

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

Інститут Електроенергетики
(інститут)

Електротехнічний факультет
(факультет)

Кафедра електропривода
(повна назва)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
кваліфікаційної роботи ступеню магістра
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

студента Лукініва Ярослава
(ПІБ)

академічної групи 141М-17-4
(шифр)

спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва спеціальності)

спеціалізації

за освітньо-професійною програмою Електромеханічні системи автоматизації та електропривод
(офіційна назва)

на тему Дослідження впливу параметрів системи автоматичного керування координатами електромеханічної системи з урахуванням зміни параметрів об'єкту керування
(назва за наказом ректора)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
Кваліфікаційної роботи	Азюковський О.О.			
розділів:				
Завдання на розробку	Азюковський О.О.			
Розрахункова частина	Азюковський О.О.			
Проведення досліджень	Азюковський О.О.			
Техніко-економічне обґрунтування	Тимошенко Л.В.			
Рецензент				
Нормоконтролер	Казачковський М.М.			

Дніпро
2018

ЗАТВЕРДЖЕНО:
завідувач кафедри
електропривода
(повна назва)

_____ Казачковський М.М.
(підпис) (прізвище, ініціали)

« _____ » _____ 20__ року

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу
ступеня магістра
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

студенту Лукінів Я.О. академічної групи 141М-17-4
(прізвище та ініціали) (шифр)

спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

спеціалізації¹ _____

за освітньо-професійною програмою Електромеханічні системи автоматизації та електропривод
(офіційна назва)

на тему Дослідження впливу параметрів системи автоматичного керування координатами електромеханічної системи з урахуванням зміни параметрів об'єкту керування

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від _____ № _____

Розділ	Зміст	Термін виконання
Завдання на розробку	Визначення напрямків досліджень	01.10.2018- 05.10.2018
Характеристики електромеханічної системи	Характеристика електромеханічної системи, критерії якості, розрахунок векторної системи керування	06.10.2018- 01.11.2018
Дослідження впливу зміни параметрів на електромеханічну систему	Дослідження впливу зміни параметрів електромеханічної системи на якість регулювання координат.	02.11.2018- 01.12.2018
Техніко-економічне обґрунтування	Визначення капітальних та експлуатаційних витрат при впровадженні електроприводу з векторним керуванням.	02.12.2018- 15.12.2018

Завдання видано _____
(підпис керівника)

Азюковський О.О.
(прізвище, ініціали)

Дата видачі 1 жовтня 2018

Дата подання до екзаменаційної комісії _____

Прийнято до виконання _____
(підпис студента)

Лукінів Я.О.
(прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 51 стор., 8 таблиць, 16 рисунків, 12 джерел.

Мета проекту: дослідження впливу зміни параметрів електромеханічної системи на якість її роботи.

В першій частині проекту наведено характеристики електромеханічної системи, описані критерії якості.

В розділі 2 “Автоматизований електропривод” виконано розрахунок системи векторного керування, синтезовані регулятори. Також визначені межі зміни таких параметрів як активні опори статора та ротора, зведеного моменту інерції.

В розділі 3 методом математичного моделювання досліджено вплив зміни параметрів електромеханічної системи на якість регулювання координат електропривода.

В розділі “Техніко-економічне обґрунтування ”розраховані капітальні та експлуатаційні витрати на впровадження запропонованої системи електропривода.

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА, ЗМІНА ПАРАМЕТРІВ, ЯКІСТЬ
РЕГУЛЮВАННЯ, ЕЛЕКТРОПРИВОД ЗМІННОГО СТРУМУ, ВЕКТОРНЕ
КЕРУВАННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ.

ABSTRACT

Explanation message: 51 pages, 8 tables, 16 pictures, 12 sources.

The purpose of the project: to study the effect of changes in the parameters of the electromechanical system on the quality of its work.

The first part of the project presents the characteristics of the electromechanical system, describes the quality criteria.

In section 2 “Automated electric drive” the vector control system is calculated, regulators are synthesized. Also determined the boundaries of changes in parameters, such as the active resistance of the stator and rotor, the reduced moment of inertia.

In Section 3, the effect of a change in the parameters of an electromechanical system on the quality of control of the coordinates of an electric drive is investigated by the method of mathematical modeling.

In last section, the capital and operating costs for the implementation of the proposed electric drive system are calculated.

**ELECTROMECHANICAL SYSTEM, PARAMETER CHANGE,
REGULATION QUALITY, AC ELECTRIC DRIVE, VECTOR REGULATION,
MODELING**

ЗМІСТ

Вступ.....	6
1 ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА. СТРУКТУРА, СКЛАД, ПАРАМЕТРИ.....	7
1.1 Загальна характеристика електромеханічної системи. Критерії якості регулювання.	7
1.2 Вибір електромеханічного перетворювача для досліджень.....	11
1.3 Аналіз факторів, що впливають на зміну параметрів електроприводів.....	12
1.4 Об'єкт та задачі досліджень.....	16
2 АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД.....	17
2.1 Розрахунок параметрів двигуна.....	17
2.2 Модель асинхронного короткозамкненого двигуна в системі координат, орієнтованій за вектором потокозчеплення ротора.....	21
2.3 Синтез системи регулювання швидкості асинхронного двигуна.....	24
2.3.1 Синтез регулятора струму.....	28
2.3.2 Синтез регулятора потокозчеплення ротора.....	29
2.3.3. Синтез регулятора швидкості.....	31
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ПРИ ЗМІНІ ПАРАМЕТРІВ.....	33
3.1 Дослідження впливу зміни опорів статора та ротора.....	33
3.2 Дослідження впливу зміни зведеного моменту інерції.....	40
4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ.....	42
4.1 Розрахунок капітальних витрат.....	42
4.2 Розрахунок експлуатаційних витрат.....	44
4.2.1 Розрахунок амортизаційних відрахувань.....	45
4.2.2 Розрахунок вартості спожитої електроенергії.....	45
4.2.3 Витрати на технічне обслуговування и поточний ремонт.....	47
4.3 Оцінка економічної ефективності проекту.....	48
ВИСНОВКИ.....	50
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	51

ВСТУП

Електропривод являє собою електромеханічну систему, яка перетворює електричну енергію в механічну і навпаки. Основним елементом електромеханічної системи, який здійснює саме функцію перетворення, є електричний двигун. Він може бути як постійного, так і змінного струму. Останнім часом все більше застосовуються електричні двигуни змінного струму, особливо асинхронні. Це обумовлено простотою їх конструкції, і як наслідок, високою надійністю та достатньо високим коефіцієнтом корисної дії (ККД) при перетворенні енергії.

В загалі то, сам електропривод є проміжною ланкою при регулюванні режимів роботи технологічних машин та технологічних процесів. Сучасні технологічні процеси та машини доволі гнучкі і складні і в переважній своїй більшості потребують регулювання режимів роботи. Саме ця задача і покладається на електромеханічну систему – за рахунок регулювання свого режиму роботи регулювати режим роботи технологічної машини або процесу.

Регулювання режимів роботи здійснює система автоматичного керування, яка є складовою частиною сучасної електромеханічної системи. Якість регулювання залежить від того, наскільки налаштування системи автоматичного керування відповідають параметрам електричного двигуна або іншого електромеханічного перетворювача, як об'єкта керування. При повній відповідності налаштувань та параметрів отримаємо якісне регулювання, яке відповідає заданим критеріям. Але в реальних умовах роботи параметри електромеханічних перетворювачів з різних причин можуть змінюватись в часі. При цьому виникає невідповідність налаштувань реальним параметрам і якість керування погіршується. Тому знання про те, як поводитиме себе автоматизована електромеханічна система при зміні параметрів об'єкта керування і що з цим робити є важливим в сучасних умовах. І саме дослідження впливу зміни параметрів об'єкта керування на якість регулювання буде розглянуто в цій роботі.

1 ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА СТРУКТУРА, СКЛАД, ПАРАМЕТРИ.

1.1 Загальна характеристика електромеханічної системи. Критерії якості регулювання.

Типова електромеханічна система представлена на рис. 1. Вона складається з електричного двигуна *ЕД*, який безпосередньо або через механічну передачу з передатним числом i , під'єднується до технологічної машини *ТМ*. В електромеханічних системах, де здійснюється регулювання режимів роботи електродвигунів використовується керований перетворювач параметрів електричної енергії (рівня напруги, струму, частоти) *П*, який живиться від джерела енергії *ДЕ* з необхідним параметрами. Керування перетворювачем енергії здійснюється керуючим органом, що має назву регулятор. Регулятор формує керуючий вплив на перетворювач енергії, щоби той змінив параметри електричної енергії, що підводиться до двигуна, і тим самим змінився режим роботи двигуна.

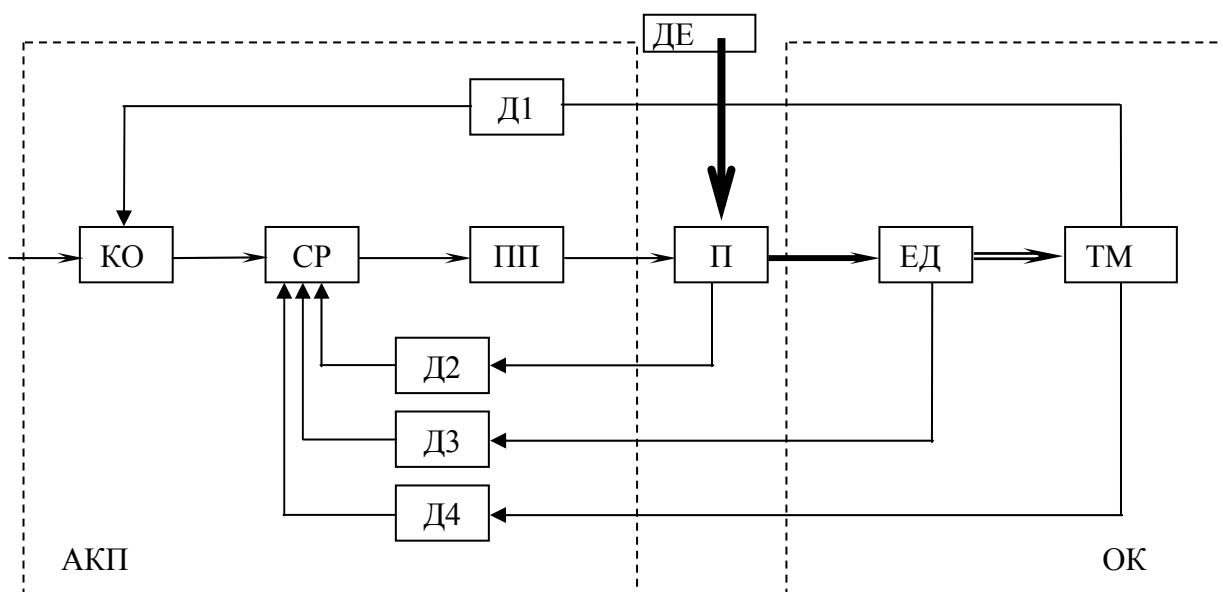


Рисунок 1 - Структурна схема електромеханічної системи
(електропривода)

В системі може використовуватись не один, а декілька регуляторів, які утворюють систему регуляторів *СР* з певною взаємодією. Сигнал керування перетворювачем від регуляторів може подаватись через проміжний підсилювач *ПП*. Інформацію про стан двигуна та технологічної машини автоматичний керуючий пристрій *АКП* отримує від різних датчиків *Д1 - Д4*. Як правило, кожному регулятору відповідає свій датчик. Керуючий орган *КО* формує завдання на режим роботи, яке регулятори перетворюють у керуючий сигнал для перетворювача. Таким чином наведена на рис. 1 схема в загальному вигляді описує систему автоматичного керування координат електромеханічної системи або електропривода.

Під координатою електропривода розуміють ту величину, яка підлягає регулюванню. Координатами електропривода називають момент, струм двигуна, магнітний потік (або потокозчеплення для двигунів змінного струму), швидкість обертання валу двигуна та його кутове положення. Система автоматичного керування може регулювати одну або відразу декілька координат.

Для більш якісного регулювання координат електропривода використовуються замкнені системи керування. Вони можуть бути як одноконтурними так і багатоконтурними. Майже всі сучасні системи регулювання координат електропривода будуються за принципами підлеглого регулювання []. Загальна структурна побудова систем підлеглого керування координатами електропривода представлена на рис. 2.

