

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

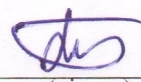
Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра автоматики

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри


(підпис)

I. С. Білюк

« 15 » 06 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня бакалавра

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

освітня програма Електротехніка та електротехнології
(назва освітньої програми)

на тему: «Модернізація електропривода хвильового підйомника»

Виконав: студент IV курсу, групи 4317ст3

Червинський Дмитро Євгенійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник доц. каф. автоматики, к.т.н.,
доц. Надточій А.В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Нормоконтроль ст. викл. каф. автоматики
Савченко О.В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Рецензент доц. каф. СЕЕС, к.т.н.,
Ставинський Р.А.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Засвідчую, що у цій кваліфікаційній
роботі немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент


(підпис)

м. Миколаїв – 2026 року

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Інститут, факультет Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки
Кафедра автоматики
Освітній ступінь бакалавр
Галузь знань 14 «Електрична інженерія»
(шифр і назва)
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(шифр і назва)
Освітня програма «Електротехніка та електротехнології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант освітньої програми

Васильєв О.Г. Васильєв
«15» 06 2026 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА СТУДЕНТУ

Червинському Дмитру Євгенійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Модернізація електропривода хвильового підйомника»

керівник роботи Надточій Анатолій Вікторович, кандидат технічних наук,
доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від «22» квітня 2026 року
№ 286-УЧ.

2. Строк подання студентом роботи 15 червня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: асинхронний двигун для вибирання канату 3 кВт;
кратність пускового струму – 6; момент інерції – 0.017 кг/м²; експоненційний
перехідний процес.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно
розробити): 1 Стан питання та постановка задачі дослідження;

2 Розробка структурної схеми;

3 Розрахунок та моделювання векторної системи керування;

4 Охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

1 Вихідна схема електропривода;

2 Структурна схема розробленого електропривода;

3 Структурна схема спостерігача стану;

4 Розрахункова схема;

5 Результати обчислень.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 03 лютого 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Стан питання та постановка задачі дослідження.	01.03.26	
2	Розробка структурної схеми.	01.04.26	
3	Розрахунок та моделювання векторної системи керування.	01.05.26	
4	Охорона праці	01.06.26	

Студент

(підпис)

Червинський Д.Є.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Надточій А.В.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: 75с., 4 р., 20 рис., 2 табл., 1 дод., 23 джерела.

Ключові слова: асинхронний електропривод, хвильовий підйомник, векторна система керування, бездатчиковий електропривод, спостерігач стану, динамічні характеристики, показники якості керування.

Об'єкт дослідження – асинхронний електропривод хвильового підйомника.

Мета роботи – поліпшити динамічні характеристики хвильового підйомника за рахунок застосування бездатчикового асинхронного електропривода з векторною системою керування.

Перший розділ присвячений аналізу електропривода хвильового підйомника, визначені шляхи його поліпшення і згідно цього зроблена постановка задачі дослідження.

У другому розділі розробляється структурна схема бездатчикового асинхронного електропривода зі спостерігачами стану.

Параметричний синтез системи керування швидкістю асинхронного електропривода представлений у третьому розділі. Для забезпечення високих показників системи керування швидкістю асинхронного електропривода вибраний асинхронний електропривод з векторною системою керування.

У четвертому розділі розглянути питання з охорони праці.

Додатки містять слайди мультимедійної презентації (додаток А).

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	7
1.1 Стисла характеристика хвильових підйомників.....	7
1.2 Принципові схеми електроприводів хвильового підйомника.....	10
1.3 Шляхи поліпшення динамічних характеристик електропривода.....	15
1.4 Постановка задачі.....	16
2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ.....	17
2.1 Загальні відомості про бездатчикові асинхронні приводи і основні проблеми, зв'язані з побудовою бездатчикового векторного електропривода.....	17
2.2 Структурна схема системи адаптивно-векторного керування асинхронним електроприводом.....	19
2.3 Синтез системи керування.....	20
2.4 Розрахунок елементів структурної схеми.....	27
2.5 Розрахунок структурної схеми у відносних одиницях.....	34
3 РОЗРАХУНОК ТА МОДЕЛЮВАННЯ ВЕКТОРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	36
3.1 Вибір двигуна.....	36
3.2 Розрахунок параметрів для моделювання системи.....	40
3.3 Аналіз чутливості електроприводу до зміни параметрів двигуна і затримок перемикання інвертора.....	45
3.4 Побудова перехідних процесів системи	50
3.4.1 Режим «Пуск».....	50
3.4.2 Режим зміни сигналу завдання швидкості.....	51
3.4.3 Режим «Перевантаження».....	52
4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	53
4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих факторів	54

4.2 Розрахунок загального освітлення.....	60
4.3 Заходи безпеки та охорони праці.....	63
ВИСНОВКИ.....	66
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	68
ДОДАТОК А Мультимедійна презентація.....	71

ВСТУП

Системи підтримки натягнення канату на суднах застосовуються в багатьох електроприводах. Це тралові лебідки, хвильові підйомники, крани та т.і.. Проте виконавчий двигун в них, як правило постійного струму завдяки хорошим його механічним характеристикам. Як правило, механічна частина на такому обладнанні знаходиться в задовільному стані, а електроніка, електроавтоматика і привід потребують реконструкції та капітального ремонту.

Модернізація цих електроприводів неминуча з причин нових вимог, що пред'являються до сучасного суднового обладнання. Збільшення точності, підвищення продуктивності, необхідність повністю автоматизувати відповідний робочий процес – без виконання цих умов надзвичайно важко витримати жорстку конкуренцію. Застарілі системи знижують продуктивність, вимагають періодичного кваліфікованого ремонту та технічного обслуговування. Крім того, виникає проблема інтеграції перелікованих систем в сучасні автоматизовані системи управління на суднах. До того ж векторна система керування асинхронними двигунами дозволяє наблизити механічні характеристики до механічних характеристик двигунів постійного струму.

Важливо і те, що релейно – контактна апаратура керування електроавтоматикою на суднах за сучасними вимогами вкрай ненадійна і не забезпечує повної реалізації можливостей механічної частини механізмів підтримки натягнення канатів.

Тому метою дослідження є відпрацювання загальних положень щодо удосконалення систем керування електроприводів з керуванням натягненням на основі бездатчикового комплектного електропривода з векторною системою керування.

1 СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Стисла характеристика хвильових підйомників

На судах експлуатується велика кількість різних вантажопідйомних механізмів спеціального призначення. Вантажопідйомні механізми для роботи на хвилюванні можуть бути розділені на дві основні групи:

1) механізми, призначені безпосередньо для підйому вантажу (шлюпок, моноблоків та ін.) з хвилі;

2) механізми, призначені для перевантаження між судами на хвилюванні. Механізми першої групи в основному встановлюються на судах рибпромислового флоту для виконання певних вимог.

Механізми або проєктуються спеціальної конструкції, або використовуються вантажні лебідки загального призначення по ДОСТ 12617 - 78 з підвищеними швидкостями.

Механізми другої групи завжди містять спеціальні пристрої, що забезпечують безпечну роботу з вантажами. Реальне хвилювання на морі є досить складний процес, який для практичних розрахунків може бути замінений гармонійним коливальним рухом. При цьому за огинаючу профілю хвилі основної частоти приймається трохоїда з довжиною хвилі L і висотою h . Час, необхідний для умовного проходження гребнем хвилі відстані, рівного довжині хвилі, називається періодом хвилі T_v .

Механізмами першої групи, так званими хвильовими підйомниками, обладнають в основному промислові судна. Особливістю їх роботи є те, що при виконанні операцій з підйому судна накат хвилі швидко піднімає його і викликає ослаблення вантажного тросу. Якщо ця слабина не буде негайно обрана, то при спаді хвилі виникне сильний ривок, здатний обірвати трос. Щоб уникнути зазначеної аварійної ситуації вантажний трос повинен бути постійно натягнутим. Виконання цієї вимоги може бути забезпечено двома способами:

1) використання електроприводу з одним двигуном, який забезпечує швидкість на початку підйому ($0,25+0,35$ м/с) і зростаючий до ($1,5+2$ м/с) під час підйому

судна на хвилю. Таким чином, двигун повинен мати діапазон регулювання швидкості (1: 6 - 1:8), що доцільно лише при не великій масі підняття судна (до 5 т);

2) використання спеціального механізму і електроприводу з двома двигунами: тяговим ТД і швидкісним ШД. ТД призводить в рух робочий барабан, ШД - швидкісний барабан.

На робочий барабан намотаний вантажний трос, який утримує блок гака і другим кінцем закріплений на швидкісному барабані. Швидкісний барабан має два діаметра. На барабан великого діаметру намотується вантажний трос, на барабан меншого діаметра - допоміжний трос з вільним кінцем. На швидкісному барабані розташований храповик із стопорною зачіпкою, яка на початку процесу підйому катера підтягується електромагнітом і звільняє швидкісний барабан. ТД при цьому загальмований, а ШД підтягує гак з блоком до верхнього обмеження. Вільний кінець допоміжного троса скидається на судно, призначене до підйому. Після цього катер, гойдаючись на хвилі, викликати роботу ШД і режимі проти вмикання. При цьому ШД, постійно вибираючи слабіну троса, почне одночасно піднімати і гак, який таким чином втримається на постійній висоті над розгойдується на хвилі катером. З початком підйому катера знеструмлюється електромагніт і крановий пристрій не дозволить швидкісного двигуну і барабану обертатися в напрямку витравлювання тросів. В цей час ТД вмикається для роботи на підйом. При накаті хвилі і швидкому піднятті катера ШД вибирає слабіну тросів. При спаданні хвилі храповик впирається в засувку, а ТД продовжує підйом катера. Після підйому катера на належну висоту ШД відключається. В даний час існує значна кількість і інших конструкцій спуску-підйомних пристроїв. Робота механізмів другої групи (для перевантаження між судами) можлива лише при помірній хитавиці. І оскільки рух вантажу щодо палуби сусіднього судна залежить від амплітуди вертикального переміщення суден, періоду їх орбітального руху, кута крену судна з краном і багато чого іншого, то стеження за цим рухом за допомогою електроприводу практично неможливо і тому для забезпечення нормальної роботи механізми постачають спеціальними компенсують пристроями пневматичного або гідравлічного типу. При цьому для механізмів перевантаження стає можливим застосування звичайних вантажних електроприводів з доповненням необхідної блокування. Судно на

хвилюванні відчуває поздовжню і поперечну качку, період і амплітуда якої залежать як від ступеня хвилювання, так і від конструктивних особливостей судів. Операції з перевантаження на хвилюванні виробляються лише при помірних параметрах качки. Сума вертикальних переміщень обох судів при цьому знаходиться в межах 2-5 м при періоді качки 6-12 с. Умовою безпечної посадки вантажу або його перевантаження при хитами суден є підтримання постійної відстані між місцем навантажування і вантажем при відключеному механізмі підйому. При такому складному русі вантажу щодо палуби сусіднього судна для підтримання сталості механізм доповнюється спеціальним компенсує пристроєм, оскільки забезпечити стеження за допомогою електроприводу практично неможливо. Введення зазначених пристроїв дозволяє застосовувати для розглянутих механізмів звичайні електроприводи, доповнені необхідними пристроями кінцевого захисту і блокуваннями, що виключають переміщення вантажу в небезпечній зоні при відсутності стеження.

Існує декілька способів надійної компенсації взаємного переміщення суден. Спільною особливістю цих способів є механічний (шарнірний або канатний) зв'язок між двома судами через кран, що виконує роль силового датчика автоматичного стеження. Стеження здійснюється завдяки тому, що підйомна лебідка розміщена на спеціальній рухомій платформі-противазі, яка зв'язується з сусіднім судном за допомогою канатів другої лебідки (лебідки стеження), розташованої на цій же платформі, і може переміщатися по вертикальних напрямних судна. За допомогою лебідки стеження платформа піднімається до необхідного положення, і в подальшому взаємному переміщенні суден передаються через неї на гак підйомного механізму. Загальним для цих пристроїв є те, що енергія, необхідна для забезпечення більших значень швидкостей і прискорень вантажу під час стеження за хвилею, надходить не від електроприводу, а безпосередньо від джерела збурень. Тому описані пристрої можуть бути використані практично для будь-яких вантажів. На практиці часто застосовуються перевантажувальні механізми, які служать для виконання більш простих операцій на хвилюванні, наприклад перевантаження вантажу з хитного судна на нерухому майданчик або навпаки. Такі механізми виконуються з більш простими пристроями. Як приклад можна привести систему

перевантаження на нерухому майданчик, в якій ударна посадка вантажу здійснюється завдяки швидкому спуску троса в момент торкання вантажем майданчика. У ряді випадків можуть бути використані способи, що застосовуються для механізмів підйому вантажу безпосередньо з води.

1.2 Принципові схеми електроприводів хвильового підйомника

Електроприводи для підйому вантажу з хвилі, побудовані за принципом забезпечення швидкості підйому повного вантажу, яка дорівнює середньому значенню швидкості хвилі, а також електроприводи механізмів, що здійснюють перевантаження між судами на хвилюванні, принципово не відрізняються від електроприводів вантажопідйомних механізмів загального призначення. Відповідно і схеми електроприводів зазначених механізмів відрізняються тільки введенням необхідних блокувальних вузлів, пов'язаних з технологічними особливостями їх роботи. Схема електроприводу для підйому вантажу з хвилі зі швидкісним двигуном наведена на малюнку 1.1. Лебідка, на якій встановлений розглянутий електропривод, призначена для спуску і підйому мотоботів. Як тягового застосовується двошвидкісний двигун з відношенням чисел пар полюсів (1: 3). Тяговий двигун потужністю 38 кВт забезпечує підйом мотобота з максимальною швидкістю 0,35 м / с. Як швидкісний застосований одношвидкісний двигун потужністю 4 кВт в режимі 60 хв, що забезпечує вибирання каната зі швидкістю 1,2 м / с. Управління тяговим двигуном здійснюється магнітним контролером, швидкісний двигун отримує живлення через пускач. Все керування електроприводом здійснюється одним командоконтролером.

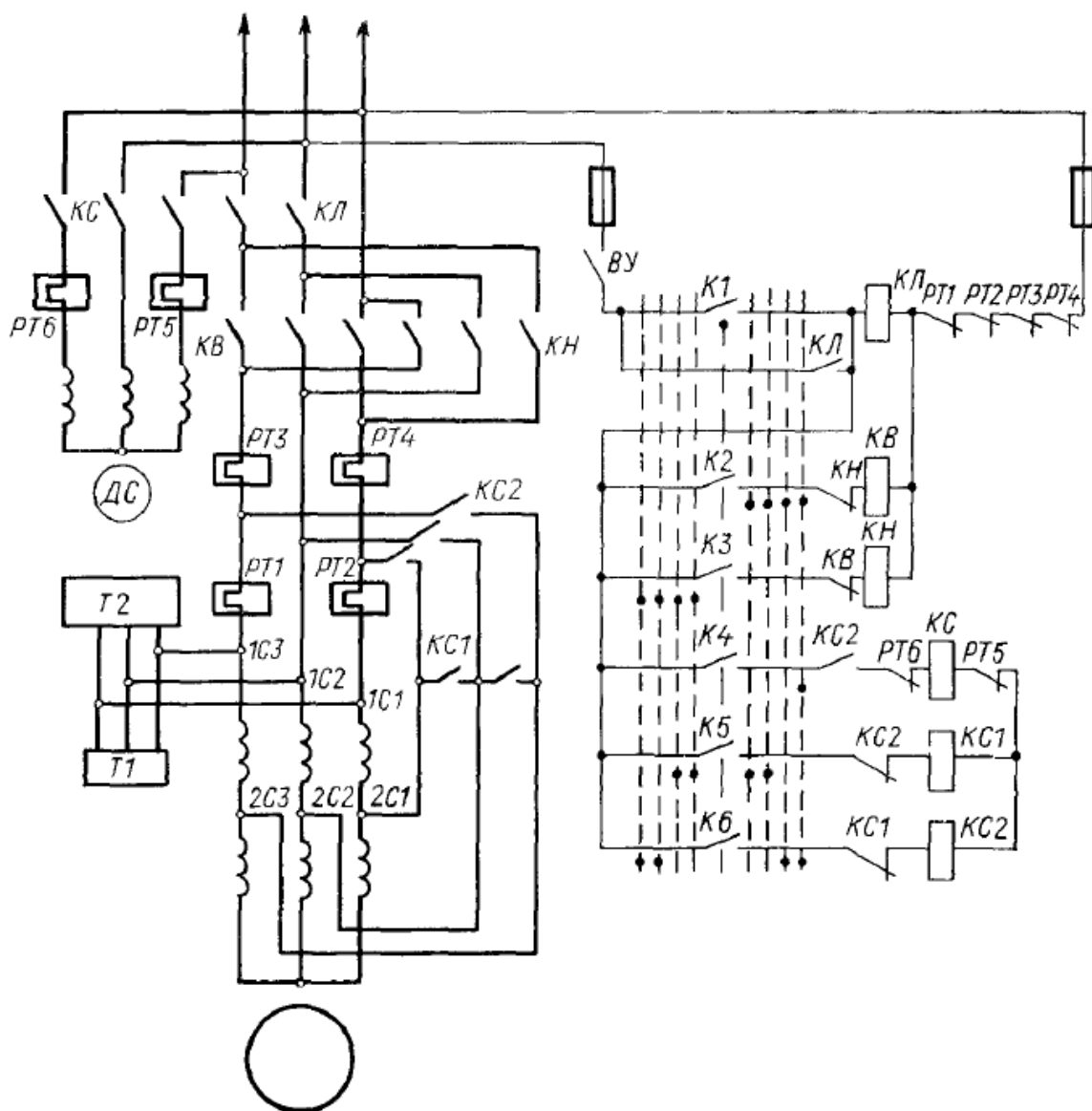


Рисунок 1.1– Схема електроприводу змінного струму механізму підйому вантажу з хвилі з швидкісним двигуном.

На рис. 1.1 наведено 1С1-1С3, 2С1-2С3 – контакти тихохідної і швидкохідної обмоток основного двигуна; ДС – швидкісний двигун; Т1, Т2 – гальмові електромагніти; КЛ, КВ, КН – контактори лінійні і напрямку; КС – контактор

швидкісного двигуна; КС1, КС2 – контактори швидкісного основного двигуна; РТ1-РТ6 – захисні теплові реле; ВУ – вимикач; К1-К6 – контакти командо контролера .

Для підйому вантажу з хвилі можуть застосовуватися вантажопідйомні механізми загального призначення, що мають необхідні швидкісні параметри. Практично ці механізми мають вантажопідйомність 3,2 або 5 т відповідно при швидкостях підйому близько (2 і 1,5 м/с). Випускаються також вантажопідйомні механізми в дводвигуновому виконанні для забезпечення необхідних швидкостей. Конструктивно в таких механізмах два трьохшвидкісних двигуна працюють на один барабан через планетарний редуктор. Застосовуються двигуни типу МАП 622-6 / 12/24 або МАП 622-4/8-24. Лебідки зі швидкісним двигуном мають дві модифікації ЛЕШ1 вантажопідйомністю 7,5 т і ЛЕШ2 вантажопідйомністю 16 т. Швидкості підйому номінального вантажу лебідок складають (0,36 м/с), а максимальна швидкість вибирання троса (1,2 м/с). Як тягових використовуються двигуни МАП 521-4 /12 (38 кВт, 1380 об/хв в режимі 30 хв) і МАП 621-4/12 (65 кВт, 1410 об/хв в режимі 30 хв), а в якості швидкісних - двигуни МАП 211-6 (4 кВт, 900 об/хв в режимі 60 хв) і МАП 521-4 (22 кВт, 1470 об/хв в режимі 120 хв). Керування електроприводом з тяговим двигуном МАП 521-4 12 здійснюється від магнітного контролера БТ 53 і пускача ПММ 1211-1, а керування електроприводом з двигуном МАП 621-4 / 12 - від магнітного контролера ВТ 94А. З механізмів, призначених для перевантаження між судами на хвилюванні, в експлуатації знаходяться крани типів КЕ 37 і КЕ 34 з пневматичним стежить пристроєм. Крани мають по три механізми підйому, стежить устрою і повороту. Кран типу КЕ 37 виконаний з електроприводом постійного струму, причому на механізмі підйому і стежить устрою встановлений двигун ДПМ 31 (9,5 кВт, 1360 об / хв, ПВ - 25%), керований від магнітного контролера типу ВП 71, а на механізмі повороту - двигун ДПМ 22 (6 кВт, 1040 об / хв, ПВ - 25%) з контролером ВП 51. Механізм підйому крана типу КЕ 34 виконаний за системою Г-Д з двигуном ДПЧ 32 (22 кВт, 1150 об / хв в режимі 30 хв) і генератором П 81М (32 кВт) з управлінням від контролера ВП 71, а механізми стежить устрою і повороту - з двошвидкісними двигунами М П 521-4 / 12 (38 кВт,

1380 об / хв в режимі 30 хв) і МАП 421-6 / 12 (9,5 кВт, 920/485 об / хв, ПВ = 25% / 15%), керованими відповідно від контролерів БТ 73 і двох контролерів БТ 51.

