / (h \cdot (a + b)) = 40 \cdot 15 / (6,7 \cdot (40 + 15)) = 1,63. (4.15)$$

Коефіцієнти відбиття: $\rho_{ст} = 0,5$ (стеля – залізобетон пофарбований); $\rho_{пол} = 0,3$ (стіни з бетону); $\rho_{підл} = 0,1$ (підлога – сталевий настил темний). За таблицями коефіцієнтів використання для світильників типу ЛПО (прямого випромінювання) при $i = 1,63$:

$$\eta_{св} = 0,55 \text{ (коефіцієнт використання світлового потоку)}. (4.16)$$

Коефіцієнт запасу для приміщень із великим пилоутворенням (чищення світильників 4 рази/рік): $K_з = 1,8$.

Необхідна кількість світильників типу ЛЕД 4×36 Вт зі світловим потоком одного світильника $\Phi_l = 13\,500$ лм:

$$N = \frac{(E_n \cdot S \cdot K_з)}{(\Phi_l \cdot \eta_{св})} = \frac{(200 \cdot 600 \cdot 1,8)}{(13500 \cdot 0,55)} = \frac{216\,000}{7\,425} = 29,1 \approx 30 \text{ шт.} \quad (4.17)$$

де $S = a \cdot b = 40 \cdot 15 = 600$ м² – площа МЗ.

Приймається 30 світильників ЛЕД 4×36 Вт з розміщенням у 3 ряди по 10 шт. Розташування рядів рівномірно по ширині МЗ (крок між рядами 5 м, відступ від стіни 2,5 м). Встановлена потужність освітлення:

$$P_{осв} = 30 \cdot 144 = 4320 \text{ Вт} = 4,3 \text{ кВт.} \quad (4.18)$$

Аварійне освітлення. Відповідно до ДБН В.2.5-28:2018 (п. 7.4.1), в машинних залах підйомних механізмів обов'язкове аварійне освітлення від незалежного джерела живлення. Нормована освітленість аварійного освітлення: $E_a \geq 30$ лк. Приймається 8 акумуляторних аварійних світильників типу ЛАС-02 ($\Phi = 1200$ лм) по ключових зонах: пульт управління, входи/виходи, шафа КТЕ5, місця розміщення вогнегасників. Тривалість роботи від акумулятора – не менше 1 год.

4.7 Оцінка ризиків та заходи щодо безпечної експлуатації

Для систематизованої оцінки ризиків у машинному залі скіпового підйомника ДП-9 застосовано методологію оцінки ризиків відповідно до ДСТУ EN ISO 12100:2016 «Безпечність машин. Загальні принципи конструювання. Оцінювання і зниження ризику». Кожен ризик оцінюється за двома параметрами (табл. 4.2): ймовірність виникнення небезпечної події (P) та тяжкість наслідків (S). Рівень ризику $R = P \cdot S$.

Таблиця 4.2 – Оцінка ризиків при обслуговуванні скіпового підйомника ДП-9 (після модернізації)

Небезпечна ситуація	P (1–5)	S (1–5)	R = P·S	Рівень	Захисний захід
Торкання до частин під напр. DC 700 В при ТО	2	5	10	Середній	УЗО 30мА, блокув., наряд-допуск
Затягування кінцівок у рухомий канат	1	5	5	Низький	Суцільне огороження, блокув. дверей
Падіння персоналу при огляді редуктора	3	3	9	Середній	Поручні, настили, ЗВЗ (каска, пояс)
Отруєння СО при витоці доменного газу	2	4	8	Середній	Датчики СО, авт. вентиляція
Пожежа (загоряння масла ОДА-3)	1	4	4	Низький	Авт. газове пожежогасіння
Шумова травма при тривалій роботі в МЗ	3	2	6	Середній	Навушники ≥ 31 дБА, обмеження часу
Ураження ел. струмом 6 кВ (ТО трансф.)	1	5	5	Низький	Наряд-допуск, ЗВЗ кл.2, заземл. штанга
Помилковий запуск ЕП при ТО механіки	1	5	5	Низький	Ключ-бирка, замки на перетворювачі

P – ймовірність (1 – дуже мала, 5 – дуже висока); S – тяжкість (1 – незначна, 5 – летальна); $R \leq 5$ – низький ризик (прийнятний); $6 \leq R \leq 10$ – середній ризик (потрібні заходи); $R \geq 12$ – високий ризик (неприйнятний, обов'язкові термінові дії).

Аналіз таблиці 4.2 показує: після реалізації описаних захисних заходів жоден ризик не досягає рівня «Високий» ($R \geq 12$). Ризики категорії «Середній» знижуються до «Низького» при дотриманні вимог регламентів технічного обслуговування та застосуванні відповідних ЗІЗ.

4.8 Порівняльна оцінка умов праці «до» та «після» модернізації

Модернізація системи електроприводу суттєво впливає не лише на технічні та економічні показники, але й на умови праці персоналу машинного залу. Порівняльну оцінку за основними санітарно-гігієнічними показниками наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Порівняльна оцінка умов праці в машинному залі скіпового підйомника ДП-9

Показник	До модернізації (М-Г)	Після модернізації (ТП-Д)	Зміна
Рівень шуму, дБА (на відст. 3 м)	85–92	72–78	-10–14 дБА
Рівень вібрації (загальн.), дБ	106–110	92–96	-14 дБ
Температура повітря в МЗ	До 35 °С (перегрів)	До 28 °С (норма)	-7 °С
Витрати на ТО (обслуговування)	171 тис. грн/рік	35 тис. грн/рік	-79 %
Частота аварійних зупинок	2–4 рази/рік	< 1 рази/рік	-75–80 %
Клас умов праці за шумом	3.2 (шкідливий)	2 (допустимий)	Покращення
Клас умов праці за вібрацією	3.1 (шкідливий)	2 (допустимий)	Покращення
Необхідність навушників	Постійно (обов'яз.)	Лише при ТО > 2 год	Полегшення

4.9 Висновки до розділу 4

Аналіз умов праці, виконаний у цьому розділі, охоплює всі регламентовані напрями – від електробезпеки і виробничого шуму до освітлення й оцінки ризиків.