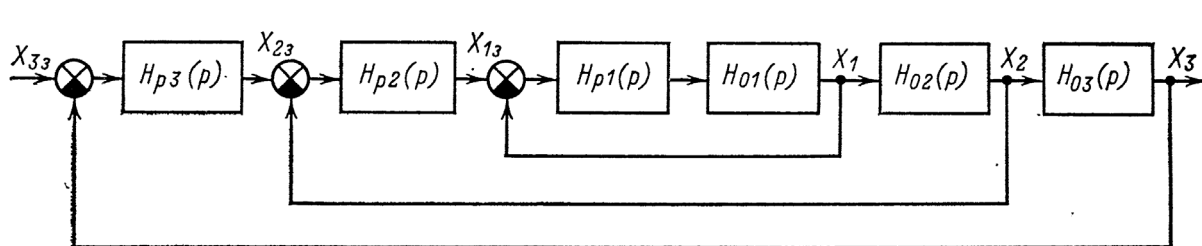


Рисунок 2 – Структурна схема системи підлеглого керування.

Така система складається з декількох контурів, які вкладені один в одного. До складу контуру входять об'єкт керування $H_{01}(p)$, $H_{02}(p)$, $H_{03}(p)$ та

регулятор $H_{p1}(p)$, $H_{p2}(p)$, $H_{p3}(p)$. При цьому кожен внутрішній контур є частиною об'єкту керування зовнішнього контуру. Кожен регулятор регулює свою координату X_1 , X_2 , X_3 . Регулятори включені послідовно один за одним. Вихід одного регулятора є завданням для іншого. Кількість регуляторів дорівнює кількості регульованих координат. Перед регулятором за допомогою суматорів здійснюється порівняння сигналів завдання X_{13} , X_{23} , X_{33} з дійсним значенням координати X_1 , X_2 , X_3 і сигнал різниці подається на вхід регулятора.

Замкнені системи з регуляторами можуть працювати як у режимі стабілізації регульованої координати, так і у режимі компенсації збурюючих дій зі сторони навантаження.

Системи стабілізації підтримують регульовану координату на заданому рівні і працюють за принципом відхилення. Коли реальне значення регульованої координати відрізняється від заданого, розраховується похибка регулювання, яка дорівнює різниці між заданою величиною та дійсним значенням регульованої координати. Ця похибка подається на вхід регулятора, який за певним законом формує керуючий вплив на перетворювач енергії. Такі системи використовують від'ємний зворотний зв'язок.

Системи, що компенсують вплив збурюючих дій використовують позитивний зворотний зв'язок. Вони безпосередньо або опосередковано вимірюють величину збурення і з деяким коефіцієнтом та знаком плюс додають цей сигнал до сигналу завдання на вході або виході регулятора. Оскільки використовується позитивний зворотний зв'язок, система може втрачати стійкість. Тому такі системи (конттури) використовуються тільки у складі систем стабілізації.

З теорії автоматичного регулювання [] відомо, що для того, щоб регулятор здійснював якісне регулювання заданої координати, до його складу повинні входити параметри об'єкту регулювання.

Якщо параметри об'єкту після налаштування регулятора зміняться з якихось причин і відрізняться від тих на які налаштований регулятор, якість регулювання і відповідні критерії якості погіршаться.

До параметрів електропривода відносяться:

- активні опори обмоток ротора, статора, якоря, збудження;
- індуктивності розсіювання та взаємні індуктивності обмоток двигунів;
- момент інерції валу двигуна та загальний зведений до валу момент інерції двигуна та виконавчої машини.

Всі ці перелічені параметри під час роботи можуть змінюватись. Тоді кажуть, що в системі діють так звані параметричні збурення. Для того щоб оцінити наскільки система якісно регулює координати електропривода введені різні критерії якості регулювання.

До критеріїв якості відносяться деякі величини, які показують наскільки сигнал на виході системи відповідає сигналу завдання (рис. 3). Критерії якості можуть бути як статичними, так і динамічними. Статичні критерії характеризують відповідність у статичному режимі роботи при відсутності, або закінчені будь-яких перехідних процесів. Тобто коли регульована величина майже незмінна в часі. Таким критерієм, наприклад, є статична похибка регулювання.

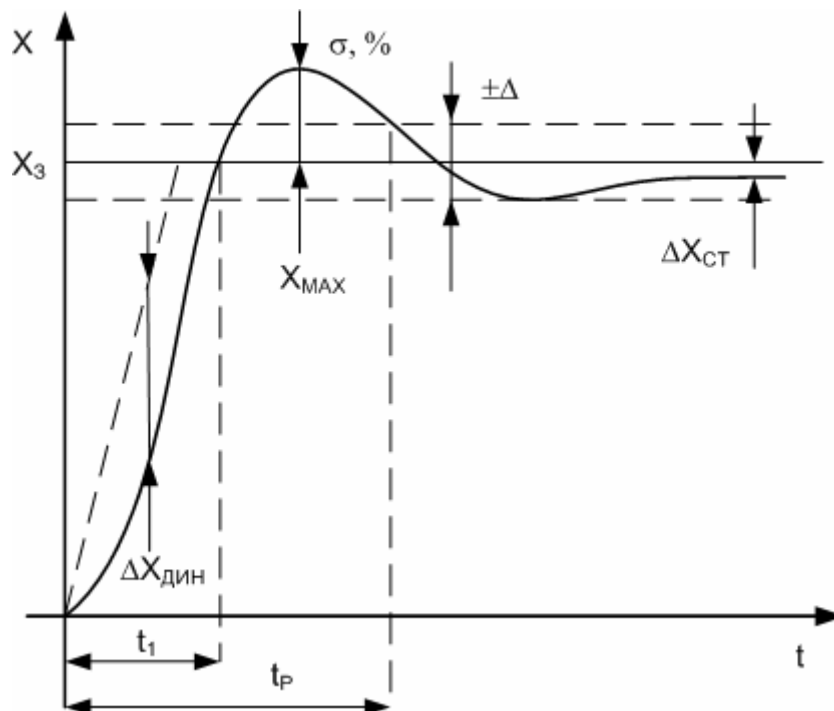


Рисунок 3 – До визначення критеріїв якості

Статичною похибкою регулювання ΔX_{CT} називається різниця між заданим та дійсним значенням регульованої величини в статичному режимі (рис. 3).

До критерії якості у динаміці відносяться: час першого узгодження, пере регулювання, час регулювання.

Час першого узгодження t_l – це час коли величина на виході контуру регулювання вперше досягне заданого значення.

Час регулювання t_p – це час за який величина на виході контуру регулювання досягне заданого значення з заданою похибкою $\pm \Delta$ і більше не виходитиме за задані межі без певних причин, наприклад появи збурення. Величина похибки за звичай встановлюється на рівні $\pm(2-5)\%$ від заданої величини.

Перерегулюванням σ називається величина, яка показує наскільки максимальне значення дійсної ΔX_{MAX} величини більше заданої під час перехідного процесу. Як правило визначається у відсотках.

Динамічною похибкою регулювання $\Delta X_{ДИН}$ називається різниця між заданим та дійсним значенням регульованої величини в динамічному режимі, тобто під час перехідного процесу. Даний критерій частіше за все застосовується до систем регулювання положення.

До системи може застосовуватись один або декілька з зазначених вище критеріїв якості, це залежить від призначення електромеханічної системи.

1.2 Вибір електромеханічного перетворювача для досліджень

Серед великої кількості типів електромеханічних перетворювачів, що експлуатуються в промисловості на Україні та в світі, особливу увагу заслуговують системи на базі асинхронних короткозамкнених двигунів. Завдяки своїй простоті, високій надійності та енергоефективності асинхронний двигун став найбільш розповсюдженим типом електромеханічних перетворювачів. Завдяки бурхливому розвитку силової електроніки, напівпровідникових перетворювачів вони знаходять масове тотальне

використання. Якщо раніше асинхронний електропривод з замкненою системою регулювання використовувався дуже рідко, то зараз майже кожен перетворювач середнього класу складності і вище має у своєму складі можливість реалізувати замкнену систему керування координатами двигуна, наприклад систему векторного керування.

Замкнені системи керування координатами електропривода на базі асинхронного двигуна та перетворювача частоти використовуються у великій кількості машин та механізмів, наприклад:

- вантажопідйомні та транспортні машини різних типів та призначення;
- технологічне устаткування на підприємствах різних галузей: гірничо-видобувної, харчової, хімічної, легкої та інш.;
- роботи та роботизовані комплекси;
- метало оброблювальні верстати,
- різні види транспорту та інше.

Такий широкий спектр використання вимагає досконалих знань про режими роботи замкнених систем в різних умовах, їх особливості, сильні та слабкі сторони.

Як зазначалось вище, одним з аспектів, що впливає на якість регулювання, є зміна параметрів об'єкта регулювання. В цій роботі буде дослідження вплив зміни деяких параметрів асинхронного двигуна на якість регулювання його координат в системі векторного регулювання швидкості.

1.3 Аналіз факторів, що впливають на зміну параметрів електроприводів.

1.3.1 Активні опори статора та ротора асинхронного двигуна.

Зміна активних опорів статора та ротора відбувається за умови зміни температури обмоток двигуна. Зміна відбувається, по-перше, в наслідок зміни температури середовища, в якому працює двигун, а по-друге, в наслідок нагрівання обмоток струмом. Рівень припустимої температури обмоток

визначається класом її ізоляції. Найбільш розповсюдженим класом ізоляції загальнопромислових двигунів є клас F, який допускає максимальний її нагрів до 155°C .

За даними [2, 5, 6], середнє перевищення температури обмоток статора асинхронних двигунів при класі ізоляції F та ефективній температурі оточуючого середовища $+40^{\circ}\text{C}$ складає 100°C . Тобто це означає, що максимальне припустиме абсолютне значення температури обмоток статора становить 140°C .

За тими ж даними [6] температуру стрижневих обмоток ротора можна прийняти на 10°C більше, тобто 150°C . Стрижневими обмотками обладнані асинхронні короткозамкнені двигуни, яких у використанні переважна більшість, навіть у регульованому електроприводі.

У статорних обмотках та обмотках якорів та фазних роторів електричних машин використовується мідний дріт. У короткозамкнених роторах найбільше використання знайшов алюміній, хоча останнім часом у двигунах з підвищеною енергоефективністю використовуються мідні короткозамкнені обмотки ротора. У табл. 1 наведені значення питомого опору міді та алюмінію при різних температурах [5].

Таблиця 1

Питомий опір матеріалів провідників обмоток

Матеріал	Питомий електричний опір, Ом \times м, при температурі, $^{\circ}\text{C}$		
	20	75	115
Мідь	$\frac{1}{57} \times 10^{-6}$	$\frac{1}{47} \times 10^{-6}$	$\frac{1}{41} \times 10^{-6}$
Алюміній литий	$\frac{1}{30} \times 10^{-6}$	$\frac{1}{21,5} \times 10^{-6}$	$\frac{1}{20,5} \times 10^{-6}$

Умови роботи електричних двигунів можна умовно розділити на дві великі групи. До першої групи віднесемо середовища закритих приміщень в яких є внутрішні джерела тепла і де середня добова та середня річна температура завжди більше $(0 \div 10)^{\circ}\text{C}$. До таких приміщень можна віднести,

наприклад, інструментальні, виробничі цехи з постійною присутністю великої кількості робочого персоналу. До другої групи віднесемо відкриті та закриті площадки і приміщення в яких середня добова та середня річна температура відповідають або дещо більше температури на відкритому повітрі. До такої групи можна віднести відкриті промислові площадки, на яких працюють вантажні крани різного призначення, цехи деяких металургійних підприємств тощо.

При тривалому режимі роботи та, умовно кажучи, постійній температурі оточуючого середовища температура обмоток змінюється в узьких межах. При змінній тривалості роботи та змінній добовій температурі оточуючого середовища температура обмоток може коливатись у широких межах. Наприклад, якщо за середньорічну температуру взяти температуру $+20^{\circ}\text{C}$, то температура обмоток двигунів з приміщень першого типу при роботі в усталеному режимі роботи на протязі року буде завжди більше $+20^{\circ}\text{C}$, а температура обмоток двигунів з приміщень другого типу в усталеному режимі роботи на протязі року може коливатись навколо рівня $+20^{\circ}\text{C}$ у широких межах і залежатиме від конкретних погодних умов.

Зміна величини активного опору обмоток може бути описана загальною формулою:

$$R_1 = R_0 [1 + \alpha(t_1 - t_0)],$$

де R_1 – шуканий опір при температурі t_1 ; R_0 - базове (або початкове) значення опору при температурі t_0 ; α - температурний коефіцієнт опору, що характеризує збільшення опору при збільшенні температури на 1°C . Для міді та алюмінію коефіцієнт дорівнює $\alpha = 0,004^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Серед всіх параметрів температура змінюється повільніше за всіх. Тому показники якості також можуть змінюватись в часі повільно.