Для управління трьохшвидкісним двигуном застосовується схема з приводом контакторів на змінному струмі, зображена на рисунку 1.2. Кола управління отримують живлення від мережі. Через випрямляч отримують живлення тільки реле часу і нульове. Для запобігання можливості розмикання контакторів швидкостей КМС і КБС в проміжних положеннях контакти командоконтроллера виконані пермикаючими. У схемі повністю автоматизовані розгін, гальмування і реверсування. Розгін двигуна при швидкому перекладі рукоятки командоконтроллера проводиться в три ступені, а гальмування - в дві. Реверс двигуна здійснюється тільки на малій швидкості з подальшим ступінчастим розгоном в протилежному напрямку обертання. Для електроприводів високопродуктивних механізмів, розрахованих на ступінчастий пуск і гальмування, надзвичайно небезпечні відмови реле, оскільки безступінчаті пуски можуть привести до перегріву двигуна. Тому для контролю в схемі передбачені блокувальні вузли, що складаються з груп контактів. В результаті будь-яка відмова призведе до припинення роботи електроприводу, причому схема виконана так, що приварювання контактів будь-якого апарату не перешкоджає зупинці електроприводу, але виключає рух в сторону, протилежну заданої. Недоліком схеми є подвоєне число включень контакторів проміжних швидкостей. Однак завдяки тому, що такі контактори випускаються на великі струми, що розглядається схема може бути виконана на будь-яку потужність і тому знаходить широке застосування.

Опис схеми електропривода з трьохшвидкісним двигуном і колом живлення змінного струму наведено на рис 1.2. АД – асинхронний двигун; 1С1-1С3, 2С1-2С3, 3С1-3С3 – контакти обмоток малої, середньої та великій швидкості відповідно; ДГТ – двигун гідро товкача гальма; РТ1-РТ5 – захисні теплові реле; РН – реле нульове з витримкою часу 0,3 с; РУ, РУВ, РУН, РП1, РП2 – реле прискорення, контролю реверса і гальмування з витримкою часу 0,5-1,5 с; В – випрямляч; ВУ – вимикач управління; АВ – автоматичний вимикач; ВКВ, ВНК – контакти кінцевих вимикачів; КОГ – контакти вимикача обмеження вантажопідйомності; К3-К14 – контакти командоконтроллера.

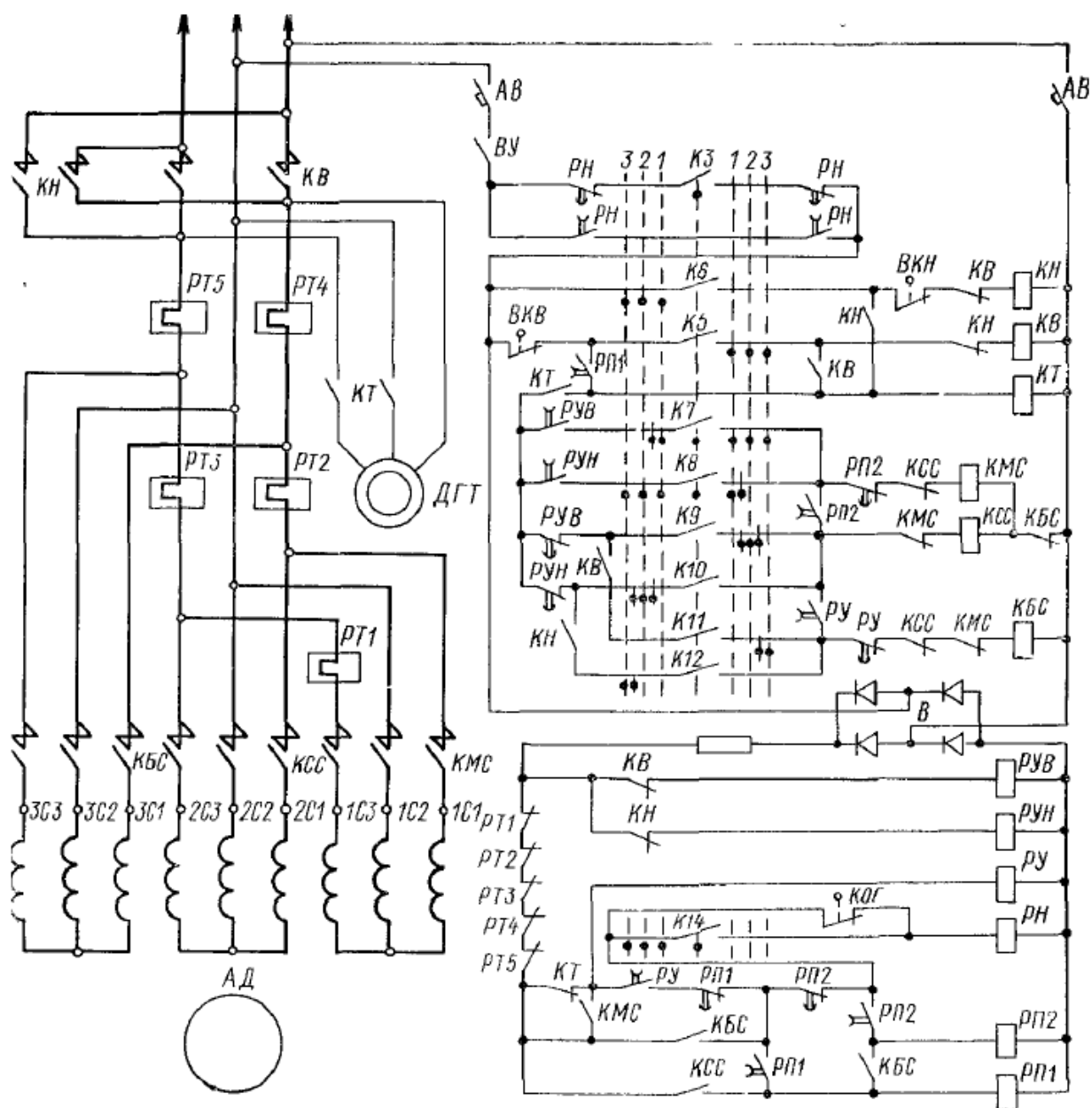


Рисунок 1.2 – Схема електропривода з трьохшвидкісним двигуном і колом живлення змінного струму.

1.3 Шляхи поліпшення динамічних характеристик електропривода

Пропонується заміна релейно-контактної групи на комплектний бездатчиковий електропривод з векторним керуванням, з метою зниження споживання електроенергії та підвищення показників якості керування.

Векторно-керовані асинхронні двигуни (АД) отримали широке розповсюдження в електромеханічних системах різних технологічних об'єктів з підвищеними вимогами до динамічних і статичних показників якості керування. Застосування принципу векторного керування асинхронним двигуном дозволяє створювати високодинамічні системи електроприводу широкого застосування з практично будь-яким потрібним діапазоном регулювання швидкості. Векторне керування призначене забезпечити закон частотного керування $\varphi_2 = \text{const}$, отож, потрібні статичні та динамічні властивості електроприводу шляхом використання розподільного регулювання механічними (момент, швидкість), і магнітними (магнітний потік або потокозчеплення) координатами.

Можна навести ряд аргументів, які підтверджують доцільність саме такого підходу до вирішення проблеми:

- прогрес електронної складової електроприводів за своїми темпами істотно перевершує прогрес механічної складової (так, якщо продуктивність обчислювальних систем і ємність запам'ятовуючих пристроїв виросли за останні 10 років в сотні разів, то розміри робочих зон, обороти двигунів і точність позиціонування осталися практично незмінними);
- заміна устаткування часто пов'язана зі значними додатковими капітальними вкладеннями, такими як демонтаж станини, демонтаж старих і монтаж нових гідравлічних, пневматичних і електричних комунікацій;
- сучасне машинобудівне підприємство має практично необмежені можливості з капітального ремонту і навіть покращення стану механічних частин верстатів, в той час як ремонт електронних блоків з кожним роком стає все більш трудомістким.

Сучасні перетворювачі частоти дозволяють забезпечувати широкий діапазон

регулювання швидкості обертання і компенсувати зниження потужності двигуна на малих обертах. Постійне здешевлення перетворювачів частоти і реалізація все більш складних режимів керування сприяють широкому їх застосуванню в тих областях, де раніше домінували приводи постійного струму.

1.4 Постановка задачі

Згідно проведеного аналізу хвильового підйомника, його систем, устаткування та шляхів поліпшення його динамічних характеристик розроблені наступні шляхи поліпшення данного електропривода:

- замінити релейно-контакторну систему на напівпровідниковий сучасний комплектний електропривід;
- скласти математичну модель для розрахунку векторної системи керування;
- провести чисельний експеримент з дослідження системи;
- Визначити заходи з охорони праці при роботі на хвильовому підйомнику.

2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ

Завдання побудови високоякісного асинхронного електроприводу з векторним керуванням без використання будь-яких датчиків, розміщених на валу або вбудованих у двигун, постійно привертає увагу розробників з моменту появи самого терміна «векторне керування» стосовно асинхронного двигуна на початку 1970-х років. Область застосування таких електроприводів визначається наступними умовами:

- механізм висуває підвищені вимоги до швидкодії приводу;
 - в приводі потрібне регулювання електромагнітного моменту на валу двигуна;
 - не потрібна висока статична точність і широкий діапазон регулювання швидкості (діапазон не більше 100);
 - встановлення датчика швидкості на вал двигуна неможлива за умовами експлуатації, технологічним, вартісним або іншим обмеженням.
- Типовими об'єктами є електроприводи (ЕП) підйомно-транспортних засобів, механізмів намотування, екструдерів, працюючих в пожежонебезпечних, вибухонебезпечних, хімічно і радіоактивних середовищах, в умовах підвищених вібрацій і ударних механічних навантажень.

2.1 Загальні відомості про бездатчикові асинхронні приводи і основні проблеми, зв'язані з побудовою бездатчикового векторного електропривода

В даний час бездатчикові асинхронні приводи з векторним керуванням представлені практично всіма провідними фірмами-виробниками перетворювачів частоти. При цьому характеристики більшості цих приводів виявляються досить скромними. Зокрема, полоса пропускання контуру швидкості, як правило, не перевищує (5-7) Гц, а загальний діапазон регулювання швидкості (вгору і вниз від номінальної) не більше (20-100), що цілком досяжно і в системі частотного керування з векторною орієнтацією змінних в сталих режимах роботи. Більшість же виробників перетворювачів частоти взагалі не заявляють у технічній документації

смугу пропускання і діапазон регулювання швидкості. У цьому випадку отримати подібну інформацію вдається тільки в результаті проведення стендових випробувань. Таким чином, якщо розглядати зазначені характеристики регулювання швидкості, то практично «стирається грань» між бездатчиковими електроприводами з частотним і векторним керуванням. Характеристики асинхронних векторних електроприводів без датчика швидкості можуть суттєво перевищувати аналогічні характеристики систем частотного керування. Зокрема, смуга пропускання контуру швидкості може становити більше 30 Гц, а в діапазоні регулювання швидкості не менше 100 забезпечуються значно менші статичні і динамічні помилки. Проте для досягнення таких результатів доводиться вирішити ряд проблем.

Основні проблеми, пов'язані з побудовою бездатчикового векторного електроприводу, заключаються в наступному.

Спостерігач стану асинхронного двигуна (АТ), побудований на основі рішення повної системи рівнянь електричної рівноваги для статора і ротора за доступною інформації про напруги і струми статора, здатний забезпечити прийнятну точність обчислення потокозчеплення і швидкості тільки в обмеженому діапазоні частот. Це пов'язано з відомою проблемою введення початкових умов при частотах, близьких до нульової. Практично всі способи рішення цієї проблеми зв'язані з визначенням відхилення математичного опису спостерігача стану відносно реального об'єкта при роботі в області малих частот. Ці відхилення проявляються у вигляді помилки в обчисленні потокозчеплення, швидкості, активної і реактивної складової струму.

Наступною проблемою є чутливість електроприводу до зміни його параметрів в процесі роботи. Перш за все це відноситься до температурних змін активних опорів статора і ротора, а також до зміни взаємної індуктивності в залежності від струму кола намагнічування. Одним з піходів до рішення данної проблеми в побудові векторного регулятора і спостерігача стану АД являється використання регуляторів, грубих у відношенні параметричних збурень, в тому числі, релейних регуляторів, функціонуючих в ковзних режимах. Іншим підходом являється параметрична адаптація, здійснена в реальному часі при роботі привода.

Третьою проблемою є отримання необхідної точності оцінки еквівалентних (усереднених на інтервалі розрахунку процесів в спостерігачі стану) значень струмів і напруг статора. На точність оцінки еквівалентних напруг в області малих частот основної гармоніки і високих частот модуляції істотно впливає «мертвий час» і затримки перемикавання ключів інвертора. Проблема точності вимірювання напруги на малих частотах у набагато меншому ступені проявляється у векторних електроприводах з датчиком швидкості / положення, так як швидкодіючий контур швидкості, замкнутий по реально вимірюваному сигналу, здатний в значній мірі компенсувати помилки, пов'язані з динамічними «неідеальностями» ключів інвертора.

2.2 Структурна схема системи адаптивно-векторного керування асинхронним електроприводом

Структурна схема системи адаптивно-векторного керування асинхронним електроприводом наведена на рисунку 2.1. Векторний регулятор струмів включає в себе ПІ- регулятори складових вектора струму статора по осях d і q , орієнтованим за оцінкою кутового положення вектора потокозчеплення ротора, і блок компенсації перехресних зв'язків.

Перетворювач напруг включає в себе обмежувач заданої напруги статора по осях d і q і перетворювач координат: ортогональна система (d, q) – полярна система – природна трифазна система (a, b, c) , нерухома відносно статора, і блок компенсації запізнювання системи крування.

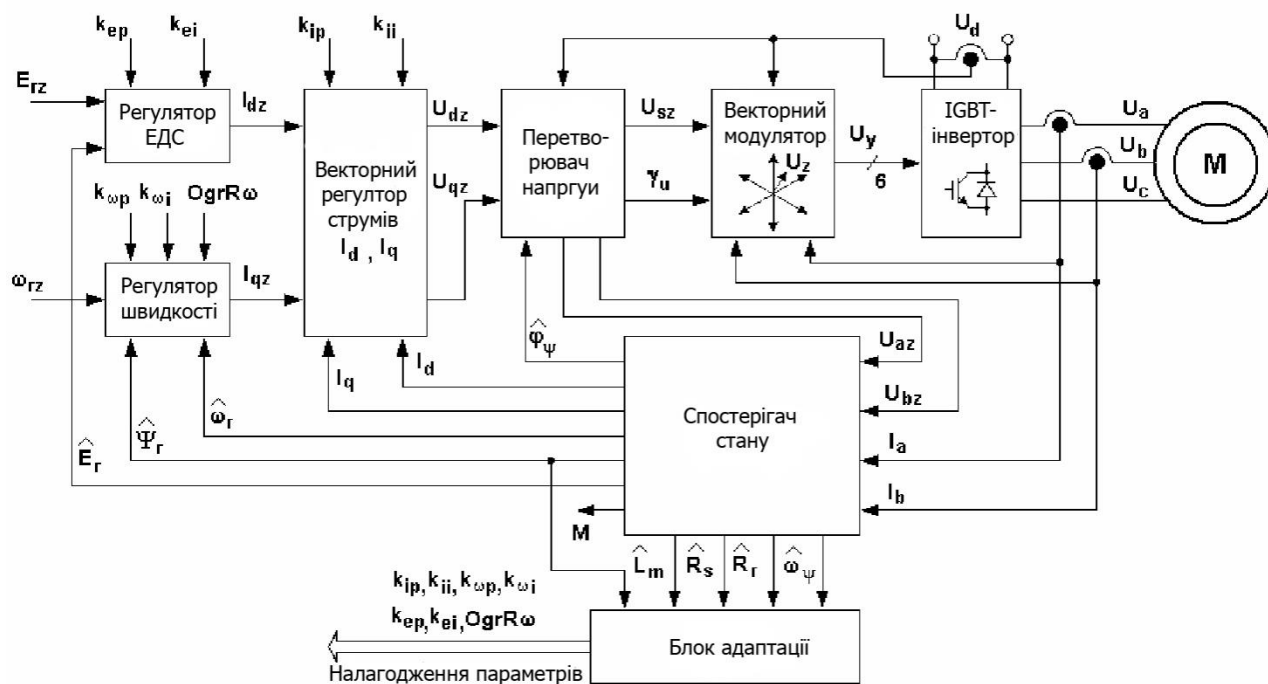


Рисунок 2.1 – Структурна схема електроприводу

Векторний модулятор реалізує «трикутний» алгоритм просторово- векторного формування вихідної напруги IGBT-інвертора з функцією компенсації «мертвого часу і затримок переключення силових ключів. Спостерігач стану реалізує обчислення всіх змінних і параметрів двигуна, необхідних для реалізації алгоритму адаптивно-векторного керування, за інформацією про двох фазних струмах статора і двох заданих значеннях фазних напруг. Блок адаптації виконує перерахунок параметрів регуляторів системи керування в залежності від відхилення параметрів двигуна, що проявляється в процесі роботи двигуна.

2.3 Синтез системи керування

Структурна схема спостерігача стану наведена на рисунку 2.2. Для обчислення необхідних змінних вводиться ортогональна система координат (x, y) , що обертається синхронно з частотою поля. Її кутове положення не фіксується щодо будь-якої змінної або осі двигуна і може бути довільним, тобто «плаваючим». Принциповими факторами є кутове положення, а синхронність

системи (x, y) , яка забезпечує в сталих режимах роботи двигуна постійні значення обчислюваних змінних, а також її відносно висока інерційність (швидкість зміни кутового положення повинна бути обмежена), що забезпечує бажану ступінь стійкості цифрових обчислювальних алгоритмів. В якості частоти обертання системи координат (x, y) можуть прийматися змінні, величина яких в сталих режимах роботи дорівнює частоті обертання поля. Це можуть бути частоти обертання векторів потокозчеплень, відфільтровані значення частот обертання векторів напруги або струму статора. У розглянутому випадку частота обертання системи (x, y) прийнята рівною оцінці частоти обертання вектора потокозчеплення ротора $\tilde{\omega}_\psi$.

Кутове положення і частота системи координат на k -інтервалі розрахунку змінних спостерігача обчислюються за виразами:

$$\omega_{x,k} = \tilde{\omega}_{\psi,k-1}; \quad (2.1)$$

$$\varphi_{x,k} = \varphi_{x,k-1} + \omega_{x,k} T_0. \quad (2.2)$$

де T_0 – інтервал розрахунку змінних спостерігача.