У машинному залі ідентифіковано десять небезпечних і шкідливих виробничих факторів (НШВФ), наведених у таблиці 4.1 разом із нормативними граничними значеннями і призначеними захисними заходами. Розрахунок захисного заземлення підтвердив відповідність вимогам: встановлено вісім вертикальних заземлювачів (стержні $\varnothing 16$ мм, $l = 2,5$ м) з'єднаних горизонтальною смугою; опір заземлюючого пристрою $R_z = 0,5$ Ом при нормі ≤ 4 Ом – восьмикратний запас. Розрахунок петлі «фаза–нуль»: струм $K3 I_{kz} = 2\ 209$ А при струмі спрацювання автомата 160 А – кратність $k_{kz} = 13,8$, що підтверджує впевнене і швидке спрацювання захисту в аварійних ситуаціях. Пристрій захисного відключення $I_{\Delta n} = 30$ мА забезпечує час відключення $t_{відкл} \leq 0,04$ с.

Найвагомішим наслідком модернізації для умов праці є ліквідація основного джерела промислового шуму – мотор-генераторного агрегату, що постійно обертася навіть у режимі очікування. Розраховано, що рівень шуму від двигунів і редуктора після модернізації складе 77 дБА, тобто не перевищить санітарну норму 80 дБА (ДСН 3.3.6.037-99) – клас умов праці за шумом переходить з шкідливого 3.2 до допустимого 2, і регулярне носіння навушників стає необов'язковим, залишаючись рекомендованим лише при тривалому (понад 2 год) перебуванні в залі. Для відведення теплових виділень двигунів загальною потужністю 520 кВт і підтримки температури повітря в нормі $\leq 28^{\circ}\text{C}$ необхідна механічна вентиляція продуктивністю $L = 15\ 000\ \text{м}^3/\text{год}$ (кратність 3,13 год⁻¹ при нормі 3 год⁻¹). Аварійна вентиляція при спрацюванні датчика монооксиду вуглецю CO: $L = 38\ 400\ \text{м}^3/\text{год}$ (кратність 8 год⁻¹). Нормоване освітлення машинного залу (600 м², розряд IV – груба точність) забезпечується 30 світильниками ЛЕД 4×36 Вт при коефіцієнті запасу $K_z = 1,8$ і коефіцієнті використання $\eta_{\text{св}} = 0,55$; розрахована освітленість $E_{\text{розр}} \geq 200$ лк. Аварійне освітлення передбачено у складі 8 акумуляторних світильників із забезпеченням $E_a \geq 30$ лк і автономним живленням тривалістю ≥ 1 год.

Оцінка ризиків за матрицею ймовірність–тяжкість (ДСТУ EN ISO 12100:2016) охопила вісім ідентифікованих небезпечних ситуацій. Після реалізації передбачених захисних заходів жоден ризик не досягає категорії «Високий» ($R \geq 12$): чотири ризики належать до категорії «Середній» ($6 \leq R \leq 10$) і контролюються виконанням регламентів ТО, застосуванням ЗІЗ та процедурою наряду-допуску. Порівняльна таблиця 4.3 ілюструє комплексне поліпшення умов праці після модернізації: шум – мінус 10–14 дБА; вібрація – мінус 14 дБ; температура повітря – мінус 7°C; витрати на ТО – мінус 79 %; частота аварійних зупинок – мінус 75–80 %.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено комплексне науково-практичне завдання – розроблено та досліджено автоматизовану систему управління модернізованого електроприводу скіпового підйомника ДП-9 ПрАТ «Камет-Сталь». На підставі виконаних розрахунків, аналізу та моделювання зроблено такі висновки.

Скіповий підйомник із лебідкою С1-22,5-210 ($G = 22,5$ т, $V_{\max} = 2,8$ м/с) не має паралельного резерву в системі завантаження ДП-9: щойно він зупиняється, переривається подача шихти й порушується хід плавки. Тахограма підйому розкладається на шість фаз загальним часом 33 с; швидкість дотягування $V_1 = 0,5$ м/с $\approx V_{\max}/5$ – не довільне число, а умова безпечного проходження розвантажувальних кривих. На цій основі сформульовано десять технічних вимог із кількісними нормами. Недоліки старої системи М-Г вдалося звести до п'яти вимірюваних показників: ккд 0,767 (перевитрата 605 МВт·год/рік), вичерпаний у 2,5 рази ресурс, шум 85–92 дБА (клас умов праці 3.2), витрати на ТО 171 тис. грн/рік і статична похибка $\delta\omega = 5$ –8 %. Разом вони й становлять виробничу причину модернізації.

Порівняльний аналіз чотирьох систем живлення двигунів підтвердив оптимальність системи ТП-Д із перетворювачем КТЕ5-АС-1к/600 для умов ДП-9. Перевірочний розрахунок підтвердив придатність двигунів ДП 74/34-6 для подальшої роботи: $P_{\text{екв}} = 387$ кВт $< P_{\text{н}} = 520$ кВт (тепловий запас 34 %), $\lambda_{\text{тах}} = 1,37 < 2,5$. Збереження наявних двигунів дешевше за перехід на асинхронний привод у 3–4 рази. Вибір перетворювача КТЕ5-АС-1к/600 (700 В / 1 000 А) обґрунтовано розрахунком: $I_{\text{тах}} = 1\ 143$ А $< I_{\text{корт}} = 1\ 500$ А. Трансформатор ТМПШ-1000/6 вибрано за розрахунковою потужністю 848 кВА; окремих реактор не потрібний ($L_{\text{ЯЦ}} = 0,86$ мГн $>> L_{\text{др_необх}} = 0,061$ мГн).

Техніко-економічний розрахунок визначив такі показники ефективності: річний грошовий потік $CF = 2\ 434$ тис. грн (у тому числі 2 298 тис. грн – економія на електроенергії і 136 тис. грн – зниження витрат на ТО); початкові капіталовкладення $K_0 = 3\ 471$ тис. грн; $NPV = +6\ 733$ тис. грн за 10 років ($r = 20$ %), що у 1,94 рази перевищує суму інвестицій; $IRR = 69,2$ % – у 3,5 рази вище за прийнятний поріг $r = 20$ %; термін окупності $PP = 1,43$ року, дисконтований $DPP = 1,85$ року. Індекс прибутковості $PI = 2,94$ свідчить, що приведені грошові надходження майже втричі перевищують вкладені кошти. Аналіз чутливості засвідчив стійкість проекту до несприятливих відхилень вихідних умов: навіть за одночасного зниження тарифу на електроенергію на 20 %, зростання капіталовкладень на 30 % та підвищення ставки дисконтування до 30 % чиста приведена вартість залишається додатною (+1 592 тис. грн), що пояснюється значним запасом за внутрішньою нормою прибутковості.