1.3.2 Зведений до валу двигуна момент інерції механізму

Для деяких механізмів зведений для валу двигуна момент інерції системи величина змінна в процесі роботи. Причому він може змінюватись у доволі широких межах. Зміна моменту інерції в процесі роботи виникає у наступних випадках:

- зміна розмірів механічної частини відносно центру обертання, наприклад таке відбувається в робототехнічних комплексах;
- зміна ваги механічної частини під час роботи – до таких установок відносяться центрифуги, механізми головного руху токарних верстатів, підйомні крани.

Для прикладу, в [2] зазначено, що для механізмів горизонтального переміщення вантажів зведений момент інерції вантажу та механізму перевищує момент інерції двигуна в 10-30 разів. Тому при зміні ваги вантажу загальний момент інерції змінюється у доволі широких межах.

Також вище наведені механізми можна розділити на дві групи за такою ознакою:

- в одних зміна моменту інерції відбувається на початку або по завершенні робочого циклу і весь робочий цикл система працює із сталим значенням моменту інерції. До таких відносяться крани.
- в інших зміна моменту інерції відбувається під час робочого циклу. До таких відносяться роботи, центрифуги, верстати.

Зміна моменту інерції безпосередньо впливає на якість регулювання швидкості. Тому в таких системах, які як правило є замкненими системами регулювання швидкості використовуються заходи для зменшення впливу зміни моменту інерції. Цього можна досягти шляхом вибору таких налаштувань регулятора швидкості, за яких зміна моменту інерції майже не впливатиме на якість роботи системи, але при цьому показники якості регулювання можуть погіршитись.

Інший спосіб – активна корекція зміни моменту інерції під час роботи. Така система в режимі реального часу автоматично корегує налаштування

регулятора. Таким чином налаштування регулятора завжди залишаються оптимальними, а критерії якості регулювання швидкості незмінні. Для того щоб вибрати необхідний захід для усунення або зменшення впливу зміни моменту інерції на якість роботи електромеханічної системи необхідно чітко знати конфігурацію електромеханічної системи та межі зміни моменту інерції.

1.4 Об'єкт та задачі досліджень

Об'єктом досліджень обираємо електропривод переміщення візка мостового крану вантажопідйомністю 50 т на базі асинхронного короткозамкненого двигуна типу 4A160S6Y3 потужністю 11 кВт з векторною системою регулювання. Вага візка складає 3 т, швидкість руху – 1 м/с.

В роботі будемо проводити наступні дослідження:

- вплив зміни активних опорів статора та ротора на критерії якості регулювання струму та швидкості двигуна;
- вплив зміни зведеного до валу двигуна моменту інерції на критерії якості регулювання швидкості двигуна.

2 АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД

Для проведення подальших досліджень попередньо виконаємо розрахунки необхідних даних двигуна, системи векторного керування, синтезуємо регулятори системи.

2.1 Розрахунок параметрів двигуна.

Нижче в табл. 2.1 представлені основні дані вибраного двигуна [6], а також параметри Г-образної схеми заміщення у відносних одиницях.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані асинхронного двигуна

Тип двигуна	4A160S6Y3
Номінальна потужність P_H , кВт	11
Номінальна фазна напруга $U_{фH}$, В	220
Номінальний ККД η_H	0,86
Номінальний $\cos \varphi_H$	0,86
Момент інерції J , кг*м ²	0,14
Число пар полюсів Z_p	3
Номінальне ковзання s_H	0,027
Критичне ковзання s_K	0,15
Кратність пускового моменту $M_{п*}$, в.о.	1,2
Кратність максимального моменту $M_{кр*}$, в.о.	2,0
Параметри схеми заміщення у відносних одиницях	
Активний опір статора R_s^* , в.о.	0,073
Зведений активний опір ротора R_r^* , в.о.	0,03
Індуктивний опір статора X_s^* , в.о.	0,11
Зведений індуктивний опір ротора X_r^* , в.о.	0,15
Індуктивний опір повітряного зазору X_μ^* , в.о.	3,0

Номінальна швидкість обертання двигуна n_H дорівнює, об/хв:

$$n_H = n_C(1 - s_H) = 1000 \times (1 - 0,027) = 973 \text{ об/хв.}$$

Номінальна кутова частота обертання двигуна:

$$\omega_H = \frac{\pi \times n_H}{30} = \frac{3,1415 \times 973}{30} = 101,9 \text{ рад/с.}$$

Номінальний момент двигуна визначимо за формулою:

$$M_n = \frac{9,55 \cdot P_n}{n_C \cdot (1 - s_n)} = \frac{9,55 \cdot 11000}{1000 \cdot (1 - 0,027)} = 108 \text{ Нм}$$

де P_n – номінальна потужність електродвигуна; Вт; n_C – синхронна швидкість поля статора, об/хв; s_n – номінальне ковзання електродвигуна.

Номінальний фазний струм статора:

$$I_{\phi n} = \frac{P_n}{3 \cdot U_{\phi n} \cdot \eta_n \cdot \cos \varphi_n} = \frac{11000}{3 \cdot 220 \cdot 0,86 \cdot 0,86} = 22,53 \text{ А,}$$

де $U_{\phi n}$ – номінальна фазна напруга двигуна; В; η_n – номінальний ККД двигуна; $\cos \varphi_n$ – номінальний коефіцієнт потужності двигуна.

Для переводу опорів з відносних одиниць в абсолютні скористаємося виразом:

$$Z = Z^* \cdot Z_B = Z^* \cdot \frac{U_{\phi n}}{I_{\phi n}}$$

де $Z_B = \frac{U_{\phi n}}{I_{\phi n}}$ – базовий опір; Ом; Z^* – опір у відносних одиницях; Z – шуканий опір, Ом.

Визначимо базовий опір:

$$Z_b = \frac{U_{\phi n}}{I_{\phi n}} = \frac{220}{22,53} = 9,76 \text{ Ом}$$

Активний опір статора:

$$R_s = 0,073 \times 9,76 = 0,712 \text{ Ом}$$

Активний опір ротора:

$$R_r = 0,11 \times 9,76 = 0,293 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір статора:

$$X_s = 0,11 \times 9,76 = 1,07 \text{ Ом},$$

Індуктивний опір ротора:

$$X_r = 0,15 \times 9,76 = 1,46 \text{ Ом},$$

Індуктивний опір кола намагнічування:

$$X_\mu = 3,0 \times 9,76 = 29,28 \text{ Ом},$$

Індуктивний опір короткого замикання:

$$X_K = X_s + X_r = 1,07 + 1,46 = 2,53 \text{ Ом}.$$

Частота живлячої мережі:

$$\omega_0 = 2 \pi f = 2 \pi \times 50 = 314,159 \text{ с}^{-1}$$

Індуктивність розсіювання обмотки статора:

$$L_{s\sigma} = X_s / \omega_0 = 1,07 / 314,159 = 0,0034,$$

де $\omega_0 = 2 \pi f$ – кутова частота живлячої мережі, рад/с; $f = 50 \text{ Гц}$ – номінальна частота живлячої мережі.

Індуктивність розсіювання обмотки ротора:

$$L_{r\sigma} = X_r / \omega_0 = 1,46 / 314,159 = 0,0046 \text{ Гн}.$$

Максимальна взаємна індуктивність між обмотками статора и ротора:

$$L_m = X_\mu / \omega_0 = 29,28 / 314,159 = 0,0932 \text{ Гн}.$$

Повна індуктивність обмотки статора:

$$L_S = L_{S\sigma} + L_m = 0,0034 + 0,0932 = 0,0966 \text{ Гн.}$$

Повна індуктивність обмотки ротора:

$$L_r = L_{r\sigma} + L_m = 0,0046 + 0,0932 = 0,0978 \text{ Гн.}$$

Розраховані параметри двигуна та абсолютні значення параметрів схеми замощення зведені до табл. 2.2

Таблиця 2.2 – Параметри двигуна 4А80В6У3

Активний опір статора R_s , Ом	0,712
Активний опір статора $R_{s(20)}$ при температурі 20 ⁰ С, Ом [, гл. 6]	0,503
Зведений активний опір ротора R_r , Ом	0,293
Індуктивність обмотки статора L_s , Гн	0,0966
Індуктивність обмотки ротора L_r , Гн	0,0978
Індуктивність намагнічування L_m , Гн	0,0932
Номінальний момент M_n , Нм	108,0
Номінальний фазний струм $I_{\phi n}$, А	22,53
Номінальна частота обертання ω_n , рад/с	101,9

В [6] вказано, що отримані параметри надані для номінального режиму при розрахунковій робочій температурі 115⁰С для ізоляції класу F. Там же вказано, що температуру стрижневих обмоток ротора можна прийняти на 10⁰С більше, тобто 125⁰С.

Оскільки обраним механізмом є підйомний кран, який працює на відкритому повітрі, прийmemo що на протязі року температура середовища може коливатись у межах від -25 до +35⁰С. При цьому температура обмоток може змінюватись в діапазоні від -25 до +115⁰С. Задамося умовними діапазонами температур обмоток по сезонах при умові роботи з номінальними даними:

- зима - -25 до +50⁰С;
- літо - +35 до +115⁰С;
- весна, осінь - 0 до +75⁰С.

Далі за формулою, наведеною в першому розділі, розрахуємо значення опорів обмоток для заданого діапазону температур (табл. 2.3.).

Таблиця 2.3 – Залежність опорів статора та ротора від температури

T, °C	-25	-10	0	20	40	60	80	100	115	120
R_s , Ом	0,422	0,447	0,465	0,503	0,544	0,588	0,636	0,688	0,730	0,745
R_r , Ом	0,166	0,176	0,183	0,198	0,214	0,232	0,250	0,271	0,287	0,293

При «налагодженні» за базову температуру обмоток приймемо температуру $+20^{\circ}\text{C}$ і відповідний їй опір.

Як показує аналіз літератури [3, 10, 11, 13] регулювання моменту та швидкості асинхронного двигуна забезпечують системи векторного керування координатами електропривода, побудовані за принципами підлеглого керування. Побудова векторної системи керування можлива, якщо асинхронний двигун представити у обертовій системі координат, що пов'язана з потокозчепленням ротора.

2.2 Модель асинхронного короткозамкненого двигуна в системі координат, орієнтованій за вектором потокозчеплення ротора

Рівняння асинхронної машини, записані у термінах узагальненого вектора і представлені в координатній системі, що обертається зі ω_c , мають вид [9]:

$$\bar{U}_s = \bar{I}_s R_s + \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} + j\omega_c \bar{\Psi}_s,$$

$$\bar{U}_r = \bar{I}_r R_r + \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_c - \omega)\bar{\Psi}_r.$$

$$\bar{\Psi}_s = \bar{I}_s L_s + \bar{I}_r L_m,$$

$$\bar{\Psi}_r = \bar{I}_s L_m + \bar{I}_r L_r,$$

де $\bar{U}_s, \bar{I}_s, \bar{\Psi}_s$ – узагальнені вектори напруги, струму і потокозчеплення статора; $\bar{U}_r, \bar{I}_r, \bar{\Psi}_r$ – узагальнені вектори напруги, струму і потокозчеплення ротора; R_s, R_r – активні опори статора і ротора; ω_c – швидкість обертання системи координат; ω – швидкість обертання ротора; L_s, L_r, L_m – індуктивність статора, ротора і взаємна індуктивність статора і ротора відповідно; $j = \sqrt{-1}$.

Для виводу рівнянь, за якими будується структурна схема асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, використаємо систему координат u, v , яка обертається з синхронної швидкістю ω_c та орієнтована за вектором потокозчеплення ротора $\bar{\Psi}_r$. Вісь u є дійсною віссю, а вісь v – уявною.

З двох останніх рівнянь системи виразимо вектори потокозчеплення статора $\bar{\Psi}_s$ та струму ротора \bar{I}_r :

$$\bar{\Psi}_s = \bar{I}_s L_s \left(\frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s L_r} \right) + \bar{\Psi}_r \frac{L_m}{L_r} = \bar{I}_s L'_s + K_r \bar{\Psi}_r,$$

$$\bar{I}_r = K_r \left(\frac{\bar{\Psi}_r}{L_m} - \bar{I}_s \right),$$

де $K_r = \frac{L_m}{L_r}$ – коефіцієнт електромагнітного зв'язку ротора; $L'_s = L_s - \frac{L_m^2}{L_r}$

– перехідна індуктивність статора [9].