Перетворення 1 струмів і перетворення 2 напруг із системи координат (a,b,c) в систему координат (x,y) здійснюється за виразом:

$$U_x = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[U_{az} \sin\left(\varphi_{x,k-1} + \frac{\pi}{3}\right) + U_{bz} \sin(\varphi_{x,k-1}) \right]; \quad (2.3)$$

$$U_y = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[U_{az} \cos\left(\varphi_{x,k-1} + \frac{\pi}{3}\right) + U_{bz} \cos(\varphi_{x,k-1}) \right]; \quad (2.4)$$

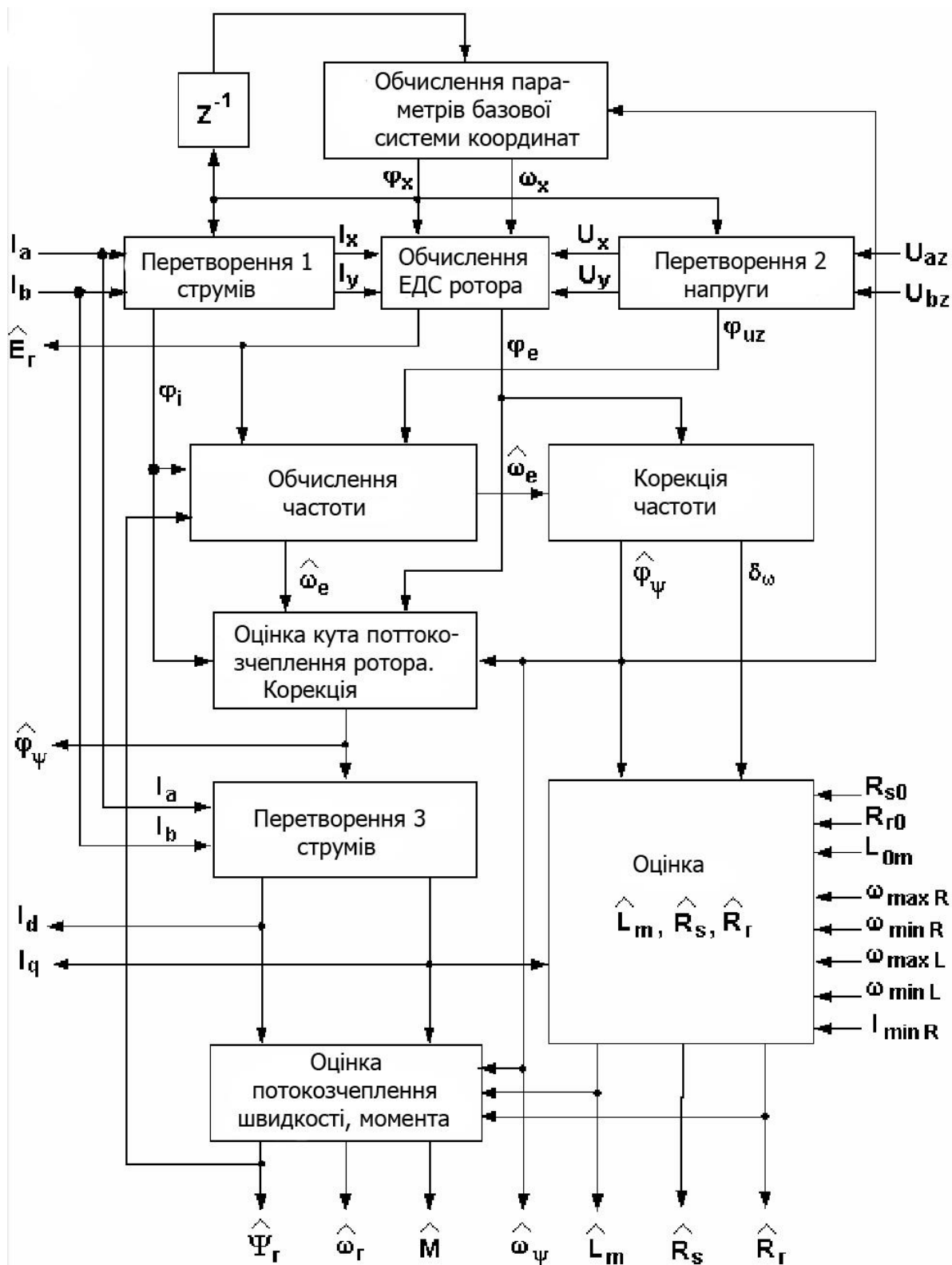


Рисунок 2.2 – Структурна схема спостерігача стану

$$I_x = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[I_a \sin \left(\varphi_{x,k} + \frac{\pi}{3} \right) + I_b \sin(\varphi_{x,k}) \right]; \quad (2.5)$$

$$I_y = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[I_b \cos \left(\varphi_{x,k} + \frac{\pi}{3} \right) + I_b \cos(\varphi_{x,k}) \right]; \quad (2.6)$$

де I_a, I_b, U_{az}, U_{bz} – струми і задані напруги статора фаз a і b .

Використання для перетворення напруг кутового положення системи координат на попередньому інтервалі розрахунку пов'язано з наявністю запізнювання у вимірі струму щодо формування напруги. Перехід в полярну систему координат, нерухому відносно статора, дає кутові положення векторів заданої напруги і струму статора.

Розрахунок ЕРС ротора здійснюється на основі цифрового розв'язання рівнянь статорного ланцюга АД записаних у системі координат (x, y) :

$$U_x = R_s I_x + \sigma L_s \left(\frac{dI_x}{dt} \right) - \sigma L_s \omega_x I_y + E_{rx}; \quad (2.7)$$

$$U_y = R_s I_y + \sigma L_s \left(\frac{dI_y}{dt} \right) - \sigma L_s \omega_x I_x + E_{ry}. \quad (2.8)$$

де

$$E_{rx} = \left(\frac{L_m}{L_r} \right) \left(\frac{d\psi_{rx}}{dt} \right) - \omega_x \left(\frac{L_m}{L_r} \right) \psi_{ry}; \quad (2.9)$$

$$E_{ry} = \left(\frac{L_m}{L_r} \right) \left(\frac{d\psi_{ry}}{dt} \right) - \omega_x \left(\frac{L_m}{L_r} \right) \psi_{rx}. \quad (2.10)$$

- проекції вектора ЕДС ротора в системі координат (x, y) ;
 ψ_{rx}, ψ_{ry} – проекції вектора потокозчеплення ротора в системі координат (x, y) ;

$$\sigma = 1 + \left(\frac{L_m^2}{L_r L_s} \right). \quad (2.11)$$

- коефіцієнт розсіяння; L_m, L_r, L_s – індуктивності взаємна, ротора, статора, R_s - активний опір статора .

Перетворення E_{rx}, E_{ry} в полярну систему координат, нерухому відносно статора, дає оцінку модуля і кутового положення вектора ЕДС ротора ($\tilde{E}_r, \varphi_e$).

Розрахунок модуля першої оцінки частоти обертання вектора потокозчеплення ротора виконується з урахуванням припущення, що

трансформаторна складова ЕДС ротора $(\frac{L_m}{L_r})(\frac{d\psi_r}{dt})$ дуже мала порівнянні з ЕДС обертання $j\omega_\psi(\frac{L_m}{L_r}\frac{L_m}{L_r})\psi_r$, з виразу :

$$|\tilde{\omega}_e| = \frac{L_r}{L_m} \frac{\ddot{\psi}_r}{\psi_r}, \quad (2.12)$$

де ψ_r – оцінка потокозчеплення ротора.

Знак частоти обертання вектора потокозчеплення ротора обчислюється на основі оригінального алгоритму за інформацією про кутові положення векторів заданої напруги і струму статора, модулі частоти обертання на поточному та попередніх інтервалах розрахунку і знаку частоти обертання на попередньому інтервалі розрахунку.

Корекція оцінки частоти обертання вектора потокозчеплення ротора за фактичною миттєвою частотою обертання вектора ЕРС ротора, обчисленої з його кутового положення φ_e , виконується з метою усунення в оцінці частоти помилку, викликану структурною та параметричною неадекватністю моделі статорного ланцюга, похибками вимірювальних каналів і наближеним характером обчислень. Корекція виконується на основі інтегрального регулятора частоти, коефіцієнт якого встановлюється виходячи з бажаного характеру руху помилки.

Оцінка кутового положення вектора потокозчеплення ротора φ_ψ виконується на основі інформації про кутові положення векторів ЕРС ротора, струму статора і оцінок частоти обертання вектора потокозчеплення ротора $\tilde{\omega}_e$, $\tilde{\omega}_\psi$. З урахуванням зневаги малої величини трансформаторної ЕРС, кутові положення векторів ЕРС і потокозчеплення ротора відстають один від одного на кут $\pm \pi/2$. Знак визначається напрямом обертання векторів (знаком частоти). На малих частотах величина ЕРС ротора прагне до нуля, і, отже, діапазон обчислення положення вектора ЕРС із заданою точністю обмежений деяким мінімальним значенням частоти $\omega_{\psi min}$. Щоб забезпечити працездатність спостерігача стану на частотах, менших $\omega_{\psi min}$ здійснюється перехід від орієнтації за вектором ЕРС до орієнтації за вектором струму статора. Алгоритм обчислень організований таким чином, що цей перехід

здійснюється тільки в режимах малих ковзань, тобто близьких до холостого ходу двигуна. У цьому випадку положення вектора струму статора виявляється близьким до положення вектора потокозчеплення ротора, і перехід на орієнтацію по струму не приводить до великих помилок в точності обчислення змінних.

Додаткова корекція оцінки кутового положення вектора потокозчеплення ротора виконується з метою мінімізації впливу на точність обчислення змінних двигуна помилок, що викликаються наступними факторами:

- малими динамічними відхиленнями різниці кутових положень векторів ЕРС і потокозчеплення ротора від величини $\pm \pi/2$;
- динамічними помилками обчислення вектора ЕРС ротора;
- наявністю стрибків в оцінці становища вектора потокозчеплення, викликаних зміною структури спостерігача стану в області малих частот при переході з орієнтації за вектором ЕРС до орієнтації за вектором струму.

Корекція виконується на основі П- регулятора положення. Параметри регулятора вибираються виходячи з бажаного характеру руху помилки між нескоректованим та скоригованим значеннями кутового положення вектора потокозчеплення ротора. Корекція кута виконується з використанням алгоритму безінерційного усунення помилок, що перевищують певне порогове значення. Це робиться для усунення можливості накопичення великих похибок в обчисленні кута потокозчеплення при перехідних процесах «у великому» (коли регулятор швидкості переходить з лінійної області в обмеження, зокрема, при пусках, гальмуваннях і реверсі з номінальної частоти обертання).

Перетворення трьох струмів статора з системи координат (a, b, c) в ортогональну систему координат (d, q) орієнтовану за оцінкою кутового положення вектора потокозчеплення ротора, здійснюється за виразами:

$$I_d = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[I_a \sin \left(\varphi_{\psi}^{\sim} + \frac{\pi}{3} \right) + I_b \sin \left(\varphi_{\psi}^{\sim} \right) \right]; \quad (2.13)$$

$$I_q = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[I_a \cos \left(\varphi_{\psi}^{\sim} + \frac{\pi}{3} \right) + I_b \cos \left(\varphi_{\psi}^{\sim} \right) \right]. \quad (2.14)$$

Для виділення параметрів двигуна, до змін яких привід виявляється найбільш чутливим, а саме взаємної індуктивності, активних опорів статора і ротора, використовується сигнал невязки δ_ω . Цей сигнал визначає різницю між скоригованими значенням частоти обертання вектора потокозчеплення ротора $\tilde{\omega}_\psi$ і її першою оцінкою $\tilde{\omega}_e$. У якості вихідних значень обчислюваних параметрів (L_{m0} , R_{s0} , R_{r0}) використовуються значення, визначені в результаті виконання процедури автоналаштування приводу або введені користувачем на основі паспортних даних двигуна. Так як невязка одна, а оцінюваних параметрів три, то для забезпечення збіжності оцінок до істинних значень параметрів алгоритми обчислення оцінок рознесені в часі і залежно від режиму роботи приводу (рівня частоти і навантаження). З цією метою в блок оцінки параметрів вводиться додаткова інформація про межі функціонування алгоритмів оцінки (ω_{minR} , ω_{minL} , ω_{maxR} , ω_{maxL} , I_{minR}) і змінні, що характеризують величину частоти і навантаження. Для оцінки R_s використаний інтегральний регулятор, для оцінки L_m - пропорційно-інтегральний. Налаштування регуляторів зроблені таким чином, щоб забезпечити бажаний характер руху помилок оцінки параметрів. Оцінка температурного зміни R_s виконується непрямым чином з оцінки температурного зміни активного опору статора.

Оцінка потокозчеплення ротора, швидкості ротора і електромагнітного моменту здійснюється відповідно до рівняння:

$$T_r \frac{d\tilde{\psi}_{rx}}{dt} = -\tilde{\psi}_r + L_m I_d ; \quad (2.15)$$

$$\tilde{\omega}_r = \frac{1}{Z_p} (\tilde{\omega}_\psi - \frac{L_m I_q}{T_r \tilde{\psi}_r}); \quad (2.16)$$

$$M = \frac{3}{2} Z_p \frac{L_m}{L_r} \tilde{\psi}_r I_q , \quad (2.17)$$

де Z_p – число пар полюсів двигуна, $L_r = L_0 \left(\frac{L_0}{L_{m0}} \right)$; $T_r = L_{r0} \left(\frac{L_r}{L_r} \right)$ - оцінка індуктивності і постійної часу ротора.

2.4 Розрахунок елементів структурної схеми

Оцінка потокозчеплення ротора та частоти обертання

Інформація про вектор потокозчеплення ротора (його модуль ψ_r), кутове положення відносно фази А статора (φ_ψ) миттєва частота обертання (ω_ψ) розраховується в моделі роторного кола за наступним рівнянням:

$$T_r \frac{d\psi_r}{dt} = -\psi_r + L_m I_d ; \quad (2.18)$$

$$\omega_\psi = \omega_{re} + \omega_{ck} = Z_p \omega_r + \frac{L_m}{T_r} \frac{I_q}{\psi_r} ; \quad (2.19)$$

$$\varphi_\psi = \int \omega_\psi dt = \int Z_p \omega_r dt + \int \omega_{ck} dt = Z_p \varphi_r + \int \omega_{ck} dt . \quad (2.20)$$

Перетворювач координат ABC – dq виконує перетворення фазних струмів статора АД з трифазної системи координат (А,В,С) в ортогональну синхронну систему координат (d,q) за рівняннями:

$$I_d = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[I_a \sin \left(\varphi_\psi + \frac{\pi}{3} \right) + I_b \sin(\varphi_\psi) \right]; \quad (2.21)$$

$$I_q = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[I_a \cos \left(\varphi_\psi + \frac{\pi}{3} \right) + I_b \cos(\varphi_\psi) \right]. \quad (2.22)$$

Перетворювач напруги реалізує функції обмеження максимального значення заданої напруги, зворотного перетворення координат і компенсація запізнювання, що вноситься системою керування:

$$U_{s\max} = \frac{U_d}{\sqrt{3}} \frac{T_m - t_{0\min}}{T_m}, \quad (2.23)$$

де U_d - вхідна напруга інвертора, T_m - період модуляції вихідної напруги інвертора; $t_{0\min}$ - мінімально допустима ширина імпульса керування ключами інвертора, що визначається їх швидкодією.

Зворотнє перетворення заданих напруг статора з системи координат (d,q) , в систему (α, β) виконується за рівняннями:

$$U_{\alpha z} = U_{dz} \cos \varphi_{\psi} - U_{qz} \sin \varphi_{\psi}, \quad (2.24)$$

$$U_{\beta z} = U_{dz} \sin \varphi_{\psi} + U_{qz} \cos \varphi_{\psi}. \quad (2.25)$$

Блок компенсації перехресних зв'язків формує сигнали, що компенсують вплив перехресних зв'язків на процеси в контурах регулювання складових вектора струму статора, у відповідності з виразом:

$$U_{kd} = \frac{1}{k_{пч}} \left(-\sigma L_s \omega_{\psi} I_q + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\psi_r}{dt} \right); \quad (2.26)$$

$$U_{kq} = \frac{1}{k_{пч}} \left(-\sigma L_s \omega_{\psi} I_d + \frac{L_m}{L_r} \omega_{\psi} \psi_r \right), \quad (2.27)$$

де $k_{пч}$ - коефіцієнт передачі перетворювача частоти (ПЧ) по амплітуді напруги.

Корекція частоти

Корекція оцінки частоти обертання вектора потокозчеплення ротора за фактичною миттєвою частотою обертання вектора ЕРС ротора, обчисленої з його кутового положення φ_e , виконується з метою усунування в оцінці частоти помилку, викликану структурною та параметричною неадекватністю моделі статорного ланцюга, похибками вимірювальних каналів і наближенні характером обчислень. Корекція виконується на основі інтегрального регулятора частоти, коефіцієнт якого встановлюється виходячи з бажаного характеру руху помилки.

Синтез контура струму

Налаштування контура струму зробимо на стандартний перехідний процес, відповідний фільтру Баттерворта 2-го порядку, швидкодія якого визначається малою некомпенсованою постійною часу $T_{кт}$.

Передавальна функція такого фільтру має вигляд.

$$H_B(p) = \frac{1}{2T_{\text{КТ}}^2 p^2 + 2T_{\text{КТ}} p + 1}. \quad (2.28)$$

Передаточна функція розімкнутого контура струму має вигляд:

$$H_{\text{КС}}^{\text{роз}}(p) = H_{\text{РС}}(p) \frac{k_{\text{ПЧ}} k_{\text{ДС}}}{R_s (T_{\text{КС}} p + 1)(T_s p + 1)}. \quad (2.29)$$

Прирівнюючи дані рівняння маємо:

$$H_{\text{РС}}^{\text{роз}}(p) = \frac{T_s p + 1}{(2T_{\text{КС}} k_{\text{ПЧ}} k_{\text{ДС}} / R_s) p} = k_p + \frac{k_i}{p}, \quad (2.30)$$

$$\text{де } k_p = \frac{\sigma L_s}{2T_{\text{КС}} k_{\text{ПЧ}} k_{\text{ДС}}}, \quad k_i = \frac{R_s}{2T_{\text{КС}} k_{\text{ПЧ}} k_{\text{ДС}}}.$$

Таким чином отримали ПІ-регулятор струму по осі q . Передаточна функція замкнутого контуру струму прийме вигляд:

$$H_{\text{КС}}(p) = \frac{1 / k_{\text{ДС}}}{2T_{\text{КС}}^2 p^2 + 2T_{\text{КС}} p + 1}. \quad (2.31)$$

Структурна схема приведена на рисунку 2.3.

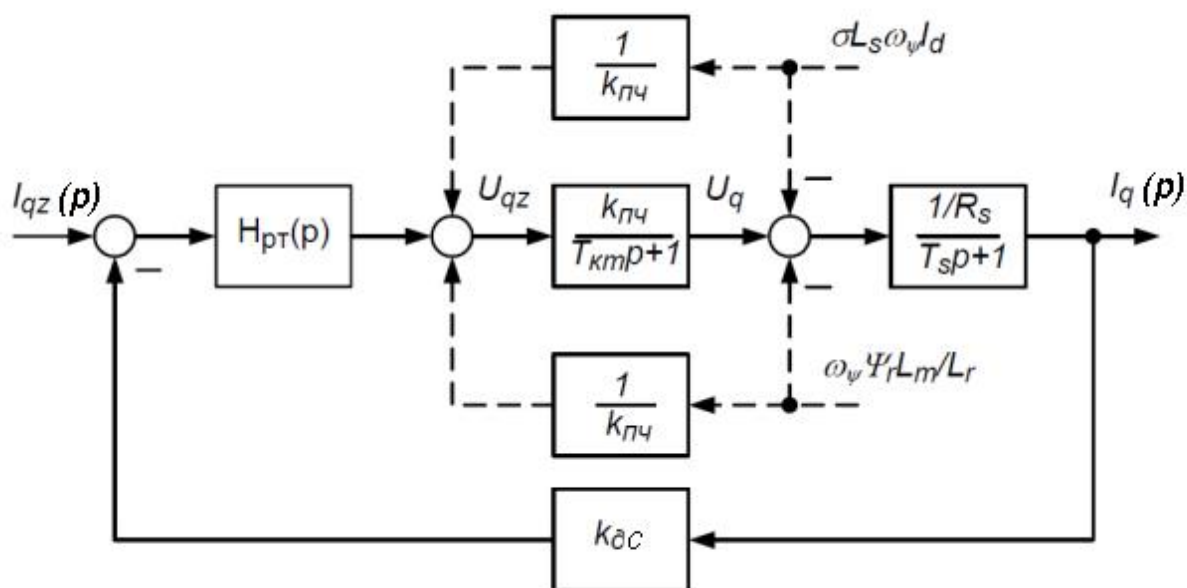


Рисунок 2.3 – Структурна схема контура струму по осі q

Регулятор струму I_d, I_q :

Фільтр Баттерворта 2-го порядку:

$$2T_{\text{кc}}^2 s^2 + 2T_{\text{кc}} s + 1. \quad (2.32)$$

Розрахункові відношення:

$$k_{\text{прс}} = \frac{\sigma L_s}{2T_{\text{кc}}}; \quad k_{\text{урт}} = \frac{R_s T_0 / 2}{2T_{\text{кc}}}. \quad (2.33)$$

Синтез регулятора ЕДС

Структурна схема контуру ЕДС представлена на рисунку 2.4, де $T_{\text{ке}}$ - мала некомпенсована постійна часу контура ЕДС.