Розроблена автоматизована система управління базується на трирівневій архітектурі і двоконтурному підпорядкованому регулюванні з

розрахунковим зворотним зв'язком по ЕРС. Схема силового кола: мережа 6 кВ → Q1 → ТМПШ-1000/6 → КТЕ5-АС-1к/600 → ЛДР → ДС → послідовні якорі М1+М2 (2 × 330 В = 660 В). Параметри якірного кола: $R_{яц} = 0,060$ Ом, $L_{яц} = 0,0026$ Гн, $T_{яц} = 0,043$ с, $c_e = c_m = 11,94$ В·с/рад. Синтез регуляторів виконано методом модульного оптимуму у відносних одиницях з урахуванням коефіцієнта передачі об'єкта контуру струму $k_{об_т} = U_{max} \cdot k_{тп} \cdot K_{н_I} / R_{яц} = 5,43$, що забезпечило коректне налаштування контурів. Регулятор струму: $k_{рт} = 2,33$; $T_{рт} = 0,043$ с (компенсує електромагнітну сталу часу якірного кола); $f_t = 42,3$ Гц. Регулятор ЕРС: $k_{рс} = 5,0$; $T_{рс} = 0,030$ с; $f_c = 2,2$ Гц – налаштований на плавний аперіодичний відгук без коливань. Перевірка підтвердила виконання всіх восьми технологічних вимог, у ряді пунктів – із суттєвим запасом.

Математичну модель ($J_e = 465$ кг·м², $M_c = 10\ 604$ Н·м, 14 рівнянь) реалізовано та досліджено в середовищі MATLAB/Simulink R2015b з методом числового інтегрування ode4 (фіксований крок 0,0002 с). Імітація підтвердила коректність розробленої системи. Перехідні процеси мають плавний аперіодичний характер: час розгону ~7,4 с при $\alpha = 0,35$ м/с²; пусковий струм плавно зростає до ~1 481 А (1,72· I_n), не сягаючи межі обмеження 2,5· I_n ; перерегулювання швидкості не перевищує 1,3 %, а статична похибка завдяки інтегральній складовій регулятора практично відсутня ($\delta\omega < 0,1$ % при вимозі 2 %). Електромеханічна характеристика замкненої системи практично горизонтальна, що підтверджує жорстке підтримання швидкості незалежно від навантаження. Можливість рекуперації енергії, що реалізується реверсивним перетворювачем у режимі спуску порожнього скіпа, додає $\approx 21\ 900$ кВт·год/рік потенційних заощаджень. Порівняльний аналіз підтвердив поліпшення динамічних показників у 2,5–20 разів проти системи М-Г.

Усі розрахункові показники безпечної експлуатації знаходяться в межах норми: $R_3 = 0,5$ Ом (норма ≤ 4 Ом); ПЗВ 30 мА – твідкл $\leq 0,04$ с; рівень шуму після модернізації 72–78 дБА (норма ≤ 80 дБА) – клас умов праці з шкідливого 3.2 переходить до допустимого 2; вентиляція $L = 15\ 000$ м³/год (кратність 3,13 > 3); освітлення 30 × ЛЕД 4×36 Вт – $E_{розр} \geq 200$ лк. Оцінка восьми ризиків показала: жоден не досягає категорії «Високий» ($R \geq 12$) після реалізації захисних заходів.

Практична значущість кваліфікаційної роботи визначається прямим зв'язком з реальним виробничим проектом ПрАТ «Камет-Сталь». Розраховані та перевірені імітаційним моделюванням параметри регуляторів, структура системи управління і схема силового кола є технічно завершеними і можуть бути використані безпосередньо при налаштуванні перетворювача КТЕ5-АС-1к/600 у ході пуско-налагоджувальних робіт на ДП-9. Зокрема, синтезовані у відносних одиницях коефіцієнти регуляторів струму та ЕРС придатні для прямого перенесення в систему керування промислового перетворювача.

Таким чином, поставлену мету кваліфікаційної роботи досягнуто, а всі сформульовані задачі виконано в повному обсязі. Заміна системи генератор-двигун на систему «тиристорний перетворювач – двигун» зі збереженням наявних двигунів забезпечує плавне й точне керування електроприводом скіпового підйомника ДП-9 за умови повної економічної доцільності та дотримання норм безпечної експлуатації.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Видмиш А. А., Ярошенко Л. В. Основи електропривода. Теорія та практика. Ч. 1. Вінниця: ВНАУ, 2020. 387 с.
2. Куцін В. С., Лукашенко Л. М. Доменне виробництво: підручник. Дніпро: НМетАУ, 2018. 312 с.
3. Жигулін О. А., Махмудов І. І., Жигуліна Н. О. Підйомно-транспортні машини: Навчальний посібник. Ніжин, 2020. 150 с.
4. ПрАТ «Камет-Сталь». Схема електрична принципова системи управління скіпового підйомника ДП-9: 02081-ЕМ1.2.1. Кам'янське, 2005. 9 арк.
5. ДСТУ EN 12385-4:2018. Канати сталеві. Безпека. Ч. 4: Канати спіральні для загального призначення. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 54 с.
6. ПрАТ «Камет-Сталь». Путьова діаграма вимикачів скіпового підйомника ДП-9. Кам'янське, 2005.
7. Колб А. Теорія електроприводу: навчальний посібник, 2-е вид. перероб. і доп. Д.: Національний гірничий університет, 2011. 540 с.
8. Бушер В. В., Мороз В. І. Автоматизований електропривод. Навчальний посібник. Одеса: ОНПУ, 2017.
9. Гаркушин О. В. Листи-відповіді ПрАТ «Камет-Сталь» щодо параметрів електрообладнання скіпового підйомника ДП-9. Кам'янське, 2026.
10. Карташов Б. А. Регульований електропривод. Харків: ФОП Стецюк, 2019. 286 с.
11. Хілов В. С. Системи управління електроприводами металургійного обладнання: навч. пос. Запоріжжя: Метінвест Політехніка, 2021. 198 с.
12. Шрамко Ю. Ю. Електроприводи підйомно-транспортних механізмів: метод. вказівки. Запоріжжя: Метінвест Політехніка, 2022. 64 с.
13. КТЕ5-АС. Технічний паспорт тиристорного реверсивного перетворювача серії КТЕ5. Запоріжжя: ВАТ «Перетворювач», 2020. 48 с.
14. ДСТУ EN 60529:2016. Ступені захисту, що забезпечуються оболонками (код IP). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. 41 с.
15. Башарин А. В., Новиков В. А., Соколовський Г. Г. Управління електроприводами. Л.: Енерговидав, 1982. 392 с.
16. Тема 4. Стаціонарний та перехідний режим роботи електроприводів: лекційні матеріали. Запоріжжя: Метінвест Політехніка, 2024. 48 с.
17. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування: Підручник. 2-ге вид., перероб. і дог. К.: Либідь, 2007. 656 с.
18. Данилов О. В. MATLAB/Simulink для моделювання систем електроприводу: навч. пос. Київ: НТУ «КПІ», 2018. 164 с.
19. НПАОП 27.1-1.06-12. Правила безпеки в металургійній промисловості. Київ: Держгірпромнагляд, 2012. 180 с.