Виконуючи ряд подальших перетворень, представлених в [9] отримаємо дві системи рівнянь, що описують асинхронний двигун в координатній системі u, v :

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{ru} &= \frac{U_{ru} T_r + I_{su} L_m}{1 + p T_r} \\ \omega_c &= \omega + \frac{U_{rv} + K_r R_r I_{sv}}{\Psi_{ru}} \end{aligned} \right\},$$

$$\left. \begin{aligned} U_{su} - K_r U_{ru} &= I_{sv} R'(1 + pT'_s) - \omega_c L'_s I_{sv} - \frac{K_r}{T_r} \Psi_{ru} \\ U_{sv} - K_r U_{rv} &= I_{sv} R'(1 + pT'_s) + \omega_c L'_s I_{su} + \omega K_r \Psi_{ru} \end{aligned} \right\},$$

де $T_r = \frac{L_r}{R_r}$ – стала часу ротора; $T'_s = \frac{L'_s}{R'}$ – перехідна стала часу статора [9],

$p = \frac{d}{dt}$ – оператор Лапласа, де $R' = R_s + K_r^2 R_r$ – перехідний опір статора [9].

Рівняння електромагнітного моменту двигуна:

$$M = \frac{3}{2} Z_p K_r \Psi_{ru} I_{sv},$$

де Z_p – число пар полюсів двигуна.

Рівняння руху системи:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_c,$$

де J – момент інерції двигуна (або сумарний момент інерції системи, зведений до валу двигуна); M_c – статичний момент на валу двигуна, ω_m – механічна швидкість обертання ротора.

На рис. 2.1 представлена структурна схема АД з короткозамкненим ротором, побудована за отриманими виразами в системі координат, орієнтованій за вектором потокозчеплення ротора $\bar{\Psi}_r$.

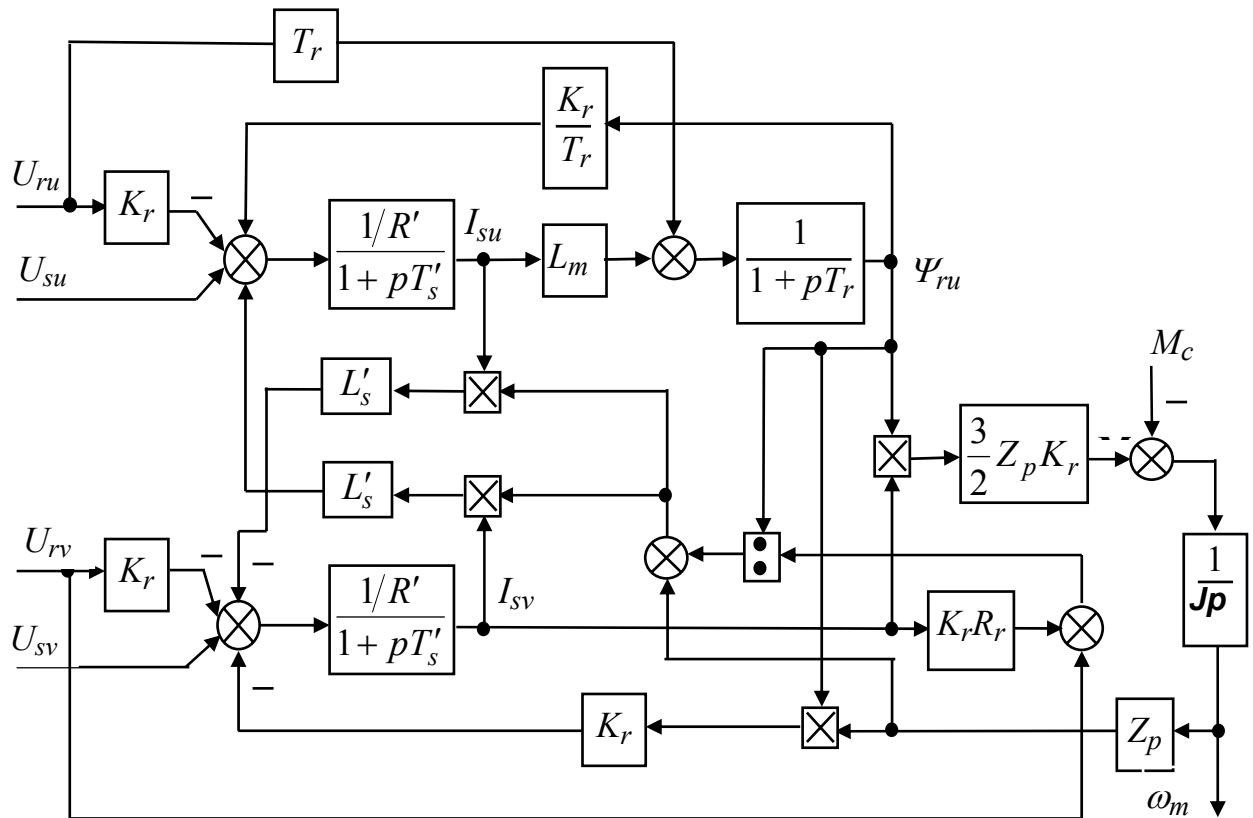


Рисунок 2.1 – Структурна схема АД в системі координат, зв'язаній з вектором потокозчеплення ротора Ψ_r

2.3 Синтез системи регулювання швидкості асинхронного двигуна

Всі сучасні системи регулювання швидкості електродвигунів будуються за принципами підлеглого регулювання координат електропривода і характеризуються каскадним розташуванням регуляторів. Кількість регуляторів визначається кількістю регульованих координат (швидкість, струм, момент, положення і т.і.) [10, 11].

На вході регулятора кожного з контурів порівнюються сигнали, пропорційні заданому та дійсному значенню координати контуру, а вихідна напруга регулятора є сигналом завдання для наступного контуру.

Однією з переваг системи є можливість доволі просто обмежувати регульовану координату шляхом обмеження сигналу завдання з виходу попереднього ре-

гулятора. Серед недоліків – зниження швидкодії системі з кожним новим контуром вдвічі.

Синтез регуляторів системи здійснюється з середини, від внутрішнього регулятора до зовнішнього. Серед критеріїв оптимізації регуляторів використовують в основному модульний та симетричний критерії оптимізації. Вибір критерію залежить від типу передавальних функцій, що входять до складу контуру, та бажаної перехідної функції контуру.

Структурна схема системи автоматичного регулювання (САР) швидкості АД представлена на рис. 2.2.

САР має два канали регулювання. Канал регулювання потокозчеплення ротора складається з контуру потокозчеплення і підлеглого йому контуру потокоутворюючої складової струму статора (складова I_{su} за віссю u). Канал регулювання швидкості складається з контуру швидкості і підлеглого йому контуру моментоутворюючої складової струму статора (складова I_{sv} за віссю v).

До складу контурів струму зі сторони САР входять регулятор струму та перетворювач частоти ПЧ, представлений аперіодичною ланкою з малою некомпенсованою сталою часу T_{μ} . Зовнішні контури складаються з регуляторів швидкості та потокозчеплення відповідно. Інформація о регульованих координатах поступає з датчиків струму $ДТ$, швидкості $ДС$ та потокозчеплення $Д\psi$.

На вході контуру потоку може використовуватись функціональний блок $\PhiБ$, реалізуючий функціональну залежність потокозчеплення від швидкості для випадку двозонного регулювання швидкості.

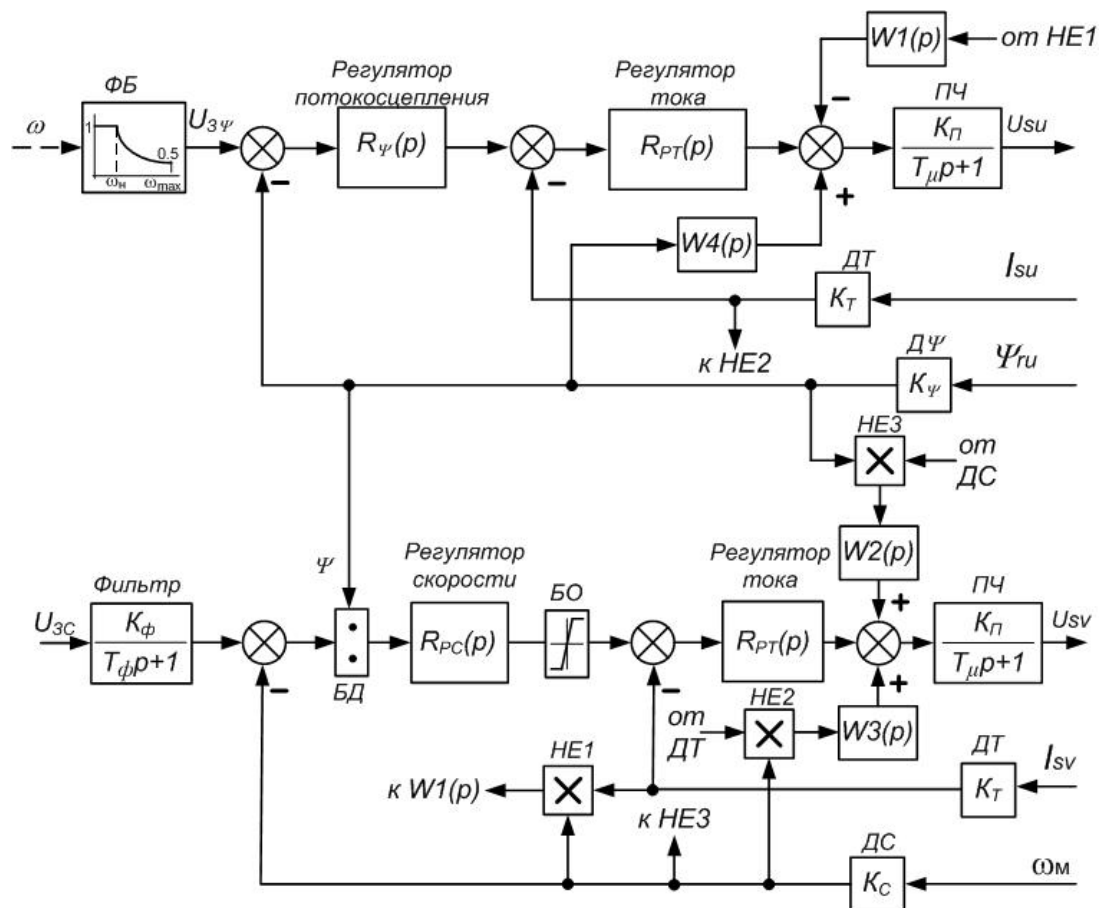


Рисунок 2.2 - Система регулювання швидкості асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в системі координат $u-v$, орієнтованій за вектором потокозчеплення ротора $\bar{\Psi}_r$.

Для компенсації нелінійностей та перехресних зв'язків, присутніх в об'єкті керування, в двигуні, використовуються ланки $W1$, $W2$, $W3$, $W4$ вихідні сигнали яких подаються на вхід ПЧ (за аналогією з компенсацією впливу зворотного зв'язку за ЕРС двигуна в системах постійного струму).

Для синтезу регуляторів визначимо відсутні параметри.

Коефіцієнт електромагнітного зв'язку:

$$K_r = \frac{L_m}{L_r} = \frac{0,0932}{0,0978} = 0,953$$

Перехідна індуктивність статора:

$$L'_s = L_s - \frac{L_m^2}{L_r} = 0,0966 - \frac{0,0932^2}{0,0978} = 0,0078 \text{ Гн}$$

Перехідний опір статора:

$$R' = R_s + K_r^2 R'_r = 0,712 + 0,953^2 \times 0,293 = 0,978 \text{ Ом}$$

Стала часу ротора:

$$T_r = \frac{L_r}{R'_r} = \frac{0,0978}{0,293} = 0,333 \text{ с}$$

Перехідна стала часу статора:

$$T'_s = \frac{L'_s}{R'} = \frac{0,0078}{0,978} = 0,008 \text{ с}$$

Коефіцієнт датчика струму розрахуємо з урахуванням подвійного перевантаження за струмом та відносно амплітудного значення фазного струму:

$$K_T = \frac{U_{y \max}}{2\sqrt{2}I_{\phi n}} = \frac{10}{2\sqrt{2} \times 22,53} = 0,157 \text{ В/А}$$

де $U_{y \max}$ – максимальна робоча напруга системи керування.