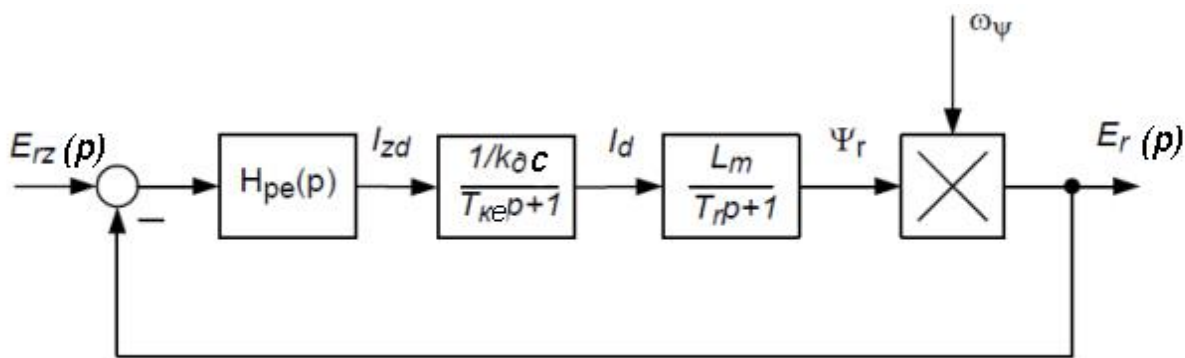


Рисунок 2.4 – Структурна схема контура ЕДС

Бажана передаточна функція розімкнутого контура ЕДС:

$$H_{\text{ж}}^{\text{роз}}(p) = \frac{1}{2T_{\text{ке}} p (T_{\text{ке}} p + 1)}. \quad (2.34)$$

Передаточна функція розімкнутого контура ЕДС при умові $\omega_{\psi} = \omega_{\psi \text{ max}}$:

$$H_{\text{ке}}^{\text{роз}}(p) = H_{\text{пе}}(p) \frac{L_m \omega_{\psi \text{ max}} / k_{\text{pc}}}{(T_{\text{ке}} p + 1)(T_r p + 1)}. \quad (2.35)$$

Прирівнюючи дані рівняння, отримаємо функцію регулятора ЕДС:

$$H_{\text{пе}}(p) = \frac{T_r p + 1}{(2T_{\text{ке}} L_m \omega_{\psi \text{ max}} / k_{\text{дс}}) p} = k_{\text{ep}} + \frac{k_{\text{ei}}}{p}, \quad (2.36)$$

$$\text{де } k_{\text{ep}} = \frac{k_{\text{дт}} T_r}{2T_{\text{ке}} L_m \omega_{\psi \text{ max}}}, \quad k_{\text{ei}} = \frac{k_{\text{ом}}}{2T_{\text{ке}} L_m \omega_{\psi \text{ max}}}.$$

Регулятор проти-ЕРС

Фільтр Баттерворта 2-го порядку при $\omega_{\psi} = \omega_{\psi \text{ max}}$;

$$2T_{\text{ке}}^2 s^2 + 2T_{\text{ке}} s + 1. \quad (2.37)$$

Розрахункові відношення:

$$k_{npe} = \frac{T_r}{2T_{ke} L_m \omega_{\psi \max}}; \quad k_{npe} = \frac{T_0 / 2}{2T_{ke} L_m \omega_{\psi \max}}. \quad (2.38)$$

Бездатчикове визначення швидкості

Для асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором рівняння, записані в векторній формі в нерухомій системі координат, мають вигляд:

$$\vec{U}_{s\alpha-\beta} = R_s \vec{I}_{s\alpha-\beta} + \frac{d\vec{\Psi}_{s\alpha-\beta}}{dt}; \quad (2.39)$$

$$0 = R_r \vec{I}_{r\alpha-\beta} + \frac{d\vec{\Psi}_{r\alpha-\beta}}{dt} - jZ_p \omega \vec{\Psi}_{r\alpha-\beta}; \quad (2.40)$$

$$\vec{\Psi}_{s\alpha-\beta} = L_s \vec{I}_{s\alpha-\beta} + L_m \vec{I}_{r\alpha-\beta}; \quad (2.41)$$

$$\vec{\Psi}_{r\alpha-\beta} = L_s \vec{I}_{s\alpha-\beta} + L_r \vec{I}_{r\alpha-\beta}. \quad (2.42)$$

Запишемо дані рівняння відносно векторів струму статора та потокозчеплення ротора, виразивши потокозчеплення ротора, отримаємо:

$$\vec{\Psi}_{r\alpha-\beta} = \frac{1}{p} \frac{L_r}{L_m} \left(\vec{U}_{s\alpha-\beta} - R_s \vec{I}_{s\alpha-\beta} - \sigma L_s \frac{d\vec{I}_{s\alpha-\beta}}{dt} \right). \quad (2.43)$$

Формула для визначення частоти обертання приймає вигляд:

$$\omega_{0el} = \frac{d\Theta_c}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\arctg \frac{\Psi_{r\beta}}{\Psi_{r\alpha}} \right) = \frac{1}{1 + (\Psi_{r\beta} / \Psi_{r\alpha})^2} \frac{d}{dt} \left(\frac{\Psi_{r\beta}}{\Psi_{r\alpha}} \right). \quad (2.44)$$

В кінцевому вигляді при введенні позначення $p = d / dt$, формула для визначення частоти напруги живлення приймає вигляд:

$$\omega_{0el} = \frac{\Psi_{r\alpha} p \Psi_{r\beta} - \Psi_{r\beta} p \Psi_{r\alpha}}{\Psi_{r\alpha}^2 + \Psi_{r\beta}^2}. \quad (2.45)$$

Для визначення швидкості, необхідно визначити значення частоти роторної ЕДС, яка розраховується за виразом:

$$\omega_p = k_r R_r I_{s\beta} / |\vec{\Psi}_r|. \quad (2.46)$$

Електромагнітний момент знаходимо за виразом:

$$M_d = (3/2) Z_p k_r |\vec{\Psi}_r| I_{s\beta}, \quad (2.47)$$

де $k_r = L_m / L_r$

Виразивши складову струму статора $I_{s\beta}$ і підставивши результат, маємо:

$$\omega_p = \frac{2R_3 M_d}{3Z_p |\vec{\Psi}_r|^2}. \quad (2.48)$$

Регулятор швидкості:

Фільтр Баттерворта 3-го порядку:

$$8T_{kc}^3 s^3 + 8T_{kc}^2 s^2 + 4T_{kc} s + 1 \quad (2.49)$$

Розрахункові відношення:

$$k_{прс} = \frac{J}{3z_p T_{kc}}; \quad k_{урс} = \frac{JT_0 / 2}{12z_p T_{kc}^2}. \quad (2.50)$$

Біноміальне розподілення 3-го порядку:

$$(3T_{kc} s + 1)^3. \quad (2.51)$$

Розрахункові відношення:

$$k_{\text{прс}} = \frac{2J}{9z_p T_{\text{кс}}}; \quad k_{\text{ирс}} = \frac{JT_0}{81z_p T_{\text{кс}}^2}. \quad (2.52)$$

$$T_{\text{фільтра}} = 9T_{\text{кс}}$$

2.5 Розрахунок структурної схеми у відносних одиницях

Загальна формула переведення абсолютних величин:

$$y = \frac{Y}{Y_6}. \quad (2.53)$$

Переведення струму:

$$i_a = \frac{I}{I_6}. \quad (2.54)$$

Кутова швидкість:

$$n = \frac{\omega_n}{\omega_6}. \quad (2.55)$$

Потокозчеплення:

$$\psi = \frac{\Psi_{2н}}{\Psi_6}. \quad (2.56)$$

Переведення коефіцієнтів зворотних зв'язків здійснюється за формулою:

$$k' = K \cdot \frac{Y_{\text{вх.6}}}{Y_{\text{вих.6}}}. \quad (2.57)$$

Розрахунок коефіцієнтів:

$$k'_{\text{ОС1}} = k_{\text{ОС}} \cdot \frac{I_6}{U_{36}}; \quad (2.58)$$

$$k'_{\text{ОШ}} = k_{\text{ОШ}} \cdot \frac{\omega_6}{U_{36}}; \quad (2.59)$$

$$k'_{\text{оп}} = k_{\text{оп}} \cdot \frac{\Psi_6}{U_{36}}. \quad (2.60)$$

Розрахунок передавальних коефіцієнтів ланок структурної схеми в в.о.

Перетворювач:

$$k'_{\Pi} = k_{\Pi} \cdot \frac{U_{\text{вх.6}}}{U_{\text{вих.6}}}. \quad (2.61)$$

Ланка електричної частини двигуна:

$$r_{1e} = \frac{R_{1e}}{R_6}. \quad (2.62)$$

Регулятор швидкості:

$$k' = \frac{T_j}{2 \cdot 2 \cdot T_{\Pi}}. \quad (2.63)$$

Інерційна постійна приводу:

$$T_j = \frac{\omega_6}{M_6} \cdot J_{\Sigma}. \quad (2.64)$$

Розрахунок моменту опору:

$$m = \frac{M_c}{M_6}. \quad (2.65)$$

3 РОЗРАХУНОК ТА МОДЕЛЮВАННЯ ВЕКТОРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

3.1 Вибір двигуна

В данному проекті, для модернізації електропривода, був обраний асинхронний двигун серії АІР (рисунок 3.1). Їх перевага: надійність, простота конструкції, ремонтпридатність, тривалий міжремонтний період і термін експлуатації

Конструкція двигуна – в електродвигунах корпус статора виготовлений з чавуну або алюмінієвих сплавів. Двигуни можуть кріпитися до механізму на лапах або за допомогою фланця. Торцеві щити виконані з чавуну, в щити вбудовані радіальні підшипники валу.

З ряду потужності від 0,06 до 315 можна дуже точно підібрати необхідну потужність двигуна. Висота осі двигуна в діапазоні від 50 до 355 мм. Число оборотів 750 - 3000 об/хв. Велика лінійка настановних розмірів і варіантів захисту. Тому з двигунів АІР можна підібрати асинхронний двигун, що задовольняє практично будь-яким вимогам.



Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд електродвигуна серії АІР

В данної роботі, для модернізації електропривода, був обраний асинхронний двигун АІР112МА6 з технічними даними, які представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1–Технічні характеристики АД АІР112МА6

Найменування	Значення
Потужність	$P_{ном} = 3 \text{ кВт}$
ККД	$\eta_{ном} = 81\%$
Коефіцієнт потужності	$\cos \varphi_{ном} = 0.76$
Ковзання	$S_{ном} = 5.0 \%$
Кратність пускового моменту	$\frac{M_n}{M_{ном}} = 2.0$
Кратність критичного моменту	$\frac{M_{max}}{M_{ном}} = 2.2$
Кратність пускового струму	$\frac{I_n}{I_{ном}} = 6.0$
Момент інерції	$J = 0.017$ кг/м ²
Номінальна частота обертання	$\omega_{ном} = 99,484$ рад/с
Номінальний момент	$M_n = 30,16$ Нм
Пусковий момент	$M_n = 60,31$ Нм
Критичний момент	$M_k = 66,34$ Нм
Номінальний струм статора	$I_n = 7,4 \text{ А}$
Критичне ковзання	$S_{кр} = 0,24509$
Активний опір статора	$R_s = 2.808$ Ом

Продовження таблиці 3.1

Найменування	Значення
Активний опір ротора	$R_r = 1.731$ Ом
Реактивний опір статора	$X_s = 2.721$ Ом
Реактивний опір ротора	$X_r = 3.759$ Ом
Опір взаємодукції	$X_m = 65.095$ Ом
Повна індуктивність статора	$L_s = 0.216$ Гн
Повна індуктивність ротора	$L_r = 0.219$ Гн
Взаємна індуктивність статора і ротора	$L_m = 0.207$ Гн
Коефіцієнт магнітного зв'язку	$k_s = 0.9599$
Коефіцієнт магнітного зв'язку ротора	$k_r = 0.9454$
Коефіцієнт розсіювання	$\sigma = 0.093$
Маса	$m = 35$ кг

Перетворювачі частоти ЕПВ (рисунок 3.2) представляють собою нове покоління багатофункціональних, «інтелектуальних» пристроїв керування низьковольтними (до 440 В) електродвигунами змінного струму, асинхронними і синхронними, з датчиками швидкості з номінальним вихідним струмом до 480 А, потужністю від 1 до 250 кВт.

Перетворювачі ЕПВ застосовуються в регульованих приводах механізмів і технологічних процесів з різними вимогами до параметрів регулювання та умовам експлуатації: від насосів і вентиляторів до високоточних верстатів і слідкуючих систем.

Частотні перетворювачі ЕПВ використовуються в електроприводах головного руху і електроприводах подач верстатів, приводах кранового устаткування та підйомно транспортних механізмів, пристроях стеження і позиціонування з підвищеними вимогами до швидкодії, статичної та динамічної точності регулювання швидкості і моменту.

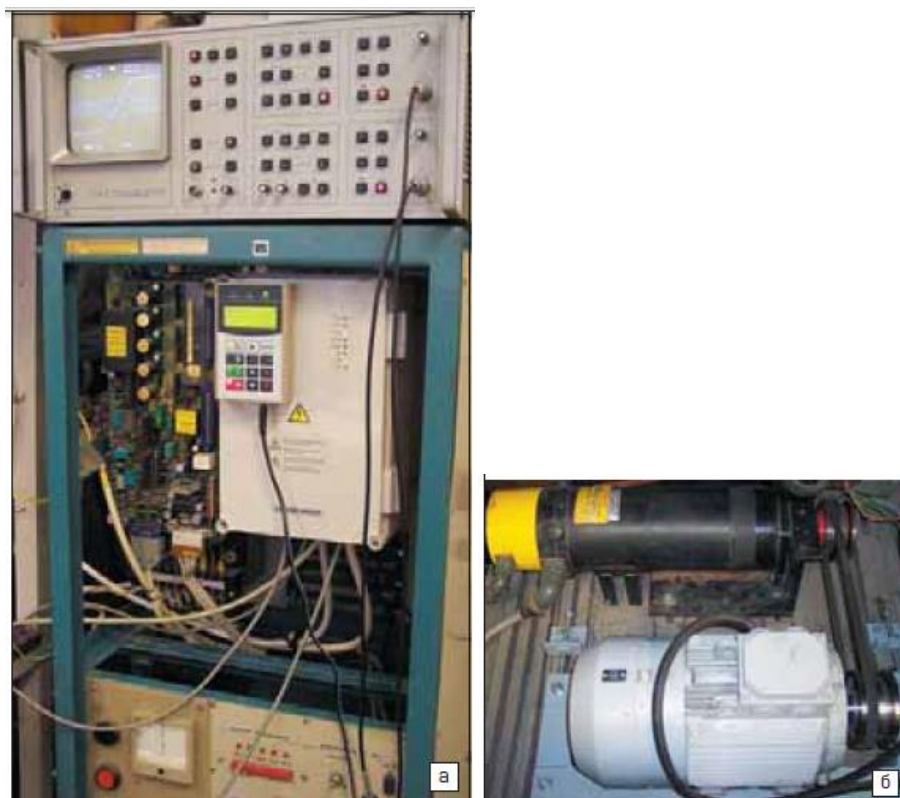


Рисунок 3.2 – Зовнішній вигляд перетворювача частоти ЕПВ та електродвигуна АІР на робочому місці

Відповідно до типу та потужності двигуна обираємо перетворювач частоти ЕПВ-ТТПТ-116-380-4АО з номінальними параметрами, які представлені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2–Технічні характеристики перетворювача напруги

Найменування	Значення
Напруга живлення	$U_{ном} = 380$ В
Номінальний вихідний струм	$I_{ном} = 16$ А

Продовження таблиці 3.2

Найменування	Значення
Максимальний вихідний струм	$I_{max} = 21$ А
Номінальна вихідна потужність	$P_{ном} = 10,5$ кВА
Типова потужність	$P_{тном} = 7,5$ кВА
Вихідна частота	$f =$ 0..400 Гц
Струм спрацювання захисту	$I_{мтз} = 40$ А
Максимальний струм гальмування	$I_{zmax} = 23$ А
Мінімальний опір баласт. резистора	$R_{\sigma} = 43$ Ом
Потужність втрат в ном. режимі	$P_{\epsilon} = 165$ Вт
Максимальна температура радіатора	$t_{max} = +85^{\circ}$

3.2 Розрахунок параметрів для моделювання системи

Проведемо розрахунок параметрів та моделювання системи керування. Використовуємо дані з таблиці 3.2.

Для створення моделі приймемо момент інерції $J_{мех}$, кг · м², механізму:

$$J_{\text{мех}} = 20 \cdot J_{\text{дв}};$$

$$J_{\text{мех}} = 20 \cdot 0,017 = 0,34.$$

Сумарний момент J_{Σ} , кг·м²:

$$J_{\Sigma} = J_{\text{мех}} + J_{\text{дв}};$$

$$J_{\Sigma} = 0,34 + 0,017 = 0,357.$$

Розрахунок базисних значень:

Амплітудне значення номінального фазного напруги обмотки статора, U_{ϕ} , В:

$$U_{\phi} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{ф.н.}};$$

$$U_{\phi} = \sqrt{2} \cdot 220 = 311,127.$$

Амплітудне значення номінального струму обмотки статора I_{ϕ} , А:

$$I_{\phi} = \sqrt{2} \cdot I_1;$$

$$I_{\phi} = \sqrt{2} \cdot 7,4 = 10,465.$$

Розрахунок проекції струмів, $I_{1\beta}$, $I_{1\alpha}$, А:

$$I_{1\alpha} = I_{\phi} \cdot \sqrt{\left(\frac{R_s \cdot \sin \varphi + X_s \cdot \cos \varphi}{X_m} \right)^2 + \left(\frac{X_s \cdot \sin \varphi + R_s \cdot \cos \varphi - \frac{U_{\phi}}{I_{\phi}}}{X_m} \right)^2};$$

$$I_{1\alpha} = 10,465 \cdot \sqrt{\left(\frac{2,808 \cdot 0,3 + 2,721 \cdot 0,76}{65,095} \right)^2 + \left(\frac{2,721 \cdot 0,3 + 2,808 \cdot 0,76 - \frac{311,12}{10,465}}{65,095} \right)^2} = 4,331.$$

$$I_{1\beta} = I_{\phi} \cdot \sqrt{\left(\cos \varphi - \frac{R_s \cdot \sin \varphi + X_s \cdot \cos \varphi}{X_m} \right)^2 + \left(-\sin \varphi - \frac{X_s \cdot \sin \varphi + R_s \cdot \cos \varphi - \frac{U_{\phi}}{I_{\phi}}}{X_m} \right)^2};$$

$$I_{1\beta} = 10,465 \cdot \sqrt{\left(0,76 - \frac{2,808 \cdot 0,3 + 2,721 \cdot 0,76}{65,095} \right)^2 + \left(-0,3 - \frac{2,721 \cdot 0,3 + 2,808 \cdot 0,76 - \frac{311,13}{10,465}}{65,095} \right)^2} = 9,502.$$

Струм в каналі потокозчеплення двигуна $I_{1\alpha\delta}$, А:

$$I_{1\alpha\delta} = I_{1\alpha} = 4,331.$$

Струм в каналі швидкості двигуна, $I_{1\beta\delta}$, А:

$$I_{1\beta\delta} = k_{кр} \cdot I_{1\beta};$$

$$I_{1\beta\delta} = 2,2 \cdot 9,502 = 20,904.$$

Номінальна кутова частота напруги статора ω_{δ} , с-1 :

$$\omega_{\delta} = 2 \cdot \pi \cdot f_{с.н.};$$

$$\omega_{\delta} = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314,159.$$

Кутова частота обертання ротора, $\omega_{r.\delta}$, с⁻¹:

$$\omega_{r.\delta} = \frac{\omega_{\delta}}{z_p};$$

$$\omega_{r.\delta} = \frac{314,159}{4} = 78,5.$$

Електромагнітний момент, M_{δ} , Нм:

$$M_{\delta} = k_{кр} \cdot \frac{P_{н.}}{\omega_{r.\delta}};$$

$$M_{\delta} = 2,2 \cdot \frac{3000}{157} = 42,038.$$

Потокозчеплення ротора $\Psi_{2\delta}$, Вб :

$$\Psi_{2\delta} = 0,207 \cdot 4,331 = 0,897;$$

$$\Psi_{2\delta} = \Psi_2 = L_m \cdot I_{1\alpha\delta}$$

Ланка електричної частини двигуна:

Сумарний активний опір фази двигуна R_{1e} , Ом:

$$R_{1e} = R_s + k_r^2 \cdot R_r = 2,808 + 0,9454^2 \cdot 1,731 = 4,355 \text{ Ом.}$$