20. НПАОП 40.1-1.01-97. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Київ: Держнаглядохоронпраці, 1997. 376 с.
21. НПАОП 0.00-1.01-07. Правила будови і безпечної експлуатації вантажопідіймальних кранів. Київ: Держгірпромнагляд, 2007. 200 с.
22. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. Київ: Мінрегіонбуд, 2018. 136 с.

ДОДОТОК А ПУБЛІКАЦІЇ ЗДОБУВАЧА

1. Пристрій плавного регулювання індуктивності: пат. на корисну модель 158455 Україна: МПК G05F 1/20. № и 202401379; заявл. 15.03.2024; опубл. 12.02.2025, Бюл. №7. 4 с <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1841684/>

2. Сніговий Д.В., Накемпій О.К. Аналіз екологічного впливу металургійної галузі на якість повітря та можливості зменшення викидів . *Проблеми охорони праці, промислової та цивільної безпеки: Збірник матеріалів Тридцятої Всеукраїнської науково-методичної конференції (з участю студентів), м. Київ, 15 травня 2024 р. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. С.116-118.*

3. Сніговий Д.В. Вітроенергетика в Україні: переваги та перспективи розвитку. *Проблеми цивільного захисту населення та безпеки життєдіяльності: сучасні реалії України: Матеріали X Всеукраїнської заочної науково - практичної конференції. Київ: УДУ імені Михайла Драгоманова, 2024. С. 120-121.*

4. Сніговий Д.В. Аналіз впливу об'єктів теплової енергетики на довкілля. *Proceedings of VI International Scientific and Practical Conference «SCIENTIFIC ACHIEVEMENTS OF CONTEMPORARY SOCIETY», London, United Kingdom, 10-12 January 2025. P. 274-280. <https://surl.li/xngaoe>*

5. Сніговий Д.В., Рухлова Н.Ю. Зарядні станції для електромобілів: інфраструктура, технології, перспективи. *International scientific conference «MININGMETALTECH 2024 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education» : conference proceedings (November 28-29, 2024. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2024. Vol. 1. С. 31-32.*

6. Сніговий Д.В., Манахова Г.О., Накемпій О.К. Забруднення ґрунтів України радіоактивними елементами: причина та наслідки. *Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні проблеми землеробської галузі та шляхи їх вирішення» 5-6 грудня 2024 року. Миколаїв, 2024. С.134-137.*

7. Сніговий Д. В. Теплова енергетика України: екологічні ризики та шляхи змін. *Проблеми цивільного захисту населення та безпеки життєдіяльності: сучасні реалії України : матеріали XI Всеукраїнської заочної науково - практичної конференції (м.Київ, 25 квітня 2025 р). Київ, 2025. С. 171-172. URI: <https://dspace.mipolytech.education/handle/mip/2857>*

8. Накемпій О. К., Сніговий Д. В. Засоби індивідуального захисту від ураження електричним струмом на виробництві. *Проблеми охорони праці, промислової та цивільної безпеки : матеріали XXXII Всеукраїнської науково-методичної конференції (з участю студентів), м. Київ, 14 травня 2025 р. Київ, 2025. С. 79-83. URI: <https://dspace.mipolytech.education/handle/mip/2858>*

9. Косенко Р. Г., Сніговий Д. В., Хілов В. С. Покращення динаміки тиристорного приводу постійного струму шлаковозу конверторного цеху ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛІ» Start in Science: студентська науково-технічна конференція : збірник тез і анотацій наукових доповідей. Одеса : Олді+, 2025. С.160-163.

ДОДАТОК Б

Розкриття факту делегування завдань генеративному ШІ.

Автор заявляє про використання генеративного ШІ у процесі дослідження та підготовки рукопису. Відповідно до таксономії GAIDeT (2025), наведені нижче завдання були делеговані інструментам генеративного ШІ за повного людського нагляду:

- *Генерування схематичних зображень*
- *Систематизація літератури*
- *Реформатування*

Використаний інструмент генеративного ШІ: Gemini.

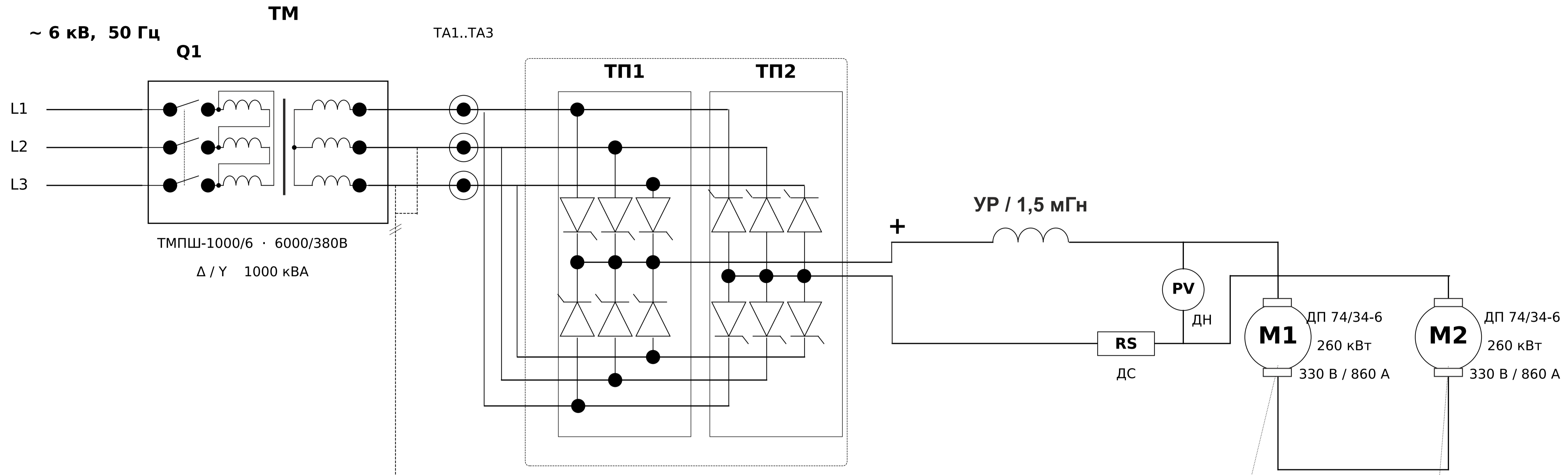
Повну відповідальність за фінальний рукопис несуть автори.