Коефіцієнт датчика швидкості:

$$K_C = \frac{U_{y \max}}{\omega_n} = \frac{10}{101,9} = 0,098 \text{ Вс/рад}$$

Номінальне потокозчеплення двигуна:

$$\Psi_n = \frac{M_n}{1,5 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\phi n} \cdot Z_p \cdot K_r} = \frac{108}{1,5 \cdot \sqrt{2} \cdot 22,53 \cdot 3 \cdot 0,953} = 0,79 \text{ Вб}$$

Коефіцієнт датчика потокозчеплення:

$$K_\Psi = \frac{U_{y \max}}{\Psi_n} = \frac{10}{0,712} = 12,64 \text{ В/Вб}$$

Коефіцієнт підсилення перетворювача:

$$K_{\Pi} = \frac{\sqrt{2}U_{\phi H}}{U_{y \max}} = \frac{\sqrt{2} \times 220}{10} = 31,11$$

2.3.1 Синтез регулятора струму

Замкнений контур регулювання моментотворюючої складової струму представлений на рис. 2.3

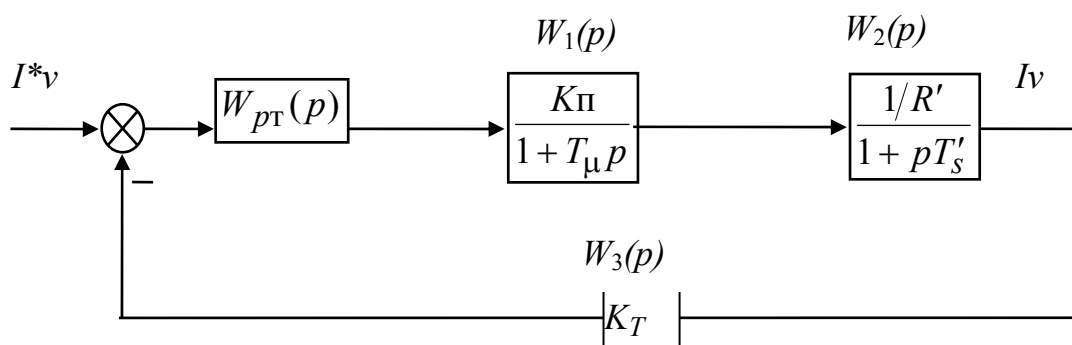


Рисунок 2.3 – Структурна схема контуру регулювання моментотворюючої складової струму

У складі контуру дві аперіодичні ланки. При такій структурі контур оптимізується за модульним критерієм оптимізації. Передаточна функція модульного оптимуму має вид (бажана):

$$W_{\text{мод}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu} p(T_{\mu}p + 1)}$$

Мала стала часу контуру струму включає в себе суму інерційностей в системі, виникаючих при відпрацюванні завдання. До таких затримок відносять сталі часу фільтрів вхідних сигналів струму та напруги, період дискретизації цифрової системи керування, «мертвий час» в роботі силових ключів і т.і. При синтезі регулятора струму T_{μ} прийнято рівною $T_{\mu} = 0,0005$ с.

Передаточну функцію регулятора струму визначимо з виразу:

$$W_{\text{ж}}(p) = W_{\text{рТ}}(p)W_1(p)W_2(p)W_3(p) = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)},$$

Звідки

$$W_{\text{рТ}}(p) = \frac{W_{\text{ж}}(p)}{W_1(p)W_2(p)W_3(p)} = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)} \frac{(T_{\mu}p + 1)}{K_{\Pi}} \frac{R'(1 + pT'_s)}{K_T},$$

$$W_{\text{рТ}}(p) = \frac{W_{\text{ж}}(p)}{W_1(p)W_2(p)W_3(p)} = \frac{R'(1 + pT'_s)}{2T_{\mu}pK_{\Pi}K_T}$$

В результаті зроблених перетворень отримано ПІ-регулятор струму з такими коефіцієнтами:

$$W_{\text{рТ}}(p) = \frac{R'T'_s}{2T_{\mu}K_{\Pi}K_T} + \frac{R'}{2T_{\mu}pK_{\Pi}K_T} = \frac{0,978 \cdot 0,008}{2 \cdot 0,0005 \cdot 31 \cdot 0,157} + \frac{0,978}{2 \cdot 0,0005 \cdot 31 \cdot 0,157}$$

$$W_{\text{рТ}}(p) = k_{\text{рТн}} + k_{\text{рТи}} \frac{1}{p} = 1,61 + 200 \frac{1}{p}$$

Замкнений контур регулювання потокоутворюючої складової струму аналогічний контуру моментоутворюючої складової струму і має такі ж самі характеристики.

2.3.2 Синтез регулятора потокозчеплення ротора

При синтезі передаточної функції регулятора потокозчеплення передаточну функцію замкненого контуру струму подамо у вигляді:

$$W_T(p) = \frac{1/K_T}{2T_{\mu}p + 1},$$

де K_T – коефіцієнт передачі датчика струму, T_{μ} – мала некомпенсована стала часу.

Синтез регулятора потокозчеплення здійснюємо аналогічно синтезу регулятора струму. Структурна схема контуру регулювання потокозчеплення ротора має вид (рис. 2.4):

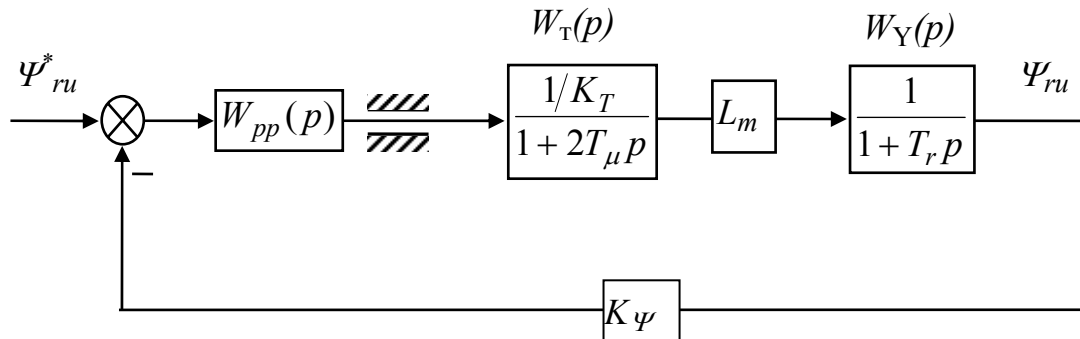


Рисунок 2.4 – Структурна схема контуру регулювання потокозчеплення ротора

Для отримання передаточної функції регулятора потокозчеплення скористаємося модульним критерієм оптимізації, який для контуру потокозчеплення має вид [10, 11]:

$$W_{mod}(p) = \frac{1}{4T_\mu p(2T_\mu p + 1)}.$$

Отримана передаточна функція ПІ-регулятора потокозчеплення відповідає виразу:

$$W_{pp}(p) = \frac{K_T(T_r p + 1)}{4T_\mu p L_m K_\Psi}.$$

Визначимо коефіцієнти регулятора:

$$W_{pp}(p) = \frac{K_T(T_r p + 1)}{4T_\mu p L_m K_\Psi} = \frac{K_T T_r}{4T_\mu L_m K_\Psi} + \frac{K_T}{4T_\mu L_m K_\Psi} \frac{1}{p}$$

$$W_{pp}(p) = \frac{0,157 \cdot 0,333}{4 \cdot 0,0005 \cdot 12,64 \cdot 0,0932} + \frac{0,157}{4 \cdot 0,0005 \cdot 12,64 \cdot 0,0932} \frac{1}{p} = 22,19 + 66,63 \frac{1}{p}$$

2.3.3. Синтез регулятора швидкості

При синтезі передаточної функції регулятора швидкості передаточна функція замкнутого контуру струму має вид:

$$W_T(p) = \frac{1/K_T}{2T_\mu p + 1},$$

Контур регулювання швидкості зображено на рис. 2.5. Контур складається з аперіодичної та інтегральної ланки. Для отримання передаточної функції ПІ-регулятора швидкості (астатична система) скористуємося симетричним критерієм оптимізації, передаточна функція якого має вид [11]:

$$W_{sop}(p) = \frac{8T_\mu p + 1}{32T_\mu^2 p^2 (2T_\mu p + 1)}.$$

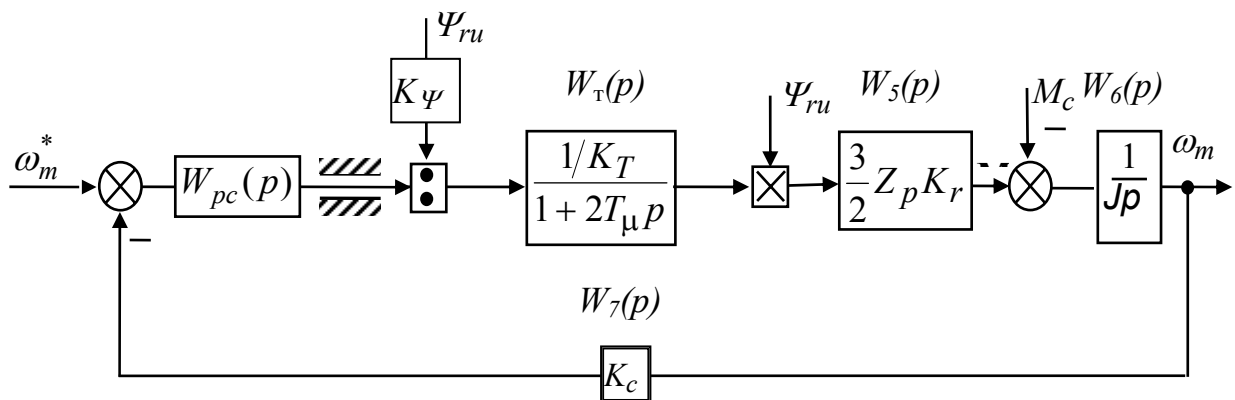


Рисунок 2.5 – Структурна схема контуру регулювання швидкості

Прирівняв добуток всіх ланок розімкненого контуру швидкості до передаточної функції симетричного оптимуму, знайдемо передаточну функцію ПІ-регулятора швидкості:

$$W_{ж}(p) = W_{pc}(p)W_T(p)W_5(p)W_6(p)W_7(p) = \frac{(8T_\mu p + 1)}{32T_\mu^2 p^2 (2T_\mu p + 1)},$$

Звідки

$$W_{pc}(p) = \frac{W_{жс}(p)}{W_m(p)W_5(p)W_6(p)W_7(p)} = \frac{(8T_\mu p + 1)}{32T_\mu^2 p^2 (2T_\mu p + 1)} \frac{(2T_\mu p + 1)K_T J K_\Psi}{Z_p K_r K_c p} \frac{2}{3},$$

$$W_{pc}(p) = \frac{W_{жс}(p)}{W_m(p)W_5(p)W_6(p)W_7(p)} = \frac{J_{N1} K_T (8T_\mu p + 1) K_\Psi}{48T_\mu^2 p Z_p K_r K_c},$$

$$W_{pc}(p) = \frac{J_{N1} K_T 8T_\mu K_\Psi}{48T_\mu^2 Z_p K_r K_c} + \frac{J_{N1} K_T K_\Psi}{48T_\mu^2 Z_p K_r K_c} \frac{1}{p}.$$

При розрахунку коефіцієнтів регулятора швидкості необхідно пам'ятати, що при роботі крана моменти інерції можуть змінюватись. Тому для збереження стійкості системи настройку регулятора будемо виконувати при меншому значенні моменту інерції – кран працює без вантажу. Зведений момент інерції складається з моменту інерції двигуна та зведеного до валу двигуна моменту інерції візка. Це дозволить контурному коефіцієнту не збільшуватись, але система збереже стійкість, хоча дещо втратить в швидкодії при великих моментах інерції (робота з повним вантажем).

Розрахуємо зведений момент інерції порожнього візка (розділ 1.4):

$$J_{pr1} = 1,2J_D + \frac{m_B \times V^2}{\omega_{Dn}^2} = 1,2 \times 0,14 + \frac{3000 \times 1^2}{100^2} = 0,468 \text{ кг м}^2$$

Розрахуємо зведений момент інерції завантаженого візка:

$$J_{pr2} = 1,2J_D + \frac{m_B \times V^2}{\omega_{Dn}^2} = 1,2 \times 0,14 + \frac{50000 \times 1^2}{100^2} = 5,168 \text{ кг м}^2$$

Отримані значення зведених моментів інерції відрізняються у 11,68 рази.

$$W_{pc}(p) = \frac{0,468 \cdot 0,157 \cdot 8 \cdot 0,0005 \cdot 12,64}{48 \cdot 0,0005^2 \cdot 3 \cdot 0,098 \cdot 0,953} + \frac{0,468 \cdot 0,157 \cdot 12,64}{48 \cdot 0,0005^2 \cdot 3 \cdot 0,098 \cdot 0,953} \frac{1}{p}$$

$$W_{pc}(p) = 1104,9 + 276070 \frac{1}{p}.$$

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ПРИ ЗМІНІ ПАРАМЕТРІВ

3.1 Дослідження впливу зміни опорів статора та ротора

Проаналізувавши структурні схеми контурів векторної системи регулювання координат та формули для розрахунку змінних, можна побачити, що опори і сталі часу, що залежать від опорів, знаходяться у контурах регулювання струму та потокозчеплення. Тому в першу чергу проведемо дослідження впливу зміни опорів на якість роботи контуру регулювання струму статора. Оскільки контури струму є складовими елементами контурів потокозчеплення та швидкості, далі розглянемо чи впливає зміна опорів на роботу саме зовнішніх контурів.