Коефіцієнт передачі перетворювача по напрузі k_{Π} , В/А:

$$k_{\Pi} = \frac{U_{\delta}}{U_{н.з.}};$$

$$k_{\Pi} = \frac{311,126}{10} = 31,113 ;$$

Постійні часу T_2 , T_{1e} с:

$$T_2 = \frac{L_r}{R_r};$$

$$T_2 = \frac{0,219}{1,731} = 0,127.$$

$$T_{1e} = \sigma \cdot \frac{L_s}{R_{1e}};$$

$$T_{1e} = 0,093 \cdot \frac{0,216}{4,355} = 0,00461.$$

Коефіцієнт зворотнього зв'язку за потоком $k_{O.II}$, В/Вб:

$$k_{O.II} = \frac{U_{H.3}}{\Psi_{26}};$$

$$k_{O.II} = \frac{10}{0,897} = 11,148.$$

Стала часу регулятора швидкості, T_{II1} , с:

$$T_{II1} = \frac{k_{O.C.1} \cdot 2 \cdot T_{II} \cdot k_{II}}{R_{1e}};$$

$$T_{II1} = \frac{1,088 \cdot 2 \cdot 0,001 \cdot 31,113}{4,355} = 0,016.$$

Передаточна функція регулятора швидкості $W_{PII1}(p)$:

$$W_{PII1}(p) = \frac{T_{1e} \cdot p + 1}{T_{II1} \cdot p};$$

$$W_{PII1}(p) = \frac{0,00461 \cdot p + 1}{0,016 \cdot p}.$$

Стала часу регулятора ЕДС T_{EI2} , с:

$$T_{EI2} = \frac{k_{O.C.2} \cdot 2 \cdot T_{II} \cdot k_{II}}{R_{1e}};$$

$$T_{EI2} = \frac{0,121 \cdot 2 \cdot 0,001 \cdot 31,113}{4,355} = 0,017.$$

Передаточна функція регулятора ЕДС, $W_{PE2}(p)$:

$$W_{PE2}(p) = \frac{T_{1e} \cdot p + 1}{T_{II2} \cdot p};$$

$$W_{PE2}(p) = \frac{0,00461 \cdot p + 1}{0,017 \cdot p}.$$

Стала часу регулятора потоку T_{III} , с:

$$T_{\text{II}} = \frac{k_{\text{O.П.}} \cdot 4 \cdot T_{\text{II}} \cdot L_m}{k_{\text{O.C.1}}};$$

$$T_{\text{II}} = \frac{11,148 \cdot 4 \cdot 0,001 \cdot 0,207}{1,088} = 0,00848.$$

Передаточна функція регулятора потоку, $W_{\text{рп}}(p)$:

$$W_{\text{рп}}(p) = \frac{T_2 \cdot p + 1}{T_{\text{II}} \cdot p};$$

$$W_{\text{рп}}(p) = \frac{0,127 \cdot p + 1}{0,00848 \cdot p}.$$

Розрахунок передаточної функції регулятора швидкості $W_{\text{рш}} :$

$$W_{\text{рш}}(p) = k_{\text{рш}} = \frac{k_{\text{O.П.}} \cdot k_{\text{O.T.}} \cdot J_{\Sigma}}{3 \cdot Z_p \cdot k_r \cdot 2 \cdot T_{\text{II}} \cdot k_{\text{O.C.}}};$$

$$W_{\text{рш}}(p) = \frac{10,987 \cdot 0,121 \cdot 0,44}{3 \cdot 2 \cdot 0,961 \cdot 2 \cdot 0,001 \cdot 0,064} = 793.$$

Після розрахунку всіх величин, що входять в структурну схему, необхідно ввести їх у модель векторної системи керування. Зробимо моделювання векторної системи керування. На рисунку 3.3 представлена модель системи.

3.3 Аналіз чутливості електроприводу до зміни параметрів двигуна і затримок перемикання інвертора

Структурна схема математичної моделі представлена на рисунку 3.3.

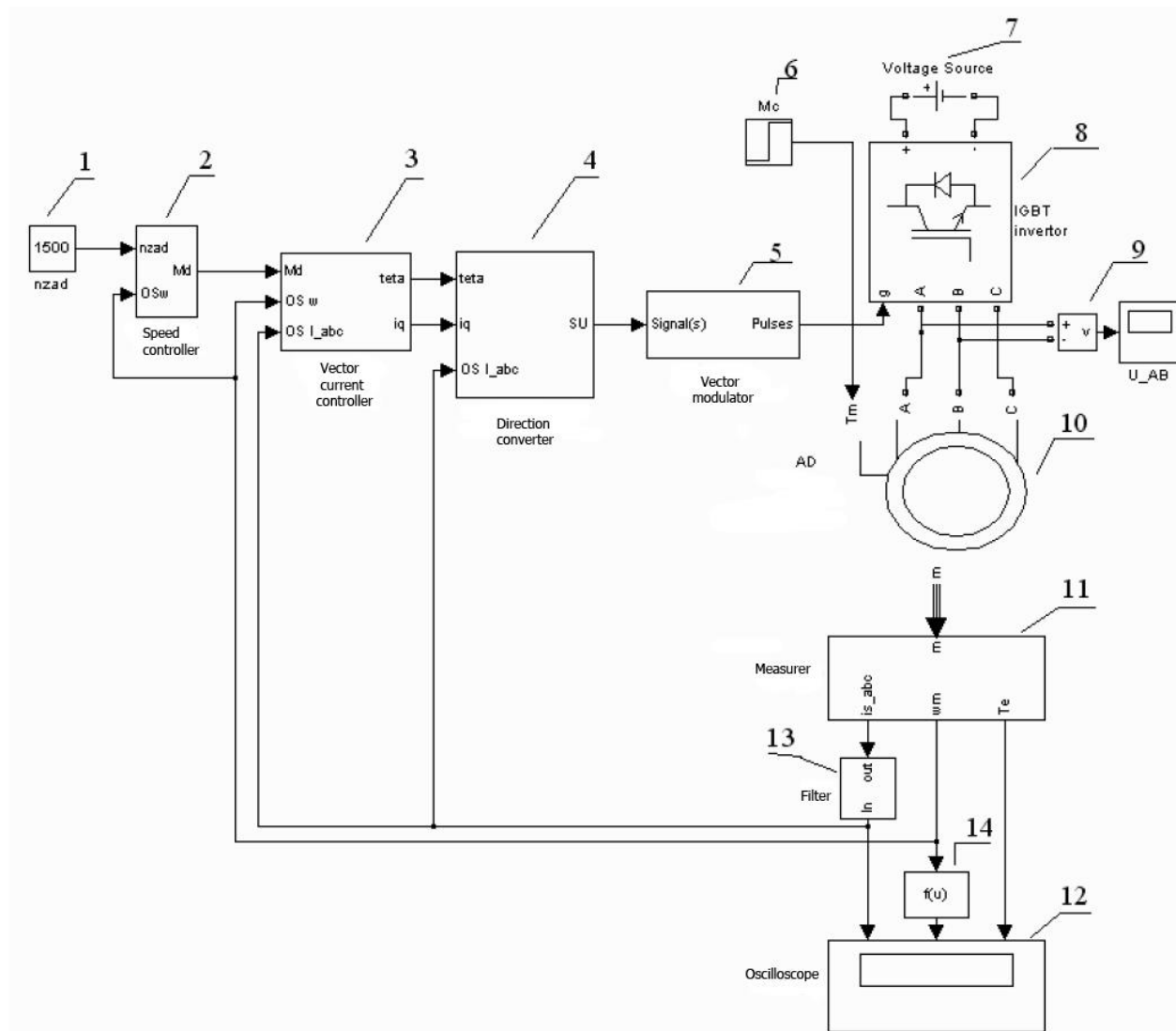


Рисунок 3.3 - Структурна схема математичної моделі адаптивно-векторної системи керування асинхронними ЕП

Структурна схема математичної моделі складається з: 1 - пристрій завдання частоти обертання ротора АД; 2 - регулятор швидкості; 3 - векторний регулятор струмів; 4 - перетворювач напруги; 5 - векторний модулятор; 6 - пристрій завдання статичного моменту навантаження АД; 7 - джерело живлення; 8 - керований IGBT інвертор; 9 - вольтметр; 10 - асинхронний двигун; 11 - вимірювальний пристрій; 12 - осцилограф, що показує криві зміни частоти обертання ротора та струму статора АД у часі; 13 - фільтр струму статора; 14 - функціональний блок.

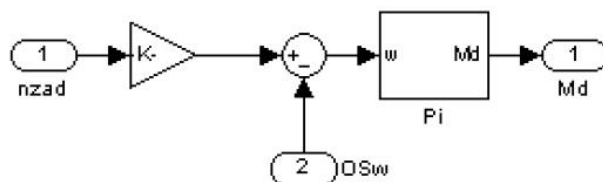


Рисунок 3.4 – Структура моделі регулятора швидкості

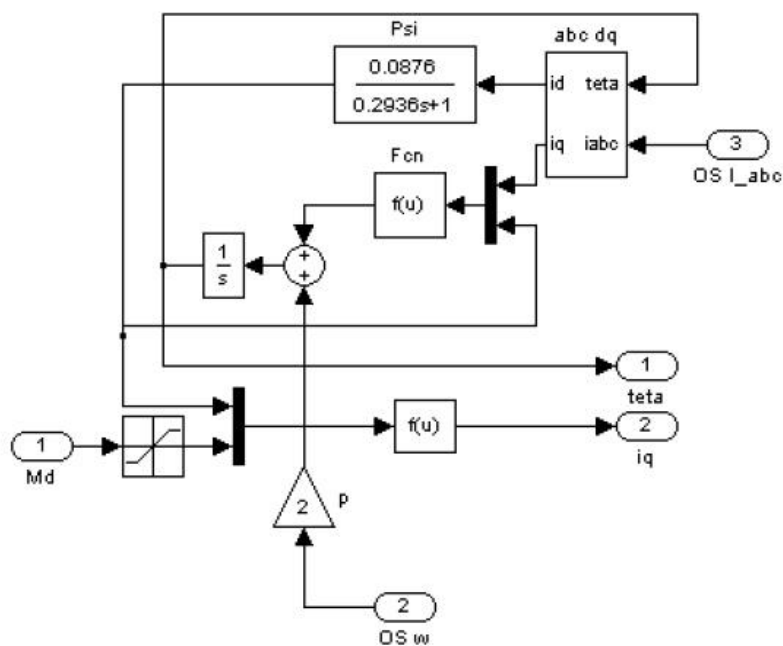


Рисунок 3.5 – Структура моделі векторного регулятора струму

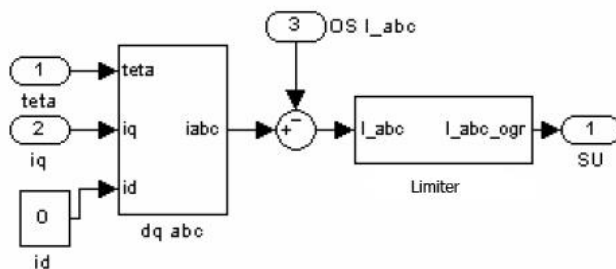


Рисунок 3.6 – Структура моделі перетворювача напруги

На рисунку 3.7 показано вплив відхилень R_s , L_m , R_r на похибку обчислення швидкості

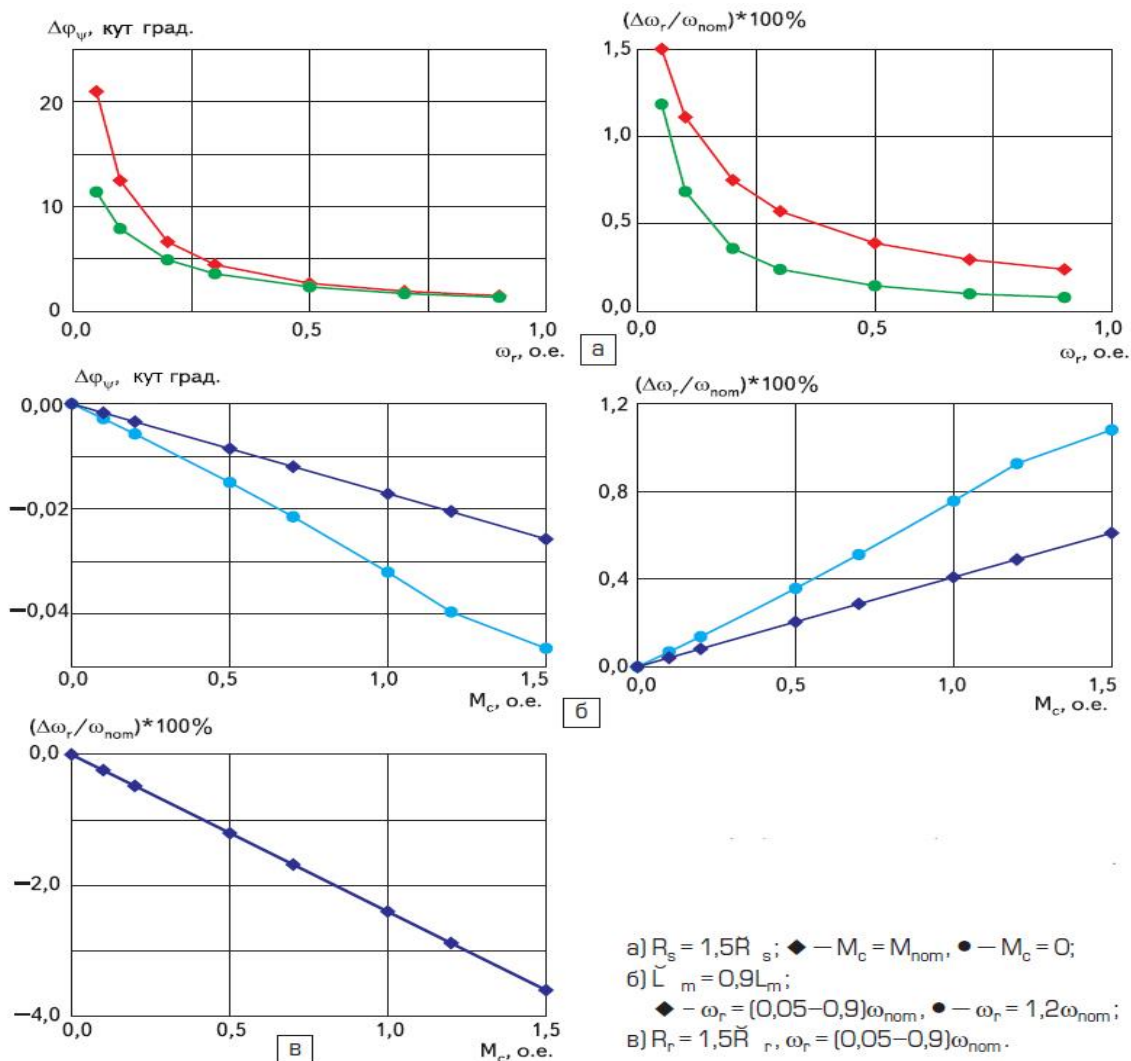


Рисунок 3.7 - Графіки помилок в орієнтації системи керування і обчислення швидкості при варіації параметрів двигуна, рівня швидкості та навантаження.

Аналіз чутливості виконувався щодо електромагнітних параметрів двигуна, найбільш схильних зміні в процесі роботи приводу. До таких параметрів належать активні опори фаз статора і ротора, схильні до температурних змін, і взаємна індуктивність, що змінюється у зв'язку з ефектом насичення магнітної системи двигуна потоком взаємоіндукції. Для аналізу використовувалася математична модель електроприводу з базовою структурою системи бездатчикового векторного керування.

$\Delta \omega_r = \omega_r - \tilde{\omega}_r$ і кутового положення вектора потокозчеплення ротора $\Delta \varphi_\psi = \varphi_\psi - \tilde{\varphi}_\psi$ до електроприводу з двигуном 4A112MA6УЗ. Значення відхилень параметрів обрані такими, що цілком можуть зустрічатися в робочих режимах приводу, а саме 50 % -ве збільшення активних опорів двигуна щодо їх значень, отриманих в холодному стані, і 10 %-ве збільшення взаємної індуктивності,

викликане ослабленням поля щодо його стану в номінальному режимі. На рисунку 3.8 для того ж двигуна показано вплив відхилень у активному опорі статора на динамічні процеси відпрацювання ступеневої зміни сигналу завдання за швидкістю.

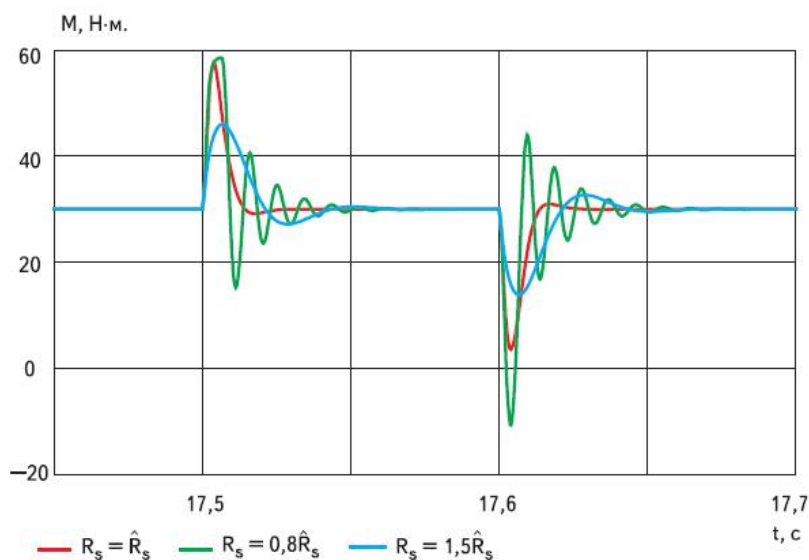


Рисунок 3.8 – Часові діаграми швидкості момента в режимі ступінчастого скидання/накидання задання по швидкості з рівня 50 рад/с до рівня 55 рад/с, отриманні при варіаціях R_s

На рисунках 3.9, 3.10 показані динамічні процеси в режимах реверсу та пуску двигуна та процеси в режимі ступічантого накидання номінального момента навантаження на швидкості.

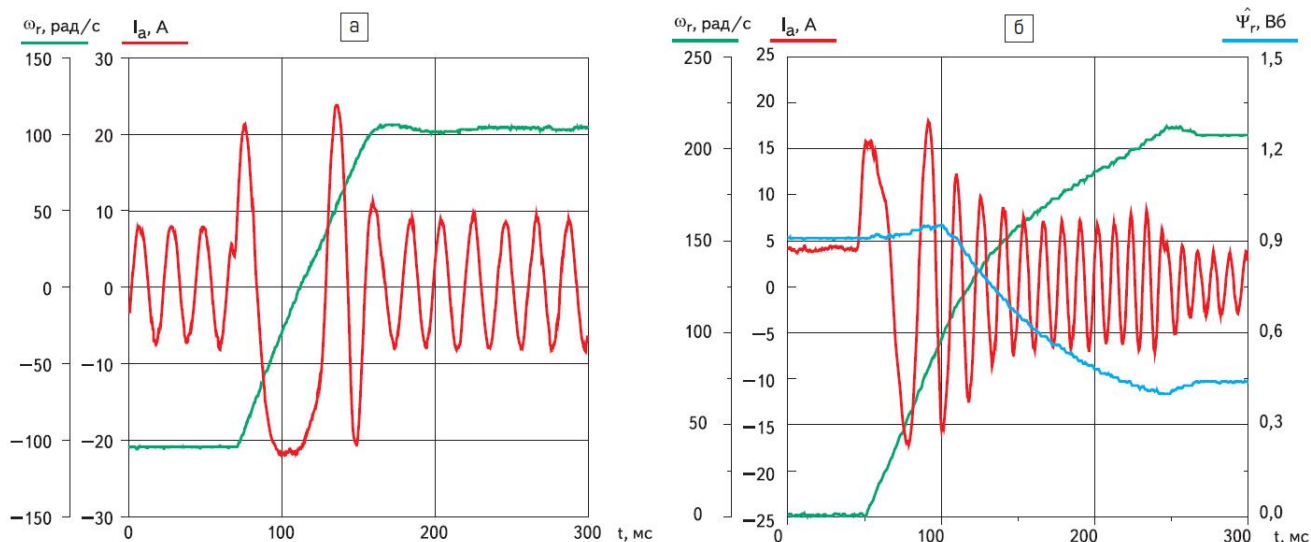


Рисунок 3.9 – Динамічні процеси в режимах реверса та пуску двигуна:

а) швидкість та струм фази А статора при реверсі швидкості $\omega_r = \omega_{nom}$;

б) швидкість, струм фази А статора, модуль оцінки потокозчеплення ротора при пуску на швидкість $\omega_r = 2\omega_{nom}$.