Інструменти генеративного ШІ не зазначаються як автори та не несуть відповідальності за кінцеві результати.

Декларацію подала: Сніговий Дмитро

Додаткова примітка: Я використав Gemini для допомоги у синтезі літератури, генеруванні зображень та реформатуванні тексту.

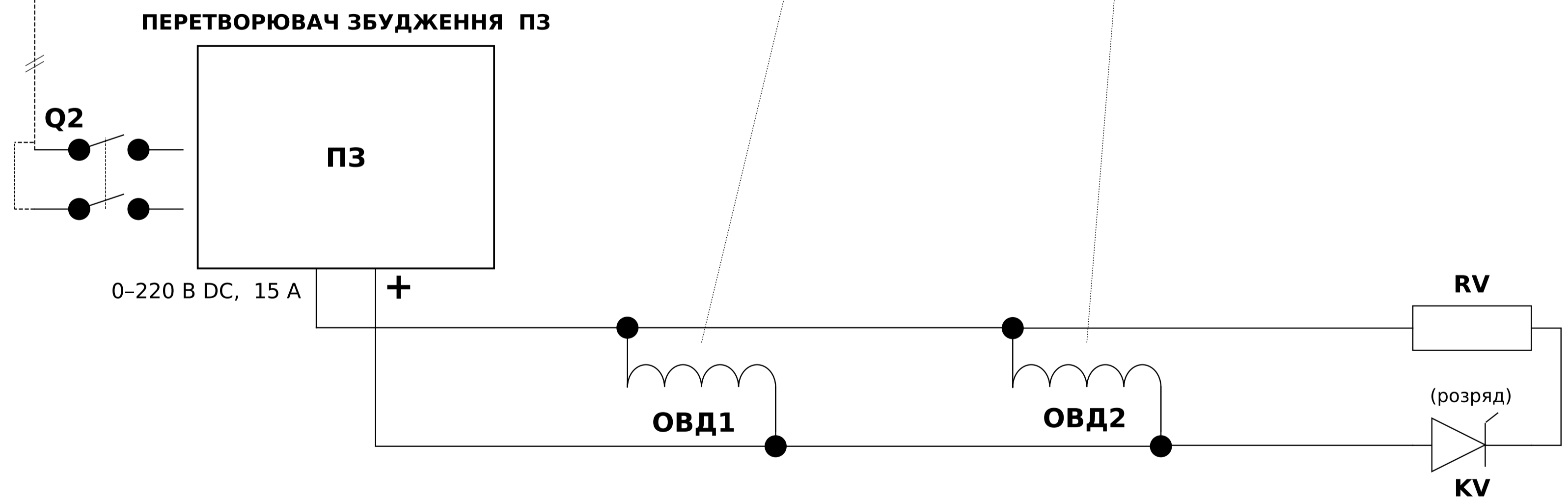
КТЕ5-АС-1к/600
700 В / 1000 А



ПЕРЕЛІК ЕЛЕМЕНТІВ

Символ	Назва	Кількість
Q1	Авт. вимикач 3-полюс.	3 шт.
TM	Трансф. ТМПШ-1000/6	1
TA1..3	Трансф. струму	3
ТП1	Тирист. група «Вперед»	6 тир.
ТП2	Тирист. група «Назад»	6 тир.
УР	Реактор згладж. 1,5 мГн	1
RS	Шунт ДС, кдт=0,01163 В/А	1
PV	Вольтметр ДН	1
M1, M2	Двиг. ДП 74/34-6, 260 кВт	2
ОВД1,2	Обм. збудж. двиг.	2
ПЗ	Перетв. збудж. 220 В/15 А	1
Q2	Авт. вимик. збудж.	1
RV/KV	Розрядне коло ОВД	2

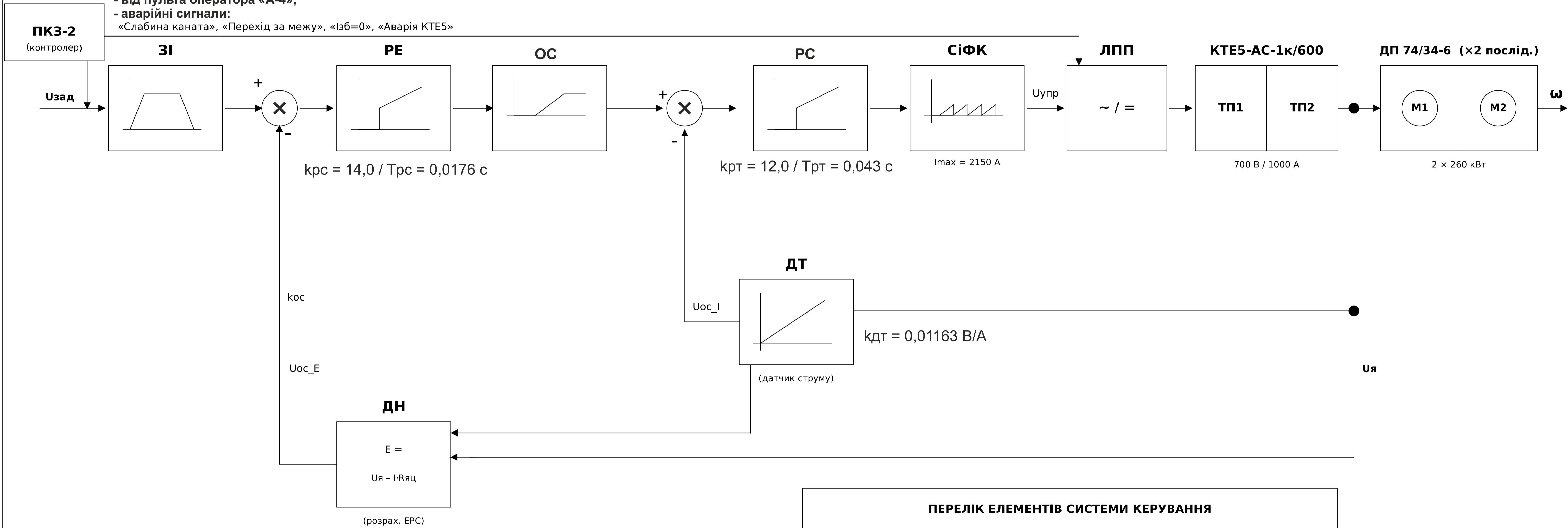
~220 В (від ТМ)