Згадаємо на які змінні впливають опори статора та ротора (див. розділ 2):

перехідний опір статора:

$$R' = R_s + K_r^2 R_r', \text{ Ом}$$

стала часу ротора:

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} \text{ с,}$$

перехідна стала часу статора:

$$T_s' = \frac{L_s'}{R'} \text{ с.}$$

За допомогою табл. 2.3 розрахуємо зміну наведених сталих часу та опорів в залежності від температури (табл.3.1). На рис. 3.1 наведені графіки зміни опорів статора R_s та ротора R_r в залежності від температури (за табл. 2.3).

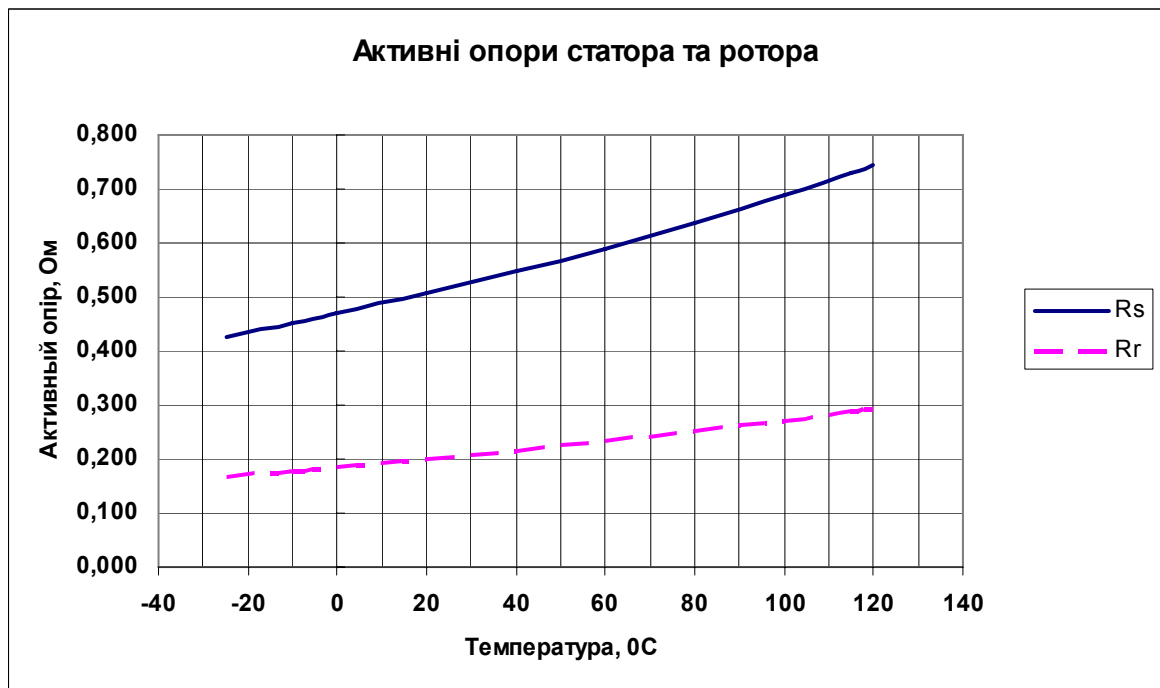


Рисунок 3.1 – Залежність опорів статора R_s та ротора R_r від температури

Таблица 3.1 – Зміна опорів та сталих часу в залежності від температури

$T, ^\circ\text{C}$	-25	-10	0	20	40	60	80	100	115	120
$R', \text{Ом}$	0,577	0,612	0,636	0,687	0,742	0,801	0,866	0,935	0,991	1,011
$T'_s \times 10^{-2} \text{ с}$	1,352	1,275	1,226	1,135	1,051	0,973	0,901	0,834	0,787	0,772
$Tr, \text{с}$	0,585	0,551	0,530	0,491	0,455	0,421	0,390	0,361	0,340	0,334

Контур регулювання струму статора. Суть дослідження буде у наступному. Виконуємо налаштування регулятора струму при обраному значенні опору для однієї фіксованої температури, яке будемо називати базове. Далі змінюючи значення опорів та сталих часу лише в передатній функції, що описує статор, перевіряємо реакцію контуру на одиничний скачок завдання і знімаємо показники якості: перерегулювання σ (%), час першого узгодження t_1 та час регулювання t_p . Дані заносимо до таблиць, будуємо графіки.

Результати експериментів зведені до табл. 3.2 – табл. 3.4, а відповідні ним графіки представлені на рис. 3.2- рис. 3.4.

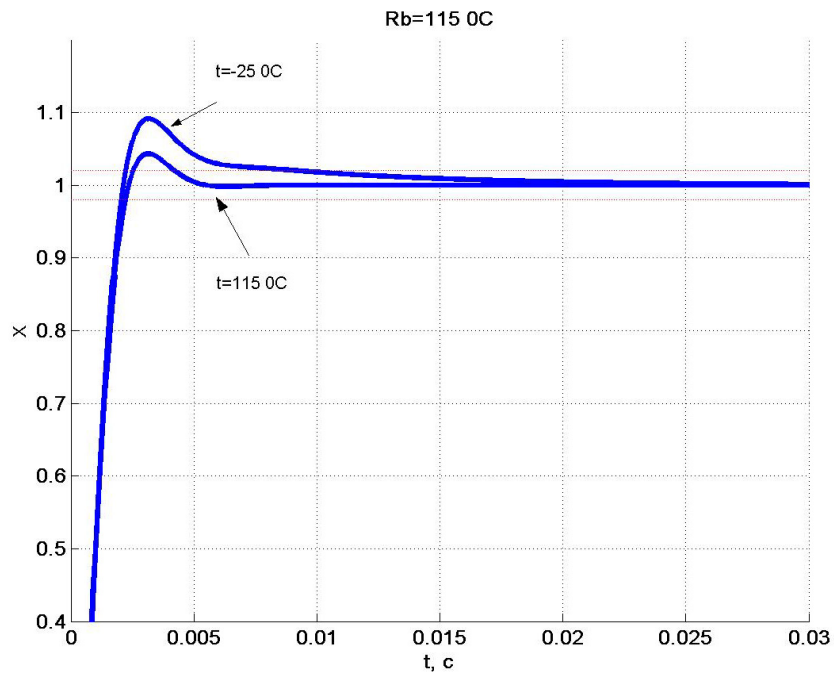


Рисунок 3.3 – Перехідні процеси у контурі струму з базовим значенням активного опору статора при 115⁰C

Таблиця 3.4 – Показники якості перехідного процесу (базові R' , T'_s при 60⁰C)

$T, ^\circ\text{C}$	-25	-10	0	20	40	60	80	100	115	120
$t_l, \text{мс}$	2,22	2,24	2,25	2,28	2,3	2,36	2,4	2,475	2,53	2,57
σ (%)	6,96	6,54	6,25	5,64	5	4,3	3,56	2,79	2,16	1,94
$t_p, \text{мс}$	5,5	5,2	5,02	4,75	4,47	4,21	3,96	3,66	3,35	2,57

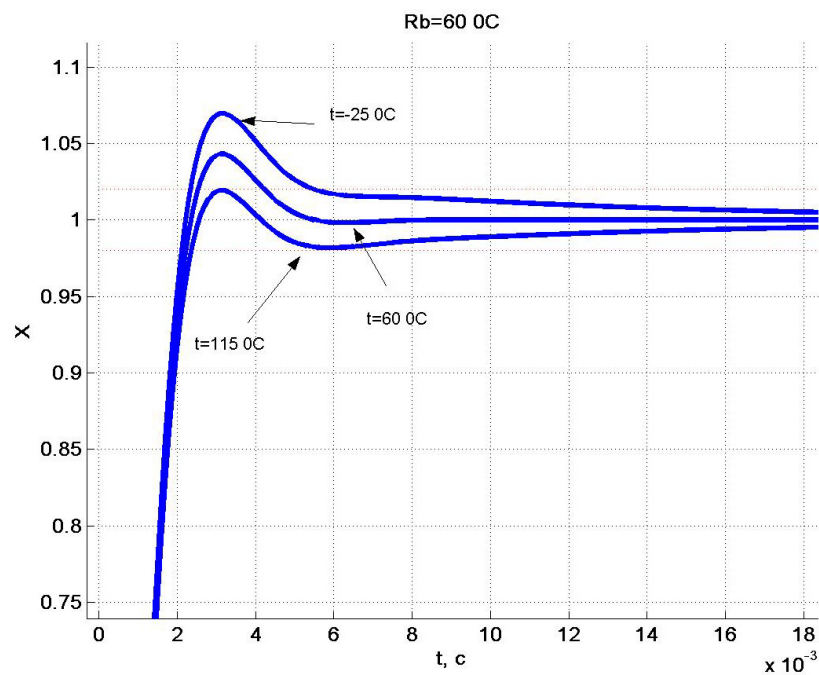


Рисунок 3.4 – Перехідні процеси у контурі струму з базовим значенням активного опору статора при 60⁰C

На рис. 3.5 представлені залежності зміни часу першого узгодження в залежності від температури.

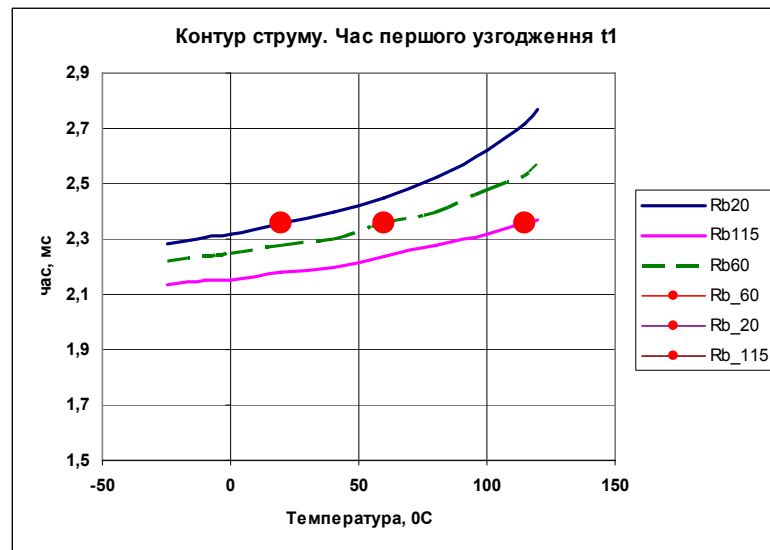


Рисунок 3.5 – Зміна часу першого узгодження t_1

На рис. 3.6 представлені залежності зміни часу першого регулювання в залежності від температури.