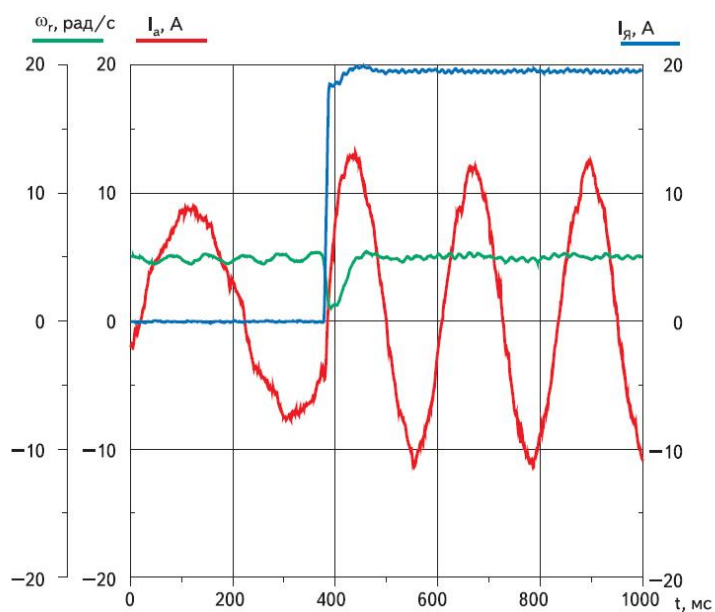


Рисунок 3.10 – Процеси в режимі ступічаного накидання номінального моменту навантаження на швидкості $\omega_r = 0,05\omega_{nom}$

3.4 Побудова перехідних процесів системи

3.4.1 Режим «Пуск»

Криві, що характеризують динаміку роботи системи адаптивно - векторного керування асинхронним електроприводом в режимі «ПУСК», представлені на рисинку 3.11.

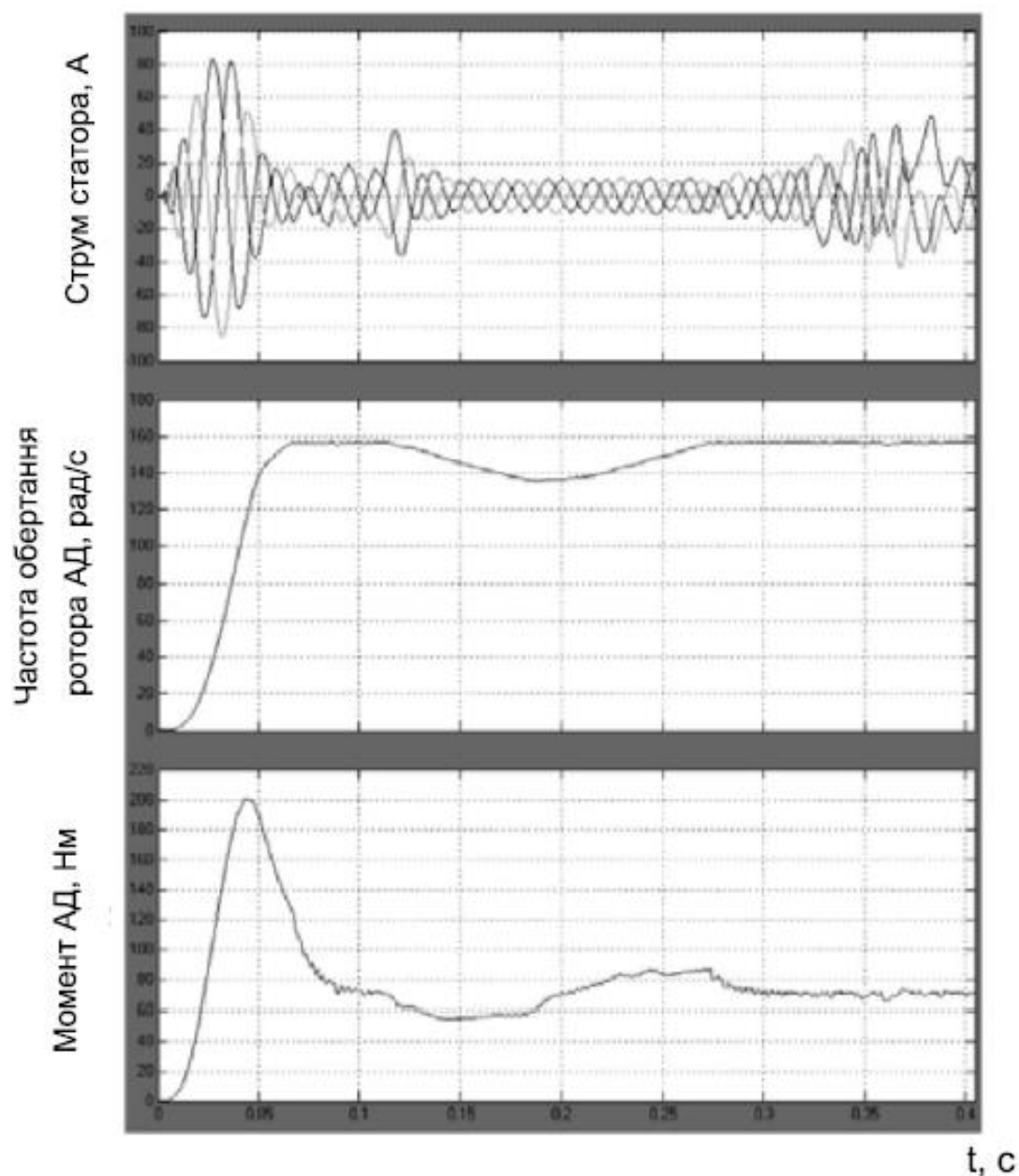


Рисунок 3.11 - Динаміка роботи системи адаптивно-векторного керування асинхронним електроприводом в режимі «ПУСК»

Як видно з рисунка 3.11. в початковий момент часу безпосередньо при пуску двигуна, спостерігається різкий скачок струму статора. Для полегшення пуску двигуна момент навантаження необхідно подавати на розігнаний двигун.

3.4.2 Режим зміни сигналу завдання швидкості

Досліджуємо дану систему на придатність відпрацювання змінюючого в часі сигналу завдання частоти обертання АД . Криві, що характеризують динаміку даного режиму роботи, і сигнал завдання представлені на рисунку 4.10.

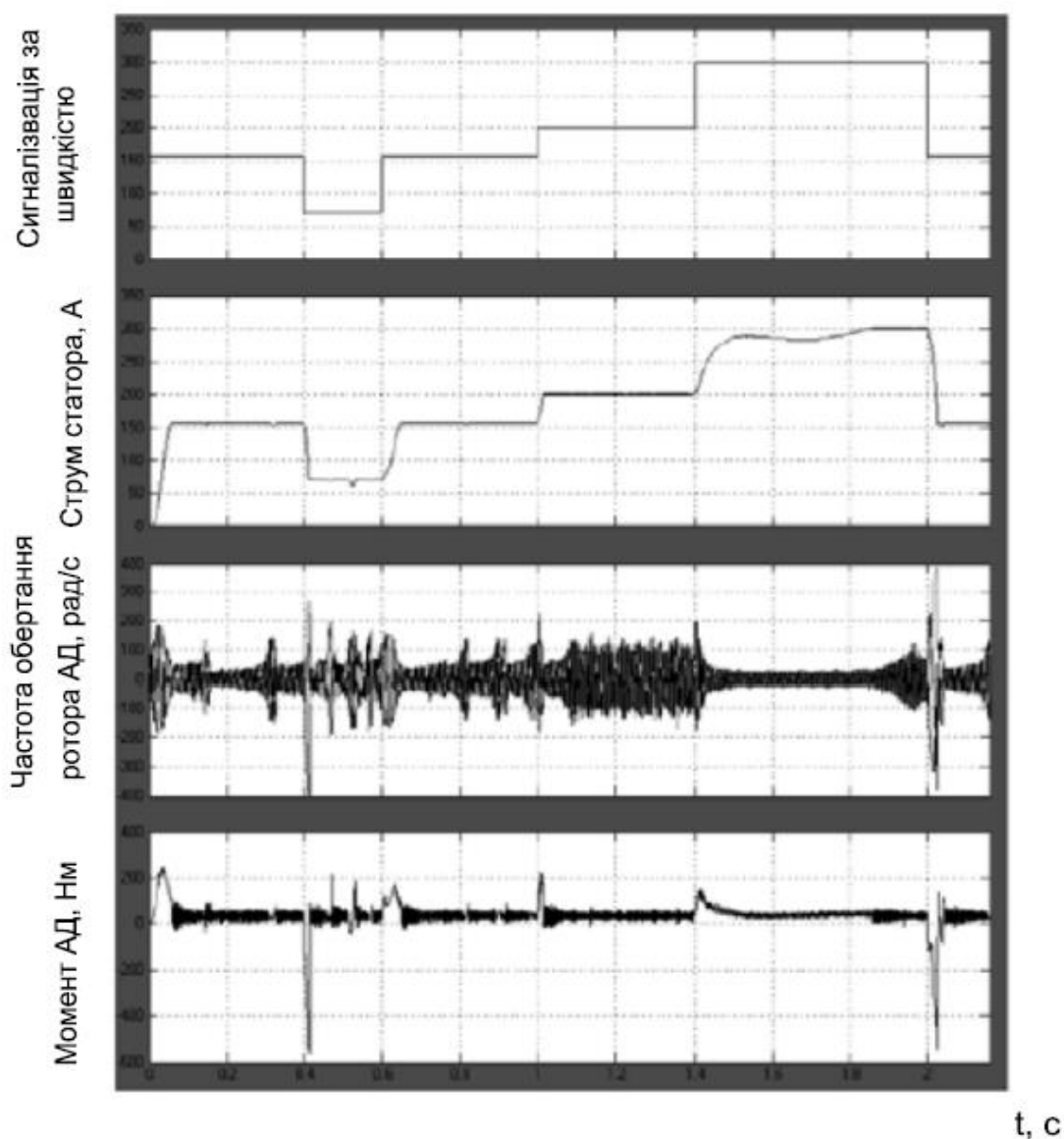


Рисунок 3.12 – Криві характеризуючі динаміку роботи привода

З нього випливає, що система повністю відпрацьовує сигнал завдання, дозволяє швидко регулювати частоти обертання вала двигуна. Так само система

передбачає можливість короткочасного перевищення частоти обертання вала двигуна над номінальним значенням.

3.4.3 Режим «Перевантаження»

Крива зміни моменту навантаження і динаміка режиму «перевантаження» показана на рисунку 3.13.

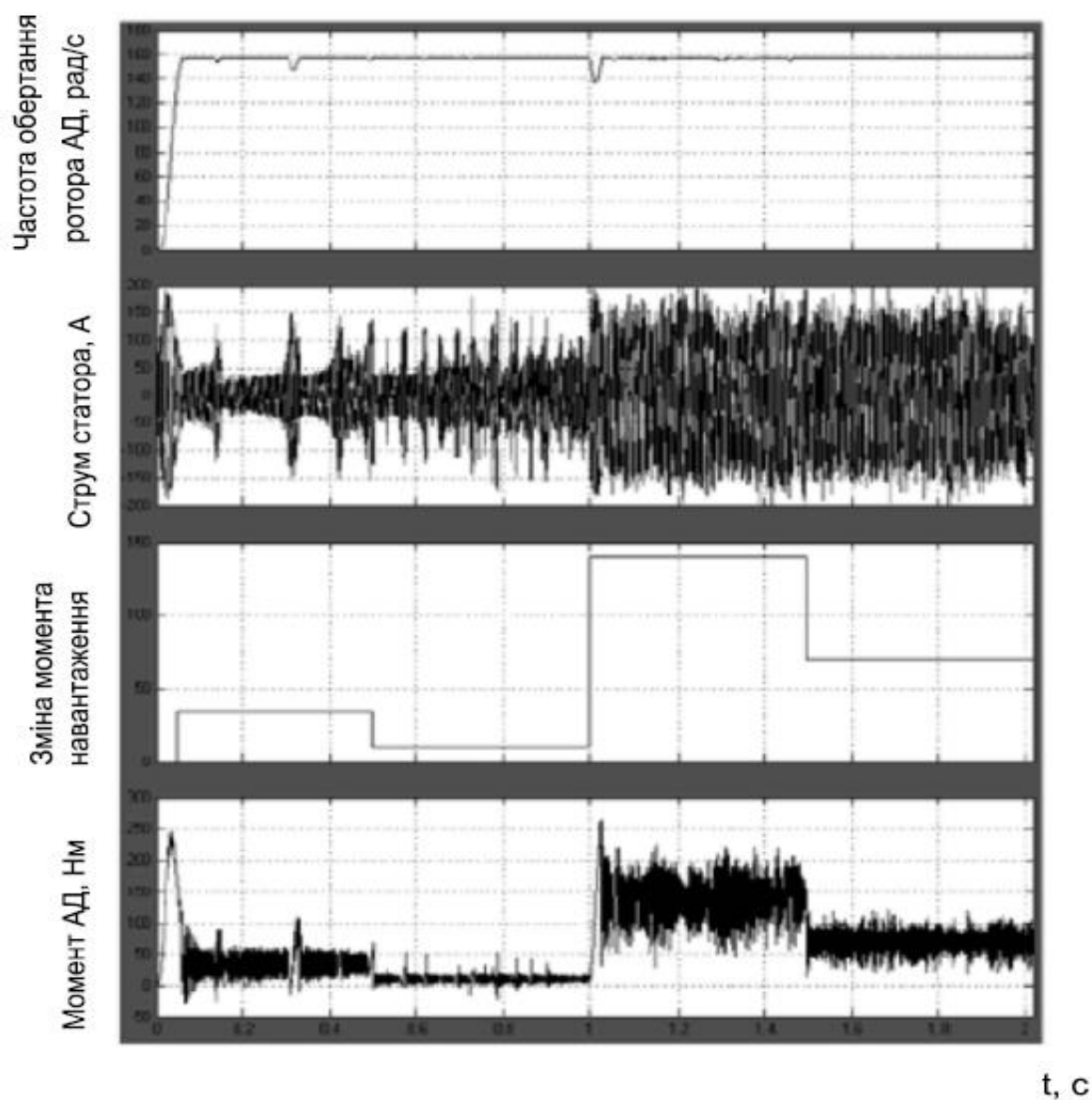


Рисунок 3.13 – Робота ЕП в режимі «Перевантаження»

При використанні адаптивно - векторної системи керування допускається короткочасні перевантаження.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Основою законодавства України з охорони праці є Конституція України, що гарантує громадянам право на безпечні та здорові умови праці та система законодавчих актів України, спрямованих на реалізацію цього конституційного права.

Основними законодавчими актами цієї системи є наступні Закони України:

- «Про охорону праці».
- «Про охорону здоров'я».
- «Про пожежну безпеку».
- «Про обов'язкове державне соціальне страхування від нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання, які спричинили втрату працездатності».
- «Про використання ядерної енергії та радіаційний захист».
- «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення».
- «Про цивільну оборону».
- Кодекс законів «Про працю України».

У наведеній вище системі законодавчих актів основна роль відводиться Закону «Про охорону праці» (редакція від 2002 р.). Цей закон визначає основні положення щодо реалізації конституційного права громадян на охорону їх життя і здоров'я в процесі трудової діяльності, регулює за участю відповідних державних органів відносини між власником підприємства і працівником з питань безпеки праці, виробничої санітарії, встановлює єдиний порядок організації охорони праці у виробничій сфері в Україні.

Дія Закону України «Про охорону праці» поширюється на всі підприємства, установи, організації незалежно від форм власності та видів діяльності, які використовують найману працю, та на всіх працюючих.

Закон визначає основні принципи державної політики в галузі охорони праці, серед яких головне місце займають:

- пріоритет життя і здоров'я працівників по відношенню до результатів виробничої діяльності підприємства;

- повна відповідальність власника підприємства щодо створення безпечних і нешкідливих умов праці;
- соціальний захист працівників;
- повне відшкодування шкоди особам, потерпілим на виробництві від нещасних випадків або професійних захворювань.

Окремо виділені статті Закону, присвячені регулюванню охорони праці жінок, неповнолітніх, інвалідів, видів відповідальності за порушення законодавства та нормативних актів про охорону праці, за створення перешкод для діяльності посадових осіб органів державного нагляду за охороною праці та представників профспілок.

4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих факторів

Як відомо, умови роботи людини визначаються сукупністю різних факторів, невід'ємною частиною яких є санітарно-гігієнічні умови праці. Таким чином, особливості виробничого середовища можуть і негативно впливати на стан здоров'я і працездатності працюючих. Такі особливості виробничого середовища або робочого місця називаються професійною шкідливістю.

Комплекс шкідливих виробничих факторів класифікується за природою дії на організм людини на наступні групи:

- 1 - фізичні;
- 2 - хімічні;
- 3 - біологічні;
- 4 - психофізичні.

Фізичні шкідливі виробничі фактори - підвищена запиленість, загазованість повітря робочої зони, його підвищена або знижена температура, тиск, відносна вологість, швидкість руху повітря, недостатня або надмірна освітленість робочої зони, підвищені рівні електромагнітних полів (ЕМП), іонізуючих випромінювань (ІВ), шуму, вібрації, інфразвукових, ультразвукових коливань, підвищена напруга в електричному ланцюзі, замикання якого може відбутися через тіло людини, та ін.

Перераховані фактори цієї підгрупи можуть викликати різні захворювання:

- запиленість повітря - захворювання органів дихання (так звані пневмоконіози), астму, ураження шкірних і слизових оболонок;

- підвищена або знижена температура повітря - теплові удари, обмороження, порушення обміну речовин, зневоднення організму;

- підвищений або знижений тиск - кесонна хвороба, яка полягає в перенасичення тканин організму людини азотом при підвищеному тиску і проявляється в ломота в тілі, запаморочення, розлад координації рухів і т. п.;

- підвищена або знижена відносна вологість повітря – простудні захворювання;

- недостатня або надмірна освітленість - розвиток короткозорості, зниження гостроти зору;

- підвищений рівень шуму, вібрації - зниження слуху, неврози, розвиток вібраційної хвороби (порушення кровообігу, поява болю в кінцівках, зниження температурної, больової чутливості) і т. д.

Хімічні шкідливі виробничі фактори - загальнотоксичні, дратівливі, канцерогенні, сенсibiliзуючі та ін. (ацетон, бензин, масла і т. п.).

Ця група негативних виробничих факторів може приводити до загального отруєння організму людини, ураження слизових оболонок або шкірного покриву, викликати онкологічні захворювання, підвищення реакційної здатності клітин живих тканин тіла людини та ін.

Психофізичні шкідливі виробничі фактори підрозділяють, у свою чергу, на дві підгрупи: фізичні перевантаження і нервово-психічні перевантаження.

До фізичних перевантажень відносяться статичні, динамічні перевантаження, гіподинамія. До нервово-психічних – розумове перенапруження, монотонність праці, емоційні перевантаження.

На ділянці роботи з верстатом основними чинниками, які впливають на самопочуття і здоров'я людей, є наступні:

- небезпека ураження електричним струмом;
- травматизм;
- шкідливі впливу шуму та вібрацій;
- параметри мікроклімату;

- небезпека виникнення пожежі;
- недостатнє або надмірне освітлення;
- запиленість приміщення.

Через велику кількість електричних пристроїв на ділянці роботи оператора, умови праці можна віднести за ступенем ураження електричним струмом до категорії приміщень з підвищеною небезпекою.

Електричний струм, що протікає через тіло людини, призводить до виникнення в ньому таких основних процесів:

- безпосереднє роздратування і збудження живих тканин (м'язів, нервових волокон, серцево-судинної системи). Цей процес можливий у тому випадку, коли шлях протікання струму пролягає безпосередньо через живі тканини організму людини;

- рефлекторне (непряме) збудження тканин, що є наслідком дії електричного струму на ЦНС;

- посилення процесу збудження тканин, виникнення неадекватних і недоцільних команд центральної нервової системи в результаті накладення електричного струму на процеси поширення біострумів;

- перетворення електричної енергії в теплову при проходженні електричного струму через живі тканини, які характеризуються певним електричним опором.

В результаті цього, протікання електричного струму через організм людини являє собою складний процес, який супроводжується значним спектром фізико-біологічних і хімічних реакцій, основними з яких є термічна, електролітична, механічна та біологічна.

Травма - порушення анатомічної цілісності організму людини або його функцій внаслідок дії небезпечних виробничих факторів. На виробництві травми (нещасні випадки) головним чином стаються внаслідок непередбаченої дії на робітника небезпечного виробничого фактору при виконанні ним своїх трудових обов'язків.

Механічні та фізичні фактори переважно викликають травми. Теплові, хімічні, біологічні та психофізіологічні у більшості випадків зумовлюють захворювання.