АВЕРС. КРБ12427822.ЕТР-РР						
Модернізація електроприводу скіпового підйомника ДП-9 ПрАТ «Камет-Сталь»						
Зм.	Кіл.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата	
Розробив	Сніговий Д.В.					
Перевірив	Хілов В.С.					
Т. контур						
Н. контр						
Затвердив						
Електрична принципова схема силового кола системи ТП-Д скіпового підйомника ДП-9				Старш	Аркуш	Аркуші
				Н	1	4
Електрична принципова схема				ТОВ "ТУ "МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА" ФАВТ, АВЕРС ЕІ-21-1, 2026		

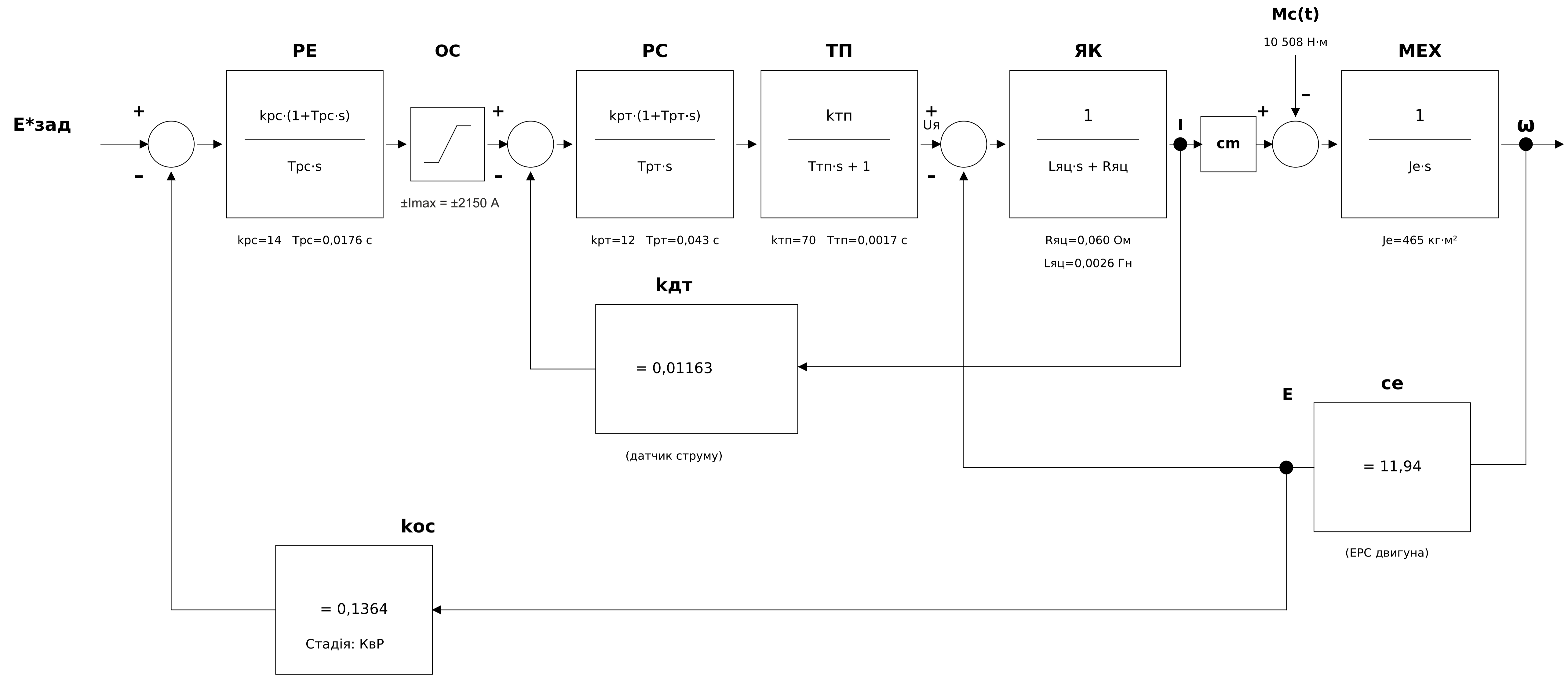
Входи в ПКЗ-2:

- від шляхових вимикачів ВП1..ВП6 (сигнали положення);
- від пульта оператора «А-4»;
- аварійні сигнали:
«Слабина каната», «Перехід за межу», «Ізб=0», «Аварія КТЕ5»



ПЕРЕЛІК ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	
ЗІ	Задавач інтенсивності (Rate Limiter)
РЕ	ПІ-регулятор ЕРС: kpc=14, Trc=0,0176 с
РС	ПІ-регулятор струму: kpt=12, Trt=0,043 с
СіФК	Система імпульсно-фазового керування
ЛПП	Логіка пуску, перемикання і протекцій
ДТ	Датчик струму: kdt = 0,01163 В/А
ДН	Розрахунковий блок ЕРС: E = Uя - I·Rяц
ПКЗ-2	Контролер шляхового керування