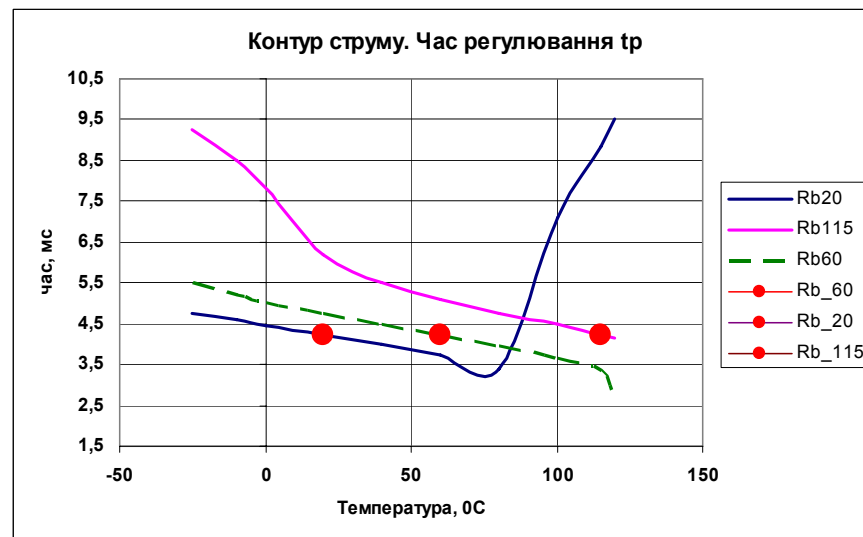


Рисунок 3.6 – Зміна часу першого узгодження t_p

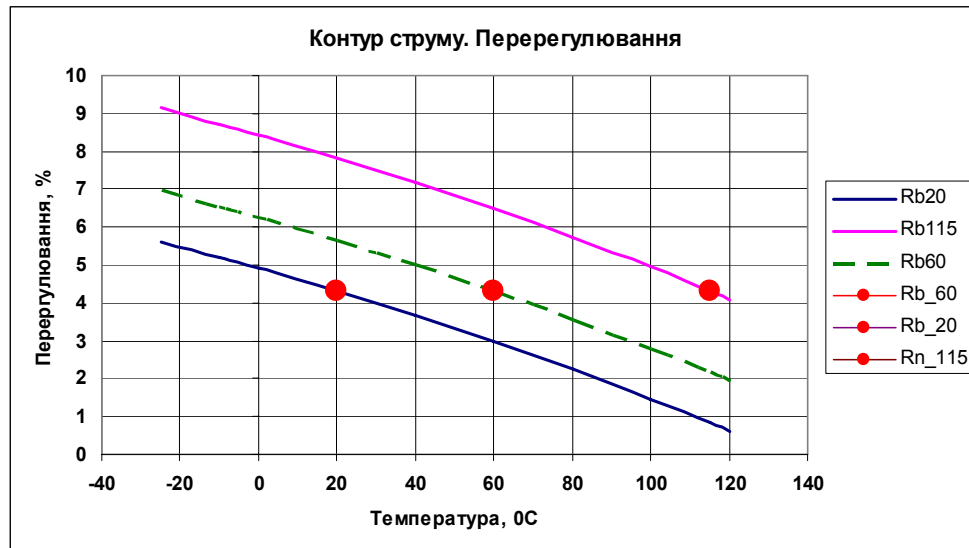


Рисунок 3.7 – Зміна перерегулювання σ (%)

Проведемо аналіз отриманих результатів. На графіках жирними точками виділені показники, які ми отримуємо при налаштуванні на модульний оптимум контуру струму – перерегулювання $\sigma = 4,3$ %, час першого узгодження $t_l = 4,7T\mu$ ($t_l = 2,35$ мс), час регулювання $t_l = 8,42T\mu$ ($t_p = 4,21$ мс).

Базова температура 20°C . З ростом температури час першого узгодження зростає, перерегулювання зменшується. Перехідний процес починає наближатись до аперіодичного. При високих температурах зростає коливальність, тому час регулювання дещо зростає (див. рис. 3.2). Робота системи з показниками зліва від базової точки маловірогідна і можлива тільки взимку. Причому з збільшенням інтенсивності роботи та робочого часу, навіть взимку робоча точка буде зміщатися праворуч.

Базова температура 115°C . Така температура є максимально припустимою для роботи двигуна і усталена робота в цій точці буде при попередній багаточасовій усталеній роботі. Кранові електроприводи не працюють в такому режимі. Із зменшенням температури починає зростати перерегулювання, зростає час регулювання і дещо зменшується час першого узгодження.

Базова температура 60°C . Це найбільш вірогідна робоча температура за будь-яких умов. В порівнянні з іншими температурами робоча точка знаходиться в середині діапазону. Зміна в будь-яку сторону не призведе до

значних змін показників. Робочі точки будуть максимально наближені до оптимальної при 60°C .

Висновок. Для налаштувань контуру струму в реальних умовах доцільним є використовувати значення опорів, отриманих при температурі 60°C . Таким чином, при зміні опорів статора двигуна в наслідок зміни температури робоча точка буде знаходитись максимально близько к оптимальній як уразі нагрівання так і охолодження.

Контур регулювання потокозчеплення. Електропривод переміщення візка крану не працює із швидкостями вище номінальної, тобто у другій зоні. Тому задачею контуру регулювання потокозчеплення є стабілізація потокозчеплення на номінальному рівні. В становлення потокозчеплення відбувається тільки один раз при запуску. При налаштуванні із значеннями опорів при температурі 60°C зміна опорів незначно впливає на час встановлення потокозчеплення - $\pm 10\%$. Тобто при оптимальних налаштуваннях час встановлення потоку становить 0,1с. При збільшенні температури час зменшується до 0,09 с, а при зменшенні – збільшується до 0,11с. Це пов'язано з тим, що при зменшенні температури опір зменшується, а стала часу ротора T_r збільшується (табл. 3.1 та табл. 2.3). Можна сказати, що зміна опорів в разі зміни температури ніяк не впливає на роботу контуру потокозчеплення.

Контур регулювання швидкості. Як показують віще наведені графіки (рис. 3.2-3.4) всі зміни у перехідних процесах за струмом, пов'язані із зміною опорів, відбуваються на протязі часу $10 T_{\mu}$, що при значенні малої некомпенсованої сталої часу $T_{\mu} = 0,0005$ с становить 5мс. Дали струм підтримується на заданому рівні. Під час пуску контур струму підтримує струм на рівні струмообмеження з кратністю $(2-2,5)I_N$. Розрахунковий час розгону для електропривода переміщення порожнього візка становить 0,23 с, а повного – 2,68 с. Фактично всі зміни відбуваються за дуже малий час в порівнянні з часом

розгону. Система з ПИ регуляторами підтримує величини на заданому рівні. Тому вплив пов'язаний із зміною опорів фактично ніяк не відчувається.

3.2 Дослідження впливу зміни зведеного моменту інерції

Для розгляду впливу зведеного моменту інерції та визначення оптимального значення для налаштування розглянемо контурний коефіцієнт підсилення. Під контурним коефіцієнтом K_u будемо розуміти добуток всіх коефіцієнтів підсилення передатних ланок контуру швидкості.

$$K_u = \frac{J_R K_T 8T_\mu}{48T_\mu^2 Z_p K_r K_c} \times \frac{1}{K_T} \times \frac{3}{2} Z_p K_r \times \frac{1}{J_{pr}} K_c = \frac{1}{4T_\mu} \frac{J_R}{J_{pr}},$$

де J_R – момент інерції при якому оптимізований регулятор;

J_{pr} – дійсний зведений момент інерції.

Як можна побачити з отриманого виразу, величина контурного коефіцієнта залежить від співвідношення J_R та J_{pr} . Проведемо аналіз даного співвідношення. Якщо J_R буде прийнятий як максимальний можливий в системі зведений момент інерції і на нього буде налаштований регулятор, то при зменшенні реального моменту інерції J_{pr} відбуватиметься зростання контурного коефіцієнту і система втратить стійкість. Почнуться незгасаючі коливання. І навпаки, якщо регулятор оптимізувати при найменшому значенні J_R то при зростанні J_{pr} контурний коефіцієнт буде зменшуватися і система втрачатиме швидкодію. Таким чином стоїть задача визначити співвідношення J_R / J_{pr} при якому система ще залишиться стійкої з одного боку, але не сильно втратить в швидкодії з іншого боку.

За даними досліджень було побудовано графік залежності K_u від відносного значення завдання на швидкість (рис. 3.8). З графіку видно, що мінімальне значення K_u дорівнює 1,25. Це означає, що якщо в регуляторі буде використане значення J_R , яке у 1,25 рази більше за найменший зведений

момент інерції, то при переміщенні порожнього візка виникнуть незгасаючі коливання швидкості.

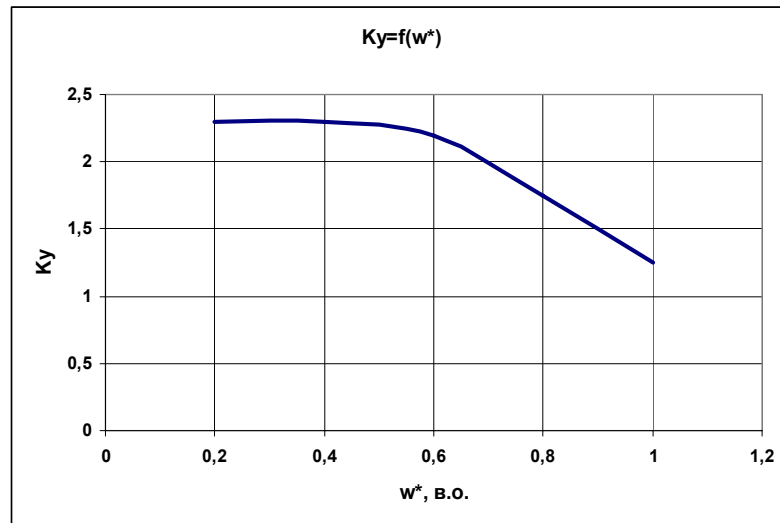


Рисунок 3.8 – Залежність контурного коефіцієнта підсилення K_y від відносного значення завдання швидкості ω^* .

Тому, якщо не використовувати адаптації регулятора швидкості до зміни моменту інерції, краще налаштовувати регулятор швидкості із мінімальним значенням зведеного до валу двигуна моменту інерції (див. розділ 2).

Адаптацію регулятора швидкості електроприводу візка у крані можна зробити за допомогою датчика ваги, встановленому на механізмі підйому. Кожного разу перед запуском візка інформація про вагу вантажу заноситься до перетворювача частоти, де здійснюється перерахунок коефіцієнтів регулятора з урахуванням нового значення моменту інерції, яке залежить від маси вантажу. Таким чином регулятор буде завжди оптимально налаштований, а система не втратить швидкодію.

4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТОВУВАННЯ

Вступ

В дипломній роботі проведено дослідження впливу зміни параметрів частотно-керованого електроприводу на якість його роботи. Дослідження проводились на прикладі електроприводу переміщення візка мостового крану.

Метою даного розрахунку є порівняння економічної ефективності впровадження частотно-керованого електроприводу переміщення візка мостового крану та стандартного електроприводу на базі релейно-контакторної схеми керування (РКСК). Варіант з частотним електроприводом прийнято як проектний. Частотно-керований електропривод є сучасною тенденцією і забезпечує енергоефективну роботу електроприводу переміщення візка.

Для визначення економічної ефективності необхідно розглянути наступні питання:

- розрахунок капітальних витрат на придбання та монтаж обладнання;
- розрахунок річних експлуатаційних витрат на утримання та обслуговування об'єкту проектування;
- визначення річної економії від впровадження об'єкта проектування;
- визначення та наліз показників економічної ефективності;
- зробити висновки щодо доцільності впровадження об'єкту проектування.

4.1 Розрахунок капітальних витрат

Капітальні вкладення – це грошові кошти, призначені для створення і придбання основних фондів і нематеріальних активів, що підлягають амортизації.

Капітальні витрати на здійснення проектного рішення визначаються:

$$K_{\text{пр}} = K_{\text{об}} (\sum C_i) + K_{\text{тр}} + K_{\text{мн}} + K_{\text{пр}}$$

де $K_{\text{об}}$ – вартість придбаного устаткування, грн;

$K_{\text{тр}}$ – транспортно-заготівельні та складські витрати, грн;

$K_{\text{мн}}$ – витрати на монтаж і наладку устаткування, грн;

K_{np} – інші одноразові вкладення грошових коштів.

Перелік обладнання та його вартість для проектного та базового варіантів наведена в табл. 4.1 та табл. 4.2. Всі ціни наведено з урахуванням ПДВ. Ціни прийнято на базі цін фірм, що продають профільне електрообладнання на території України.

Таблиця 4.1

Проектний варіант – Електропривод з ПЧ

№ з/п	Найменування технічних засобів	Кількість	Ціна за одиницю	Сума, грн
1	Двигун асинхронний 4A160S6Y3	1	9790	9790
2	Перетворювач частоти ATV320D11N4	1	19786	18786
3	Шафа 800*600*300	1	8050,2	8050,0
4	Вимикач автоматичний iK60N, 20A, крива B	1	318	318,0
5	Резистор гальмівний	1	2346,00	2346,0
6	Гальма ТКГ-200	1	2408	2408,0
	Всього			41698,0

Транспортування придбаного устаткування здійснюється транспортом постачальника електрообладнання до складу замовника і складає 4000,00 грн у обох випадках.