Однак, різкої межі за характером дії на організм людини між згаданими факторами немає.

Шум являє собою сукупність звукових хвиль. Звукові хвилі - це коливальні зміни тиску повітря - скупчення та розрідження. Фізичними характеристиками звукових хвиль є: інтенсивність, спектр та часові характеристики.

Шуми турбують, дратують людину і можуть спричинити шкоду здоров'ю. Захисна реакція людини на шум зумовлена виникненням надмірних процесів збудження або гальмування в центральній нервовій системі (ЦНС).

Велика кількість звукових сигналів, що поступають до кори головного мозку, викликають переживання, страх, передчасну втому. Дія шуму на людину виражається в широкому діапазоні - від суб'єктивного роздратування до об'єктивних змін в ЦНС, органах слуху, серцево-судинних та ендокринній системах, травному акті та інших органів і систем. Першим показником шкідливої дії шуму є скарги на роздратованість, переживання, порушення сну.

Вібрація - механічні коливання, що виникають у пружних тілах та передаються на тіло людини.

Залежно від тривалості, інтенсивності дії, частоти, а також умов праці вібрація спричиняє стійкі патологічні зміни в нервовій системі (порушення процесів збудження та гальмування), опорно-руховому апараті (деформація суглобів, втрата сили м'язів) та кровоносній системі (звуження або розширення периферійних судин).

Особливо небезпечними для людини є коливання з частотою 4-8 Гц, що збігаються з власною частотою коливань ряду внутрішніх органів, які пружно закріплені на скелеті (серце, печінка, нирки та ін.), і близько 30 Гц (частота власних коливань тіла людини).

Найбільш шкідливим для людини є одночасний вплив вібрації, шуму та низької температури, а оскільки у виробничих умовах шум та вібрація є супутниками, то їхній спільний вплив може призвести до професійного захворювання - віброшумової хвороби. Ця хвороба тяжко піддається лікуванню і може стати причиною інвалідності. Особливо небезпечною ця хвороба є для жінок через ризик втрати репродуктивної функції.

Параметри мікроклімату - температура, вологість та рух повітря- належать до числа найбільш значних, що встановлюють комфорт в приміщенні. Вплив на людину тих чи інших факторів створює різноманітні умови теплообміну організму з навколишнім середовищем та забезпечує певне функціональне теплове становище. Мікрокліматичні фактори впливають на репарацію ДНК, на активність генів теплового шоку.

Температура повітря дуже впливає на самопочуття людини і продуктивність праці. Висока температура повітря (30-35°C) у виробничих приміщеннях при збереженні інших параметрів викликає швидку стомлюваність працівника, перегрів організму та сильне потовиділення.

У важких випадках при підвищеній температурі навколишнього повітря настає тепловий, а при роботі на відкритому повітрі — сонячний удар. Можлива судомна хвороба, яка є наслідком порушення водно-сольового балансу і характеризується слабкістю, головним болем, різкими судомами, переважно в

кінцівках.

Інтенсивне потовиділення (до 6-10 л за зміну) при роботі в умовах впливу високої температури повітря (гарячі цехи) призводить до зневоднювання організму, втрати мінеральних солей і водорозчинних вітамінів (С, В1, В2). При важкій роботі в умовах високої температури може виділитися з потом до 50-60 г солі NaCl замість 10 г у нормальних умовах (усього в організмі людини міститься близько 140 г NaCl).

Можлива дія на організм і зниженої температури повітря. У неопалюваних робочих приміщеннях у прохолодну пору року. Тривалий і сильний вплив низьких температур може викликати різні несприятливі зміни в організмі людини. Місцеве і загальне охолодження організму є причиною багатьох захворювань: міозитів, невритів, радикулітів, а також застудних захворювань. Будь-який ступінь охолодження призводить до зниження частоти серцевих скорочень і розвитку процесів гальмування в корі головного мозку, що веде до зниження працездатності. При переохолодженні тіла до $+24^{\circ}\text{C}$ настає смерть.

Вологість дуже впливає на організм людини, на його терморегуляцію. Надлишкова вологість (понад 80%) ускладнює випаровування вологи з поверхні шкіри. Це може призвести до погіршення загального стану і зниження працездатності людини. Підвищена вологість повітря (понад 75-85%) у сполученні з низькими температурами чинить значний охолоджуючий вплив, а в поєднанні з високими викликає перегрівання організму. Знижена відносна вологість (нижче 18-20%) також є несприятливою для людини, оскільки призводить до висихання слизових оболонок і зниження захисної функції верхніх дихальних шляхів.

Швидкість повітря на робочих місцях у виробничих приміщеннях має велике значення для створення сприятливих умов праці. Треба зазначити, що організм людини починає відчувати повітряні потоки при швидкості близько 0,15 м/с. Причому якщо ці повітряні потоки мають температуру до 36°C , вони освіжають людину, а при температурах вище 40°C - пригнічують. У зимовий час швидкість руху повітря не повинна перевищувати 0,2...0,5 м/с, а влітку 0,2... 1,0 м/с. У гарячих цехах допускається збільшення швидкості обдуву робітників (повітряне душення) до 3,5 м/с.

Освітлення впливає не лише на функцію зору, а й на діяльність організму в

цілому: посилюється обмін речовин, збільшується поглинання кисню і виділення вуглекислого газу. Відомий сприятливий вплив природного освітлення на скелетну мускулатуру.

Недостатня або надмірна освітленість, нерівномірність освітлення в полі зору втомлює очі, погіршує гостроту зору, призводить до зниження продуктивності праці; при цьому зростає потенційна небезпека помилкових дій і нещасних випадків. Надмірна яскравість джерел світла може спричинити головний біль, різь в очах, розлад гостроти зору; світлові відблиски – тимчасове засліплення.

Пил різного походження, що утвориться внаслідок механічної дії на тверді тіла подрібненням, розмелюванням, розтиранням, при завантажувально-розвантажувальних, вибухових, зварних, земляних та інших роботах, згубно діє на органи дихання, очі і шкіру людини. Пил класифікується за ступенем дисперсності, за речовиною, шкідливістю для організму, вибухонебезпечністю.

За характером дії на організм людини пил поділяється на подразнюючий і токсичний. Проникаючи в легені і лімфатичні залози, він спричинює захворювання - пневмоконіоз, силікоз. Може проявлятися механічна дія пилу у вигляді шкірних гноячкових захворювань і подразнення слизових оболонок очей - кон'юнктивіт.

4.2 Розрахунок загального освітлення

В даному розділі проведений розрахунок загального освітлення цеху, довжина якої $A = 10$ м, ширина $B = 7$ м, висота $H = 3$ м, висота робочої поверхні $h_p = 0,8$ м. Будівля з побілені стелею, побіленими стінами при незавішених вікнах, з темною робочою поверхнею, напруга мережі 220 В.

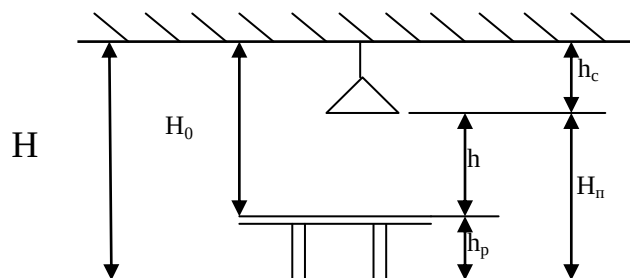


Рисунок 7.1 - Розміщення світильників в цеху

Вибираємо тип світильника з люмінесцентною лампою - ПВЛМ.

Знаходимо відстань від стелі до робочої поверхні:

$$H_0 = H - h_p = 3 - 0,8 = 2,2 \text{ м}$$

Від стелі до світильника:

$$h_c = (0,2 \dots 0,25) \cdot H_0 = 0,2 \cdot 2,2 = 0,44 \text{ м}$$

Від світильника до освітлюваної поверхні:

$$h = H_0 - h_c = 2,2 - 0,44 = 1,76 \text{ м}$$

Висота підвісу світильника над підлогою:

$$H_{\pi} = h + h_p = 1,76 + 0,8 = 2,56 \text{ м}$$

Відстань між центрами світильників:

$$L = 1,6 \cdot h = 2,8 \text{ м}$$

Необхідна кількість світильників:

$$N = \frac{S}{L^2} = \frac{A \cdot B}{L^2} = \frac{10 \cdot 7}{(2,8)^2} = 8,93 \approx 9$$

Оптимальне число рядів:

$$\frac{B}{L} = \frac{7}{2,8} = 2,5 \approx 3$$

Приймаємо 3 ряди , тобто 2 відстані:

$$2 \cdot L = 2 \cdot 2,8 = 5,6 < B$$

Знаходимо кількість світильників в одному ряду:

$$\frac{A}{L} = \frac{10}{2,8} = 3,57 \approx 4$$

Приймаємо 4 світильника, тобто 3 відстані:

$$3 \cdot L = 3 \cdot 2,8 = 8,4 < A$$

Кількість світильників: $3 \cdot 4 = 12$ шт.

Відстань від стіни до центру світильника:

$$l = (0,25 \dots 0,3) \cdot L = 0,3 \cdot 2,8 = 0,84$$

$$l = (0,4 \dots 0,5) \cdot L = 0,4 \cdot 2,8 = 1,12$$

Індекс приміщення:

$$i = (A \cdot B) / (h \cdot (A + B)) = (10 \cdot 7) / (1,76 \cdot (10 + 7)) = 2,34$$

Коефіцієнти відбиття: $\rho_{ст} = 70\%$, $\rho_c = 50\%$, $\rho_p = 10\%$.

Для світильника ПВЛМ коефіцієнт використання світлового потоку при $i = 2,34$, $\rho_{ст} = 70\%$, $\rho_c = 50\%$, $\rho_p = 10\%$:

$$\eta = 62 \% = 0,62$$

Світловий потік однієї лампи:

$$\Phi_p = \frac{E_{min} \cdot S \cdot K_z \cdot Z}{N \cdot \eta \cdot n} = \frac{300 \cdot 70 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{12 \cdot 0,62 \cdot 2} = 2330 \text{ лм}$$

По знайденому світловому потоку вибираємо лампу потужністю 40 Вт, що має світловий потік 2200 лм, близьке до розрахункового: ЛДЦ – 40.

Фактичне освітленість :

$$E_{\phi} = E_{min} \cdot \frac{\Phi_{\text{л}}}{\Phi_{\text{р}}} = 300 \cdot \frac{2200}{2330} = 283 \text{ лк}$$

Загальна потужність освітлювальної установки :

$$P_{\text{общ}} = P_{\text{л}} \cdot N \cdot n = 40 \cdot 12 \cdot 2 = 0,96 \text{ кВт}$$

4.3 Заходи безпеки та охорони праці

Залежно від джерела світла, освітлення може бути двох видів: природне і штучне.

З метою виключення небезпеки ураження електричним струмом на ділянці необхідно передбачити наступні заходи:

- покриття струмоведучих частин і відділення їх один від одного шаром діелектрика , що забезпечує протікання струму по необхідному шляху і безпечну експлуатацію установки;
- застосування захисних заземлень;
- застосування захисних відключень;
- наявність захисних діелектричних килимків біля приладів керування установкою.

Крім того на ділянці, при роботі хвильового підйомника створюється значний рівень шуму, допускаємі рівні шуму, тобто звукового тиску в ізольованих приміщеннях, вказані в ГОСТ 12.1.008-83.

Технічні засоби захисту від шкідливого впливу шуму припускають використання трьох головних напрямків:

- а) усунення причин виникнення шуму або зниження його рівня в джерелі;
- б) ослаблення шуму на шляху його поширення;
- в) індивідуальний захист працюючих.

Одним з найбільш простих рішень щодо зниження шуму на шляху його

поширення є застосування звукоізолюючих кожухів – звуко-відбиваючих або звукопоглинальних.

Звуко-відбиваючі кожухи забезпечують зниження рівня звуку за рахунок високого коефіцієнта відбиття. Такі кожухи можуть знизити рівень звукового тиску на 20 ... 25 дБ.

Звукопоглинаючі кожухи забезпечують зменшення звуку за рахунок перетворення кінетичної енергії звукових хвиль у теплову при коливанні малих об'ємів повітря в порах звукопоглинального матеріалу. Такі кожухи можуть знизити рівень звукового тиску на 20 ... 30 дБ.

Рівень вібрації на ділянці підйомника не перевищує норм встановлених за ГОСТ 121.012-78.

За організаційною ознакою заходи і засоби захисту від вібрації поділяють на заходи індивідуального та колективного захисту.

Заходи колективного захисту відношенні до джерела виникнення вібрації поділяються на:

- зниження параметрів вібрації впливом на джерело виникнення;
- зниження інтенсивності вібрації на шляху її поширення від джерела виникнення.

Вплив на джерело виникнення вібрації зводиться до зміни: конструктивних елементів джерела вібрації; характеру сил і моментів, обумовлених робочим процесом у машині, що викликають вібрацію. Використовують також методи зрівноважування окремих деталей, вузлів машин і механізмів; відбудови за частотою робочого режиму обладнання від діапазону резонансних явищ.

На шляху поширення вібрації знижують за рахунок таких технічних рішень:

- використання додаткових пристроїв, вбудованих в конструкцію машини;
- застосування покриття, що демпфує вібрацію;
- використання антифазних синхронізацій джерел вібрації.

Індивідуальні засоби захисту від впливу вібрації за місцем контакту оператора з вібруючим об'єктом поділяються на такі види:

- для рук оператора - рукавиці або рукавички з віброгасильними долоньями; віброгасильні вкладиші;

- для ніг оператора - спеціальне взуття з віброгасильною підошвою, віброгасильні наколінники;

- для тіла оператора - віброгасильні нагрудники, пояси, спеціальні костюми.

Згідно ГОСТ 12.1.004-85 пожежна безпека - це стан об'єкта , при якому виключається можливість пожежі, а у разі її виникнення запобігається вплив на людей шкідливих і небезпечних факторів пожежі і забезпечується захист матеріальних цінностей.

Небезпечними факторами пожежі є:

- відкритий вогонь та іскри;
- підвищена температура повітря, предметів і т. п.;
- токсичні продукти горіння;
- дим;
- знижена концентрація кисню;
- обвалення і пошкодження будівель, споруд, установок;
- вибухи.

До основних протипожежних заходів відносяться:

- зонування території підприємства;
- дотримання протипожежних розривів;
- пристрій протипожежних перешкод;
- забезпечення шляхів евакуації.

ВИСНОВКИ

Аналіз представлених діаграм і інших результатів дослідження чутливості дозволяє зробити наступні висновки:

- найбільш чутливий електропривод до зміни активного опору статора, яке відчутно впливає як на статичні, так і динамічні характеристики. Чутливість до зміни R_s є функцією швидкості і навантаження. Найбільш сильного впливу схильні характеристики приводу в області малих частот (менше $0,2 \omega_{\text{ном}}$), аж до втрати працездатності, що виявляється у виникненні автоколивального режиму роботи з великими пульсаціями змінних. Зокрема, при $\tilde{R}_s = 1,2R_s$, електропривод з двигуном АІР втрачає працездатність на швидкостях, менших $0,05 \omega_{\text{ном}}$;

- зміна активного опору ротора впливає на статичну помилку у швидкості і не впливає на точність орієнтації системи за вектором потокозчеплення ротора і на динамічні характеристики приводу. Статична помилка у швидкості є функцією навантаження і не залежить від рівня швидкості;

- зміна взаємної індуктивності незначно позначається на орієнтації та динамічних характеристиках приводу при роботі на швидкостях, менших номінальної. Статична помилка в швидкості зростає з ростом навантаження і при роботі з постійним потокозчеплення ротора не залежить від рівня швидкості. Чутливість приводу до зміни L_m істотно зростає на швидкості, що перевищує номінальну, аж до відмови сприймати завдання за швидкістю вище певного рівня. Зокрема, при $L_m = 0,9L_m$ електропривод з двигуном АІР не розганяється вище $1,3\omega_{\text{ном}}$;

- зміна індуктивностей розсіювання у зв'язку з насиченням зубцевої зони двигуна потоками розсіювання помітним чином проявляється при кратностях струму статора, що перевищують (2-3) від номінального значення і, як правило, не перевищує 30 %-ного зниження щодо свого ненасиченого значення, навіть при струмах прямого пуску двигунів на номінальну напругу. Результати моделювання та експерименту показали, що 50 %-ві зміни σL_s , не впливають суттєво на характеристики приводу;

- дослідження чутливості електроприводу до величини «мертвої зони» перемикання транзисторів інвертора показали, що у разі коректної параметричної настройки приводу саме наявність «мертвої зони» є чинником, що обмежує діапазон регулювання приводу вниз від номінальної швидкості. Це проявляється у зростанні на малих швидкостях низькочастотних (шестикратних по відношенню до періоду основної гармоніки) пульсацій в швидкості і в електромагнітних змінних приводу. Величина цих пульсацій зростає із збільшенням частоти модуляції і величини «мертвої зони». Причина пульсацій полягає у відхиленні реальної напруги статора від його заданого значення, сформованого без урахування тимчасових затримок перемикання ключів інвертора;

- введення в привід алгоритмів адаптації до R_s , R_r , L_m і компенсації затримок перемикання ключів інвертора дозволяє істотно поліпшити його характеристики, а саме: знизити чутливість до зміни параметрів в процесі роботи, розширити діапазон регулювання швидкості як вниз, так і вгору від номінального, знизити рівень пульсацій змінних на малих швидкостях. Дослідження чутливості електроприводу до величини «мертвої зони» перемикання транзисторів інвертора показали, що у разі коректної параметричного налагодження приводу саме наявність «мертвої зони» є чинником, що обмежує діапазон регулювання приводу вниз від номінальної швидкості. Це проявляється у зростанні на малих швидкостях низькочастотних (шестикратних по відношенню до періоду основної гармоніки) пульсацій в швидкості і в електромагнітних змінних приводу. Величина цих пульсацій зростає із збільшенням частоти модуляції і величини «мертвої зони». Причина пульсацій полягає у відхиленні реальної напруги статора від його заданого значення, сформованого без урахування тимчасових затримок перемикання ключів інвертора. Так як розрахунок змінних приводу виконується на основі заданої напруги статора, то ця помилка проявляється у всіх обчислених змінних.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Быховский Ю. И., Шеинцев Е. А. Электроприводы ваерных и траловых лебёдок. - 2-е изд., перераб. И доп.-М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1981.-208 с.
2. Ганф Л. А., Голицкер А. П. Автоматика на рыболовных судах. – М.: Пищевая промышленность, 1965. – 51 с.
3. Торбан С. С. Промысловые механизмы для комплексной механизации кошелькового лова. – М.: Пищевая промышленность, 1971. – 384 с.
4. Зайчик К. С. Промысловые устройства морских рыбопромысловых судов. – Л.: Судостроение, 1972. – 232 с.
5. Яуре А. Г., Покрасс И. И., Белый В. А. Электроприводы палубных механизмов. – Л.: Судостроение, 1967. – 315 с.
6. Гуревич М. И., Расулев Ш.А., Торбан С. С. Определение натяжения ваеров при тралении. – Рыбное хозяйство, 1975, №7.
7. Расулев Ш. А., Торбан С. С., Траубенберг Г. А. Определение натяжения ваеров в процессе выборки тралов. – Рыбное хозяйство, 1976, №8. С. 51–54.
8. Траубенберг Г. А., Торбан С. С., Расулев Ш. А. Характеристики траловых лебедок. – Рыбное хозяйство, 1977, №12. С. 44–47.
9. Архангельский Н. Система векторного управления асинхронным электроприводом с идентификатором состояния / Архангельский Н. Л., Курнышев Б. С., Виноградов А. Б., Лебедев С. К. / Электричество. 1991. № 11.
10. Виноградов А. Б. Адаптивная система векторного управления асинхронным электроприводом / Виноградов А. Б., Чистосердов В. Л., Сибирцев А. Н. / Электротехника. 2003. № 7.
11. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».– Иваново, 2008.– 298 с. ISBN.
12. Виноградов А. Б., Новая серия цифровых асинхронных электроприводов на основе векторных принципов управления и формирования переменных / Виноградов А. Б., Чистосердов В. Л., Сибирцев А. Н., Монов Д. А. /

Электротехника. 2001. № 12.

13. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с., ил.

14. Зеркалов Д.В. Охорона праці в галузі: Загальні вимоги. Навчальний посібник. – К.: «Основа», 2011. – 551 с.

15. Законодавство України про охорону праці.

16. Кацман М. М. Справочник по электрическим машинам: Учеб. пособие для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования / Марк Михайлович Кацман. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 480 с.