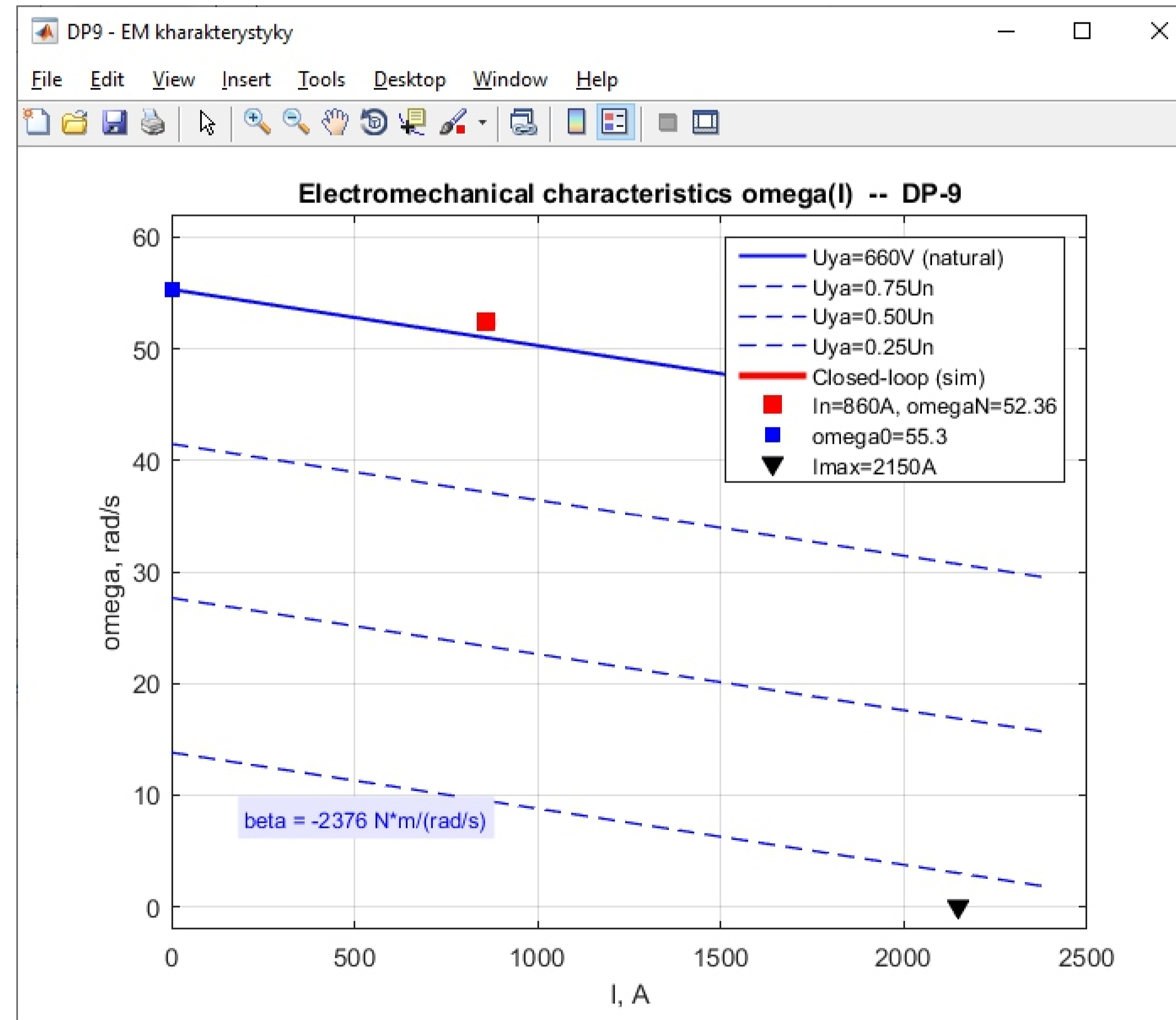
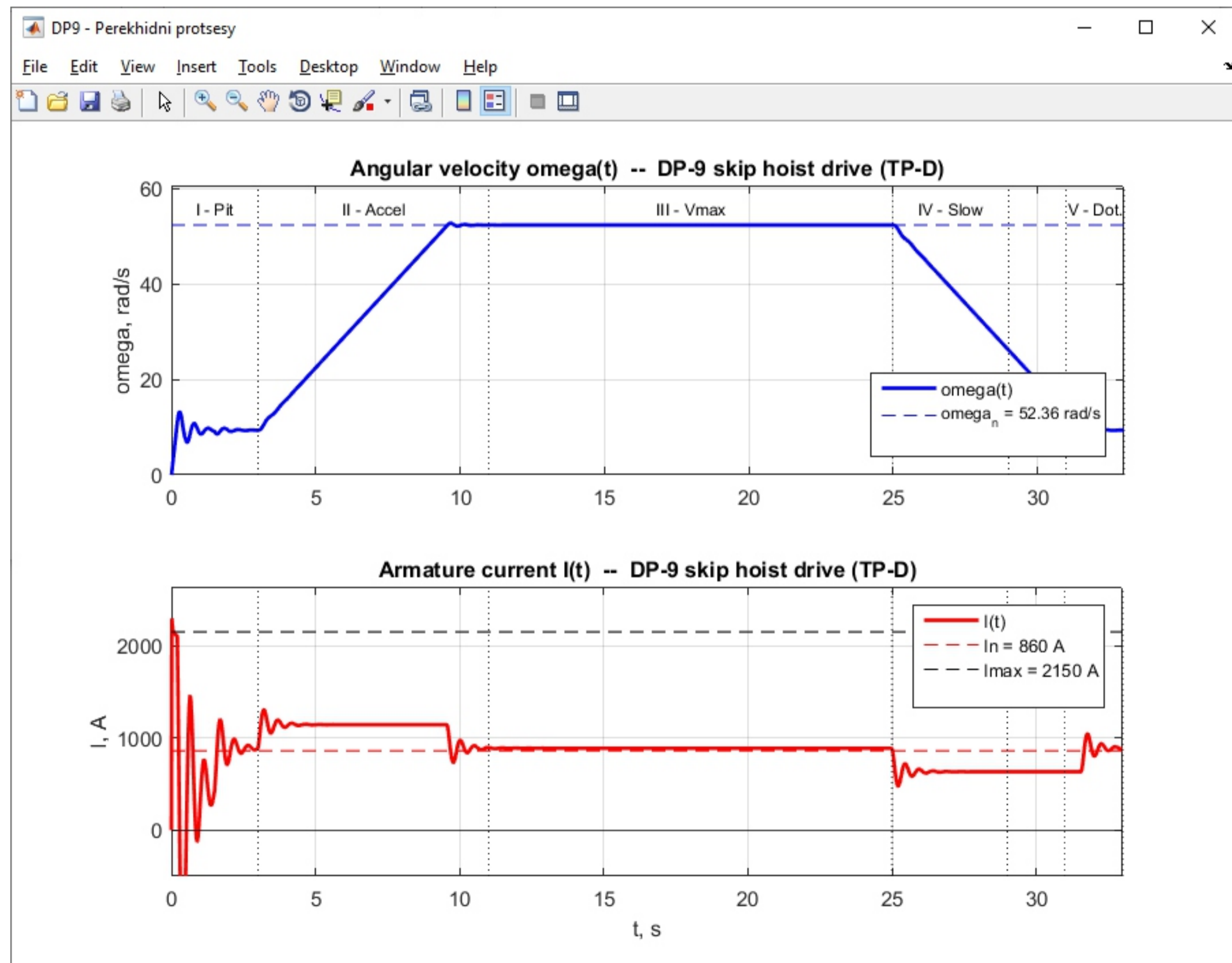
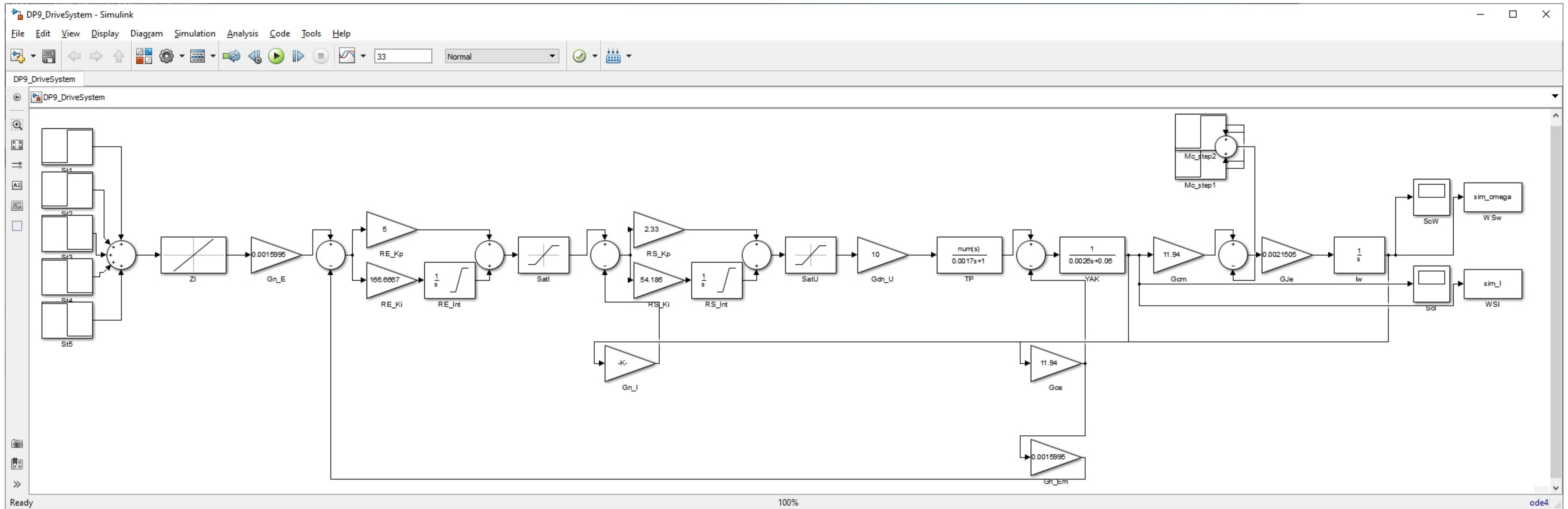
						АВЕРС.КРБ12427822.ЕТР-РР		
						Модернізація електроприводу скіпового підйомника ДП-9 ПрАТ «Камет-Сталь»		
Зм.	Кіл.	Арк.	Фол.	Підп.	Дата	Функціональна схема системи управління електроприводом скіпового підйомника ДП-9		
Розробив	Сніговий Д.В.					Стадія	Аркуш	Аркуше
Перевіряв	Хімов В.С.					Н	2	4
Т.контур								
Н.контр						ТОВ "ТУ "МЕТІВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА"		
Затвердив						ФАВІТ, АВЕРС ЕІ-21-1, 2026		