Витрати на монтажні (Z_m) і налагоджувальні роботи (Z_n) можна визначити наступним чином:

$$Z_{m(n)} = \sum (C_i * a_i * t_i) * K_d * K_{cm} * K_{np} -$$

де $C_i = 2$ чол.– чисельність працівників 4-го розряду необхідних для виконання певного обсягу монтажних (налагоджувальних) робіт;

$a_i = 48,7$ грн– годинна тарифна ставка працівника 4-го розряду;

$t_i =$ час необхідний для виконання певного обсягу монтажних (налагоджувальних) робіт, за проектним варіантом – 40 годин, за базовим варіантом – 60 годин;

$K_d = 1,15$ – коефіцієнт що враховує розмір доплат;

$K_{см} = 1,22$ – коефіцієнт що враховує єдиний соціальний внесок;

$K_{пр} = 1,05$ – коефіцієнт що враховує інші витрати на здійснення монтажних (налагоджувальних) робіт.

Проектний варіант:

$$З_{м(н)П} = 2 \times 40 \times 48,7 \times 1,15 \times 1,22 \times 1,05 = 5739 \text{ грн}$$

Зведемо капітальні витрати у табл. 4.3

Таблиця 4.3

Зведення капітальних витрат

№ п/п	Найменування витрат	Вартість, грн
Проектний варіант		
1	Вартість обладнання	41698,0
2	Вартість транспортування	4000,0
3	Вартість на монтажу і налагодження	5739,0
4	Загальна сума	51437,0

4.2 Розрахунок експлуатаційних витрат

До основних статей експлуатаційних витрат по електротехнічному обладнанню відносяться :

- амортизаційні (Ca);
- заробітна платня обслуговуючого персоналу (Cз);
- відчислення на соціальні заходи від заробітної платні (Cс);
- витрати на технічне обслуговування и текучий ремонт обладнання и мереж (Cт);
- вартість електроенергії, спожитою об'єктом проектування (Cэ).

Таким чином, річні експлуатаційні витрати складуть:

$$C = Ca + Cz + Cs + Ct + Cэ, \text{ грн.}$$

Так як в процесі упровадження проектного варіанта не планується міняти чисельність обслуговуючого персоналу, то розрахунки річного фонду заробітної платні и відрахування на соціальні заходи не проводяться.

$$C = Ca + Ct + Cэ, \text{ грн.}$$

Розрахунок експлуатаційних витрат проводиться по проектному и базовому варіантам паралельно.

4.2.1 Розрахунок амортизаційних відрахувань.

Річний фонд амортизаційних відчислень визначається в процентах от суми капітальних витрат по видам основних фондів и нематеріальних активів по розділам зведення капітальних витрат.

Обладнання, що встановлюється відноситься до 4 групи основних фондів – машини та обладнання з мінімальним строком експлуатації 5 років. Процент амортизаційних відчислень визначаємо прямолінійним методом – пропорційним розділенням суми витрат на весь строк служби.:

$$Ha = \frac{\Phi n - Л}{\Phi n Tn} \times 100\% = \frac{1}{Tn} \times 100\% = \frac{1}{5} \times 100\% = 20\%,$$

де Φn – первісна вартість об'єкта основних засобів,

Л- розрахункова ліквідаційна вартість основних засобів.

Оскільки варіант розглядається для впровадження, ліквідаційна вартість основних засобів дорівнює 0,0 грн.

Результати розрахунку зведено до табл. 4.4.

Таблиця 4.4

Амортизаційні відрахування

№	Назва	Капітальні витрати, грн	Норма амортизації, %	Сума амортизації, грн
1.	Проектний варіант	51437,00	20	10287,40
2.	Базовий	47004,00	20	9400,80

4.2.2 Розрахунок вартості спожитої електроенергії

В даному розділі розраховуємо спожиту електроенергію об'єктом проектування і для порівняння об'єктом за базовим варіантом.

Кількість спожитої за рік електроенергії в розраховуємо по формулі:

$$W_{\Gamma} = (N_{y}/\text{ККД}) \times \Phi_{p}$$

N_{y} – установлена потужність устаткування;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

Φ_{p} – річний фонд робочого часу.

Загальний річний фонд робочого часу визначимо по формулі:

$$\Phi_r = (D_k - D_{пр} - D_v) \times T_{см}, \text{ год.},$$

$$\Phi_r = (365 - 104 - 11) \times 8 = 2000 \text{ (год)}$$

де D_k – кількість календарних днів в році;

$D_{пр}$ – кількість святкових днів в році, 11 днів у 2019 р;

D_v – кількість вихідних днів, 104 дні;

$T_{см}$ – номінальний час роботи за рік, 8 год/зміна.

Середньо річна тривалість робочого часу електропривода кранів режимних груп 3М-4М за даними [8] складає 1000 годин з 2000 годин загально річного фонду робочого часу ($\Phi_p = 1000$ год.).

При чому коефіцієнт корисної дії ККД для електроприводу з перетворювачем частоти складає 0,92, а з РКСК – 0,65.

Кількість споживаної зарік електроенергії в проектному варіанті

$$W_{гп} = 11 / 0,92 \times 1000 = 11956,52 \text{ (кВт}\cdot\text{г)}$$

Кількість спожитої за рік електроенергії в базовому варіанті;

$$W_{гб} = 11 / 0,65 \times 1000 = 16923,07 \text{ (кВт}\cdot\text{г)}$$

Вартість електроенергії, спожитої об'єктом на протязі року, визначається за наступною формулою:

$$C_{э} = W_{г} \times Ц_{э},$$

де $Ц_{э}$ - тариф 1 кВт×год електроенергії для споживача I-го класу, за даними «Дніпрообленерго» станом на 01.12.2018 р становить 1,965 грн;

$W_{г}$ – кількість спожитої електроенергії, кВт×год.

Вартість електроенергії, що споживається об'єктом проектування на протязі року:

$$C_{эп} = 11956,52 \times 1,965 = 23494,56 \text{ (грн.)}$$

Вартість електроенергії, що спожита на протязі року в базовому варіанті:

$$C_{эб} = 16923,07 \times 1,965 = 33253,83 \text{ (грн.)}$$

Результати розрахунку зведено до табл. 4.5.

Витрати за спожити електроенергію

№	Назва	Потужність електрообладнання, кВт	Спожита електроенергія, кВт·ч	Вартість спожитої електроенергії, грн
1.	Проектний варіант	11	11956,52	23494,56
2.	Базовий	11	16923,07	33253,83

4.2.3 Витрати на технічне обслуговування и текучий ремонт

Річні витрати на технічне ремонт обслуговування и текучий ремонт електротехнічного обладнання включають витрати на матеріали, запасні частини, заробітну плату ремонтним робочим и т.д. Обчислюються по формулі:

$$C_T = \sum_{i=1}^n \left(h_i \cdot t_{1i} \cdot m_i \cdot R_{\Sigma i} + \frac{S_i \cdot \Pi_i}{T_i} \cdot T_{\Phi} \right),$$

Де n – число приборів, які належать ремонту;

- $h = 6,5$ грн/год, – годинна тарифна ставка робочих, які роблять ремонт;
- t_1 – трудомісткість одного ремонту при категорії складності ремонту в одну ремонтну одиницю в залежності від виду ремонту, г/ед;
- m – число ремонтів в рік;
- $R_{\Sigma} = 2,5$ – сумарна категорія складності ремонту в залежності від виду електрообладнання;
- S – вартість однотипних змінних елементів, грн;
- Π – кількість однотипних змінних елементів;
- T – середній строк служби деталей даного типа, ч;
- $T_{\Phi} = 1000$ год, – число годин роботи електрообладнання в році.

Результати розрахунку зведено до табл. 4.6.

Таблиця 4.6

Витрати на технічний ремонт

	h	t1	m	R _Σ	S1	П1	T1	S2	П2	T2	Tф	Ст1	Ст2	Ст
Проект-ний	6,5	1,2	1	2,5	950	3	2000	4	50	2000	1000	1444,5	119,5	1564
Базовий	6,5	8	2	2,5	1015	2	500	2	93	500	1000	4320	632	4952

Таким чином річні експлуатаційні витрати для
проектного варіанта:

$$C_{пр} = 10287,40 + 23494,56 + 1564 = 35345,96 \text{ грн.}$$

базового варіанта:

$$C_{б} = 9400,80 + 33253,83 + 4952 = 47606,63 \text{ грн.}$$

Повна річна економія від упровадження об'єкту проектування
визначається за формулою:

$$E_{кр} = C_{б} - C_{пр}$$

$$E_{кр} = 42064,33 - 31430,28 = 12260,67 \text{ (грн)}$$

4.3 Оцінка економічної ефективності проекту

1. Коефіцієнт ефективності (прибутковості) капітальних витрат E_p показує, скільки гривень додаткового прибутку приносить одна гривна капітальних витрат:

$$E_p = E_{кр} / K_{пр}$$

$$E_p = 12260,67 / 51437,0 = 0,238$$

2. Термін окупності капітальних витрат $T_{ок}$ показує, за скільки років вони окупляться за рахунок загального прибутку від упровадження проектного варіанту:

$$T_{ок} = K_{пр} / E_{кр}$$

$$T_{ок} = 51437,0 / 12260,67 = 4,2 \text{ (років)}$$

В проектному варіанті термін окупності перебільшує 5 років, що не задовольняє встановленим вимогам. Зведемо результати до таблиці 4.7.

Таблиця 4.7

Оцінка техніко-економічних показників

№	Найменування показників	Од. вимірюв.	Проектний варіант	Базовий варіант	Зміна
1	Капітальні витрати	грн.	51437,0	47004,00	
2	Експлуатаційні витрати: - амортизаційні відрахування - технічне обслуговування і поточний ремонт - вартість спожитої електроенергії	грн.			
		грн.	10287,40	9400,80	
		грн.	1564	4952	
		грн.	23494,56	33253,83	
3	Річна економія	грн.	12260,67		
4	Розрахунковий коеф. ефективності	част. од.	0,238		
5	Розрахунковий термін окупності капітальних вкладень	років	4,2		
6	Економія електроенергії	кВт-ч	11956,52	16923,07	- 4966,55

Висновки

За результатами розрахунків впровадження проектного варіанту є більш доцільним ніж базового, тому що не зважаючи на незначно більші капітальні вкладення, рівень експлуатаційних витрат значно менший. У результаті термін окупності проекту складає 4,2 роки, що менше, припустимого терміну, для даного класу обладнання.

ВИСНОВКИ

1. Надано загальну характеристику електромеханічних систем, визначені критерії якості, що застосовуються в електромеханічних системах.
2. Проаналізовано фактори, що впливають на зміну параметрів електроприводів з векторними системами керування. Намічені шляхи досліджень.
3. Розраховано та синтезовано систему векторного керування електроприводом візка мостового крану. Визначені межі зміни параметрів електропривода, а саме: активних опорів статора та ротора та зведеного до валу двигуна моменту інерції.
4. Методами математичного моделювання проведено дослідження впливу зміни параметрів електропривода на якість роботи запропонованої системи керування електроприводом, отримані залежності.
5. В розділі «Техніко-економічне обґрунтування» проведено розрахунок капітальних та експлуатаційних витрат, визначений термін окупності при впровадженні запропонованої системи електропривода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ИСО4301/1-86. Краны и подъемные устройства. Общие положения – М.: Издательство стандартов, 1987. - 9 с.
2. Яуре А.Г., Певзнер Е.М. Крановый электропривод: Справочник. - М.: Энергоатомиздат, 1988. – 344 с.
3. Соколов М.М. Автоматизированный электропривод общепромышленных механизмов. Изд. 3-е, переработ. и доп., М., «Энергия», 1976. – 488 с.
4. Колб Ант. А, Колб А. А. Теорія електроприводу: Навчальний посібник. – Д., Національний гірничий університет, 2006. – 511 с.
5. Справочник по электрическим машинам: В 2 т./ Под общ. ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова. Т. 1. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.: ил.
6. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
7. Справочник по автоматизированному электроприводу / Под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. -616 с.
8. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. Изд. 6-е, исправленное. М.: «Энергия», 1977. – 432 с.
9. Ковач К.П., Рац И. переходные процессы в машинах переменного тока. – М.: Госэнергоиздат, 1983
10. Асинхронные электроприводы с векторным управлением. / В.В. Рудаков, И.М.Столяров, В.А. Дартау. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отделение, 1987. – 136 с.
11. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока свентильными преобразователями / О.В. Слежановский, Л. Х. Дацковский, Л. М. Тарасенко, И. С. Кузнецов, Е.Д. Лебедев – М.: Энергоатомиздат, 1983.
12. www.schneider-electric.ua ALTIVAR 71 Преобразователи частоты. Каталог 2011 г.