17. Кнорринг Г.М. Осветительные установки. – Л.: Энергоиздат, Ленингр. отделение, 1981. – 288 с., ил.

18. Кормак С.В. Борьба с загрязнением моря нефтью и химическими веществами (пер с английского). - М.: Транспорт, 1998 - 368 с.

19. Кравчик А.Э. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник. А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982 – 504 с., ил.

20. Михнюк Т.Ф. Охрана труда и основы экологии: Учебное пособие/. - Минск: Высш. шк., 2007 – 356 с.:ил.

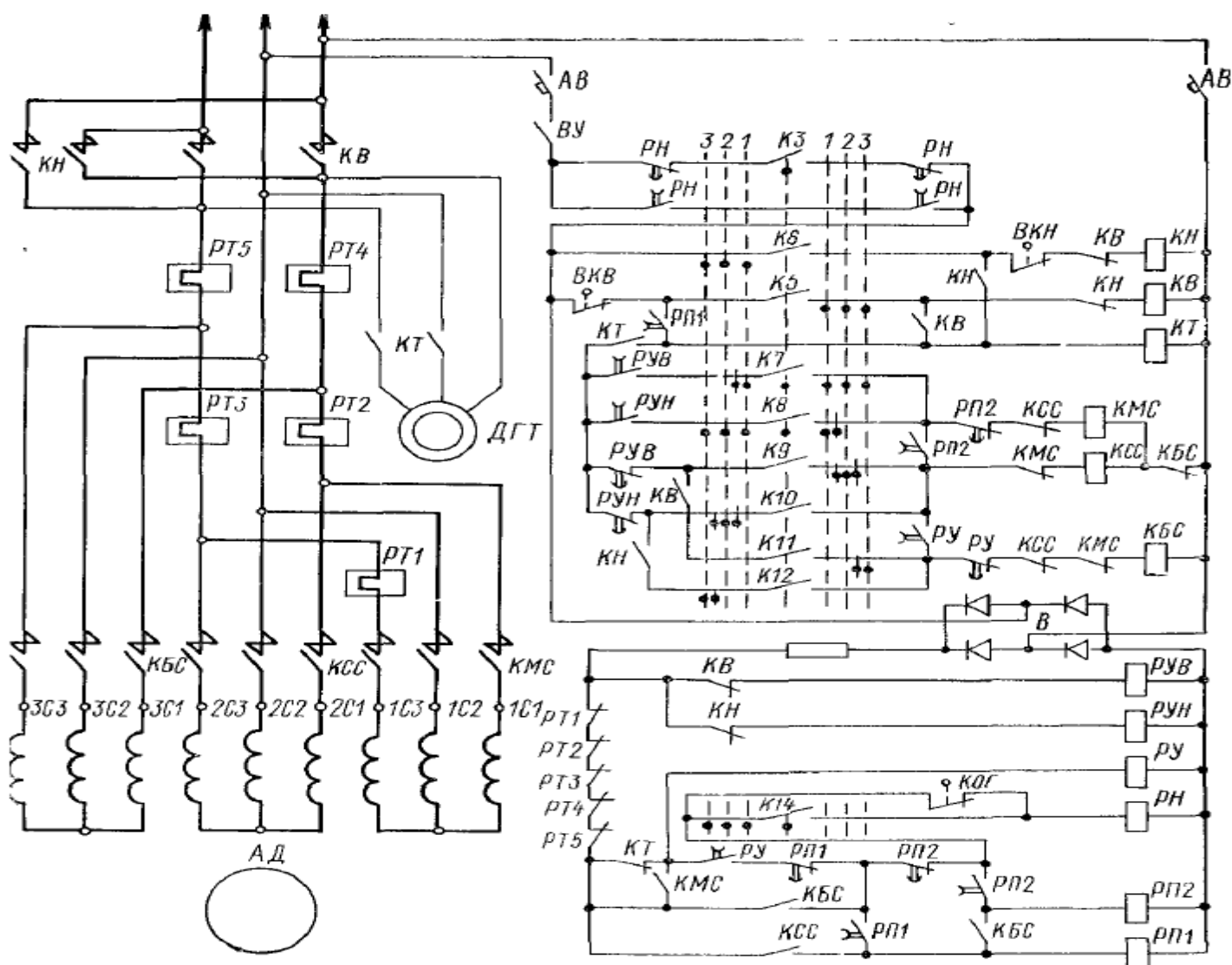
21. Терехов В.М. Системы управления электроприводов: учебник для студ. вузов/ В.М. Терехов, О.И. Осипов; под ред. В.М. Терехова. - 3-е изд., стер. - М.: Издательский центр "Академия", 2008. - 304с.

22. Электроприводы с преобразователями частоты серии ЭПВ (исполнение 4). Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Обновление: январь 2008.

23. Бездатчиковий комплектний електропривод / Кисіль А.В., Савченко О.В., Гараєв К. Р., Фоменко Л. А // Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених «Автоматика та електротехніка». –Миколаїв: НУК, 2019. – С. 59–62.

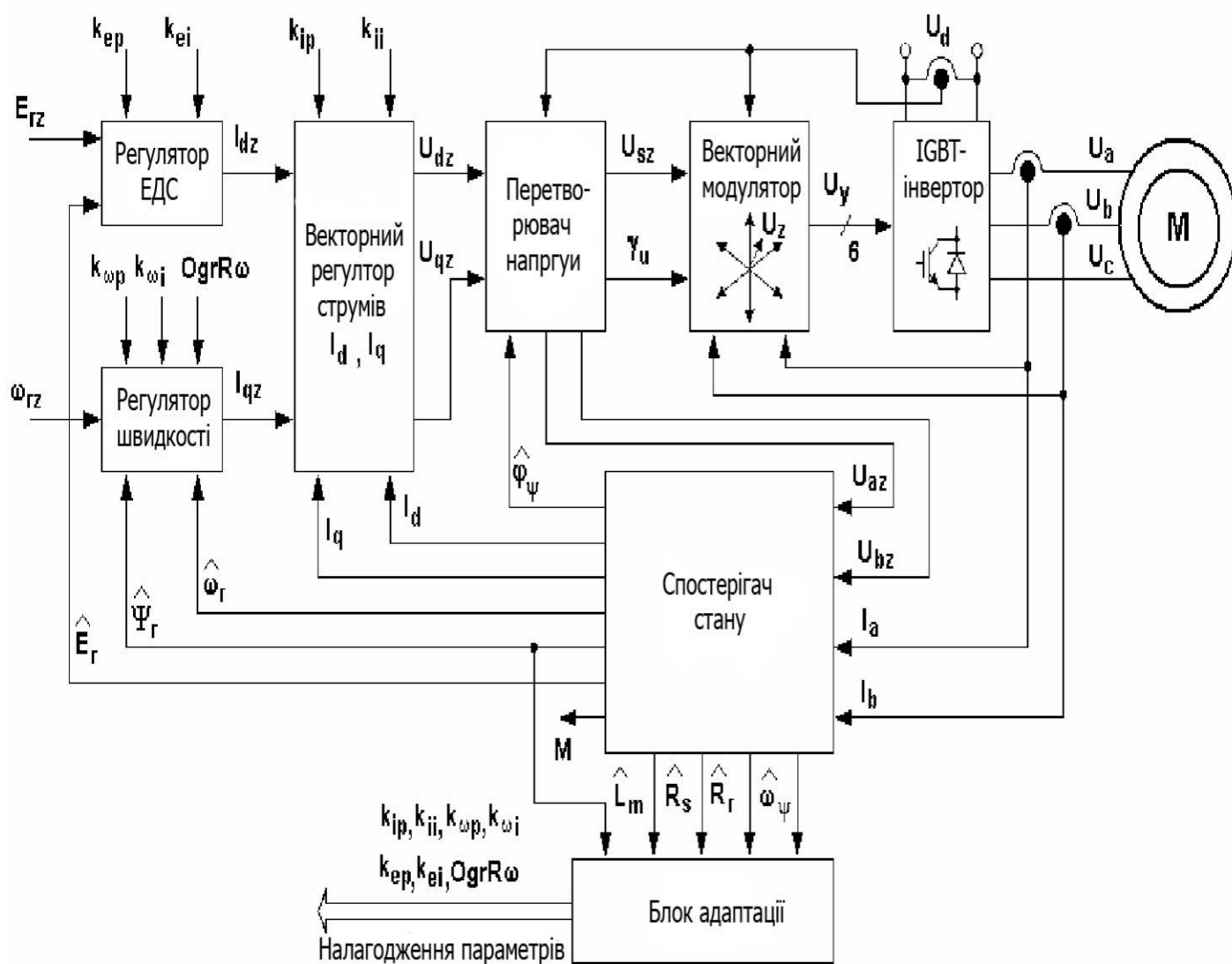
ДОДАТОК А

Мультимедійна презентація



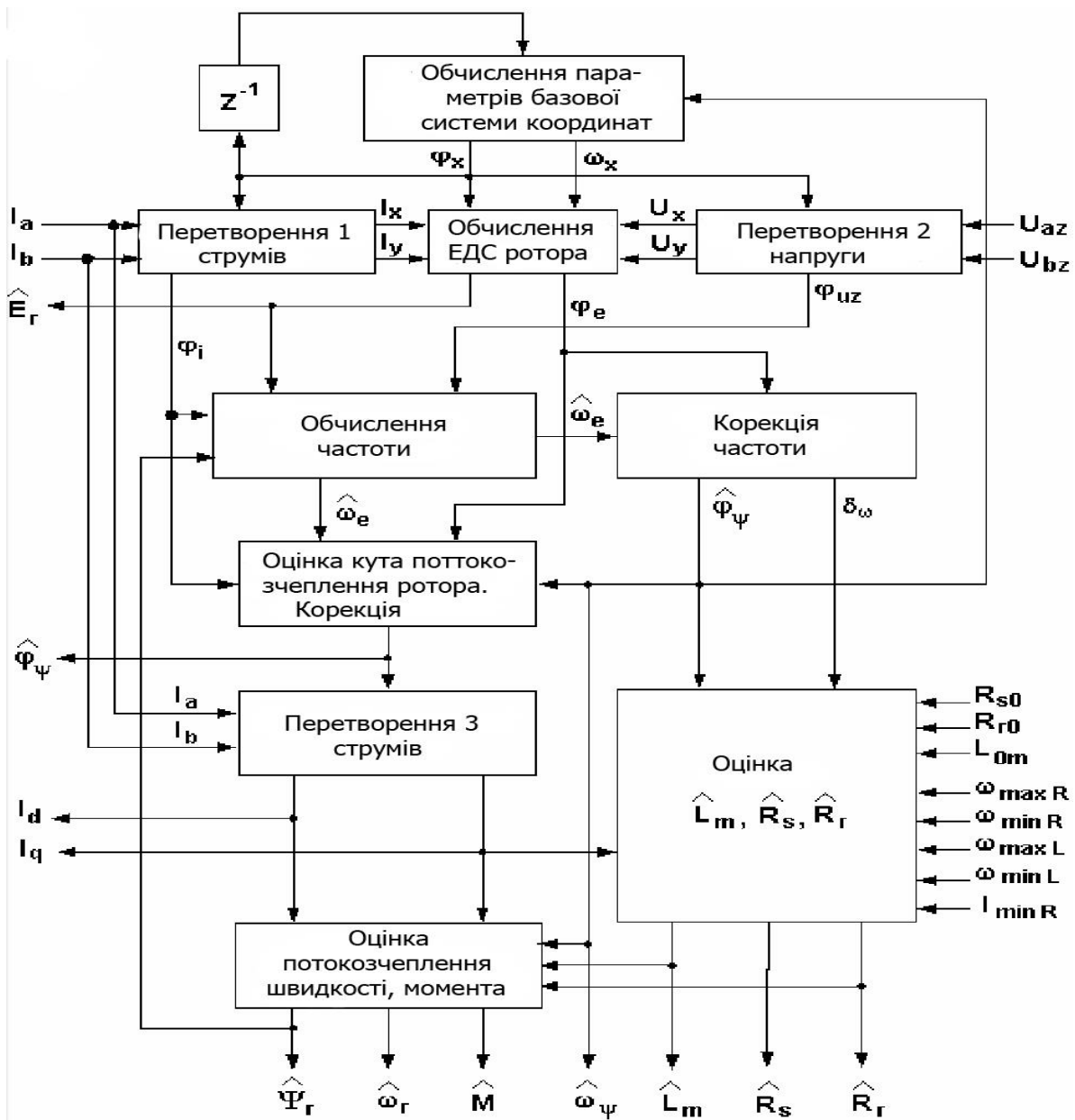
Вихідна схема електропривода

Рисунок А.1 – Слайд 1 мультимедійної презентації



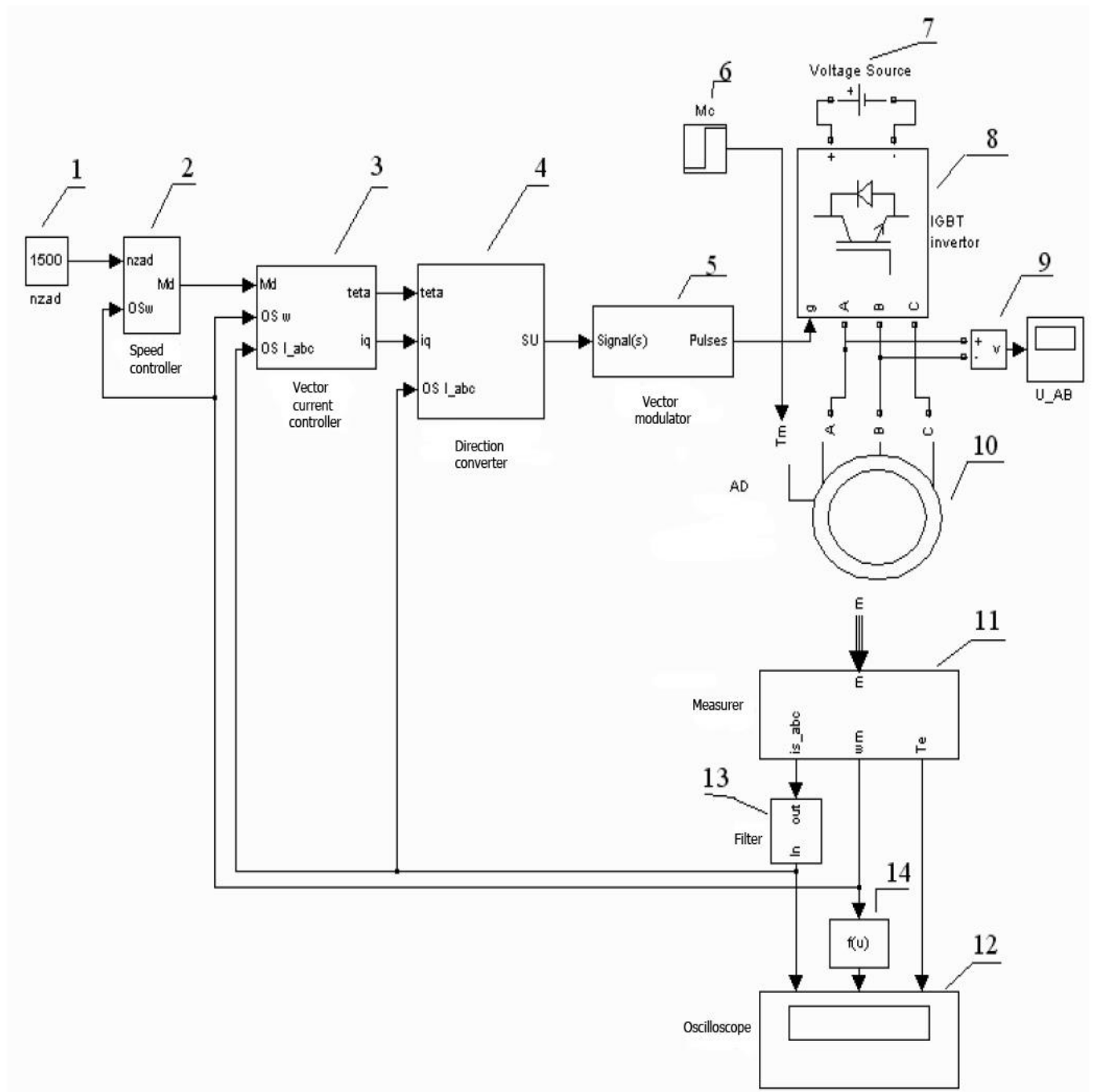
Структурна схема розробленого електроприводу

Рисунок А.2 – Слайд 2 мультимедійної презентації



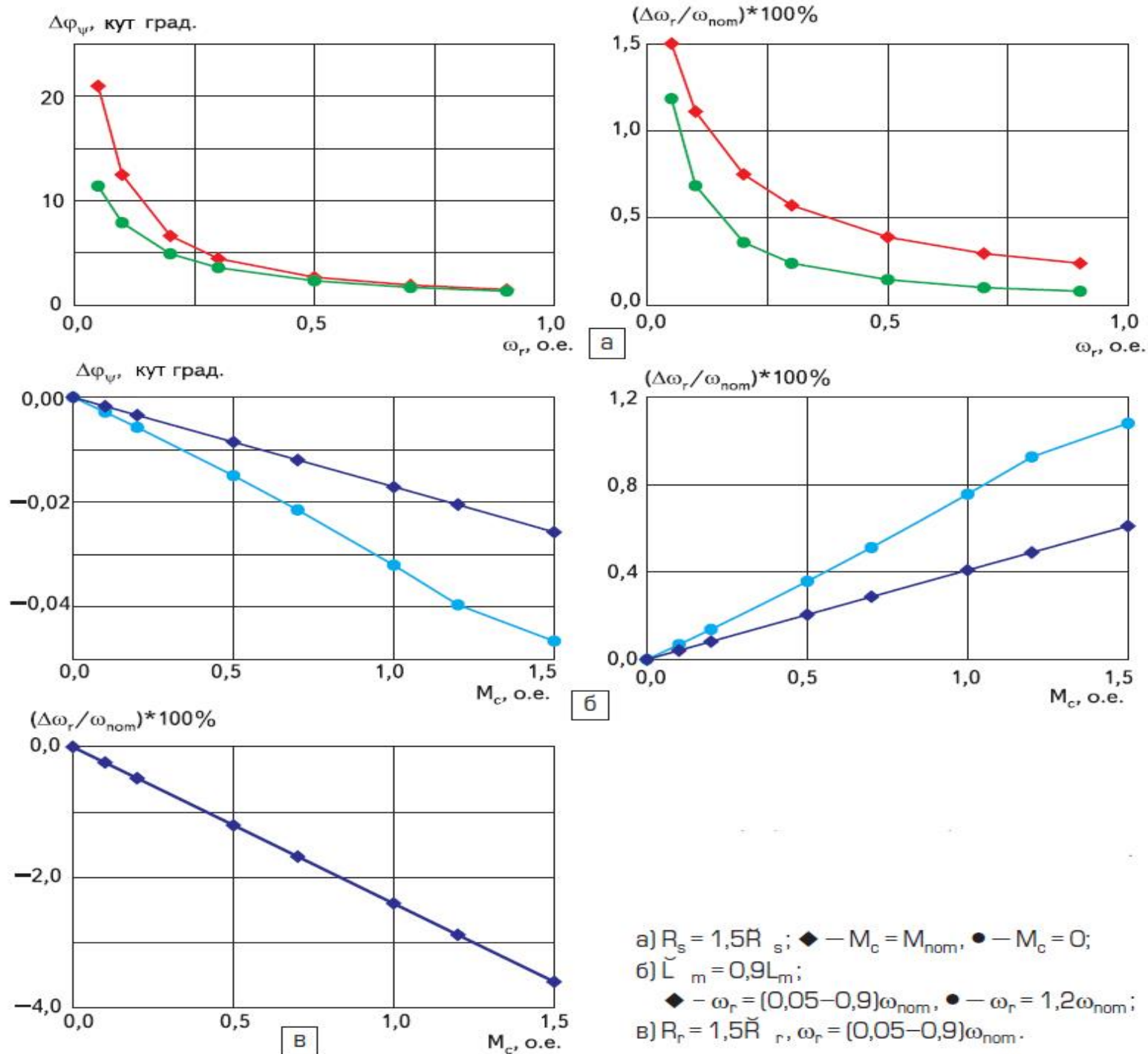
Структурна схема спостерігача стану

Рисунок А.4 – Слайд 4 мультимедійної презентації



Розрахункова схема

Рисунок А.4 – Слайд 4 мультимедійної презентації



Результати обчислень

Рисунок А.5 – Слайд 5 мультимедійної презентації