ПЕРЕЛІК ЕЛЕМЕНТІВ	
Σ _{1..Σ4}	Суматори похибок
PE	ПІ-регулятор ЕРС
PC	ПІ-регулятор струму
OC	Обмежувач струму
ТП	Тиристорний перетворювач
ЯК	Якірне коло (2 двиг. посл.)
МЕХ	Механічна частина (Je)
се, см	Конструкт. сталі
кос	Коеф. ЗЗ по ЕРС
кдт	Коеф. ЗЗ по струму

ДИНАМІЧНІ ПОКАЗНИКИ СИСТЕМИ			
Контур І	f _т = 36,2 Гц	σ _т = 4,3 %	t _{пн} = 0,021 c
Контур Е	f _с = 9,0 Гц	δω ≤ 2 %	t _{пн} ≈ 0,09 c
f_т / f_с = 36,2 / 9,0 = 4,0 → принцип підпорядкованого регулювання виконаний			

АВЕРС.КРБ12427822.ЕТР-РР					
Модернізація електроприводу скіпового підйомника ДП-9 ПрАТ «Камет-Сталь»					
Зм.	Кіл.	Арк.	док.	Підп.	Дата
Розробив	Сніговий Д.В.				
Перевірив	Хімов В.С.				
Т. контур					
Н. контр					
Затвердив					
Структурна схема					ТОВ "ТУ "МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА" ФАВІТ, АВЕРС ЕІ-21-1, 2026
Структурна схема лінеаризованої двоконтурної САР електроприводу скіпового підйомника ДП-9			Стадія	Аркуш	Аркуші
			Н	3	4



АВЕРС.КРБ12427822.ЕТР-РР					
Модернізація електроприводу скіпового підприємця ДП-9 ПрАТ «Камет-Сталь»					
Зм.	Кіл.	Арк.	Фол.	Підп.	Дата
Розробив	Сніговий Д.В.				
Перевірив	Хілев В.С.				
Т. контур					
Н. контр					
Затвердив					
Структурна схема				Н	4
Структурна схема				ТОВ "У" МЕТНІВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА" ФАВІТ, АВЕРС ЕІ-21-1, 2026	