

Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки  
(назва інституту, факультету)

кафедра електричної інженерії суднових та роботизованих  
комплексів  
(назва кафедри)

Допущений до захисту

зав. кафедри

ЕІС та РК

(скорочена назва кафедри)

  
(підпис)

Костенко Д.В.

(прізвище та ініціали)

" 16 " 12 2025 р.

# Кваліфікаційна робота

на здобуття ступеня вищої освіти

## магістр

на тему Дослідження системи керування електроприладом  
ліфтової лебідки

Виконав: студент групи 6361м

Спеціальності

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

спеціалізації «Електричні системи і комплекси транспортних  
засобів»

Студент

Чилій І.А.

(прізвище та ініціали)

  
(підпис)

Керівник

к.т.н., доцент Бабкін Г.В.

(прізвище та ініціали)

  
(підпис)

Рецензент

к.т.н., доцент Войтасик А.М.

(прізвище та ініціали)

  
(підпис)

м. Миколаїв – 2025 р.

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова

Інститут, факультет Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки  
Кафедра електричної інженерії суднових та роботизованих комплексів  
Рівень вищої освіти магістр  
Галузь знань 14 «Електрична інженерія»  
(шифр і назва)  
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
(шифр і назва)  
Освітньо-професійна програма «Електричні системи і комплекси транспортних засобів»  
(шифр і назва)

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Гарант освітньої програми

 Костенко Д.В.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

" 01 " 10 2025 р.

## ЗАВДАННЯ

### на кваліфікаційну роботу магістра

Чилій Іван Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові студента)

1. Тема кваліфікаційної роботи Дослідження системи керування  
електроприладом ліфтової лебідки

Керівник кваліфікаційної роботи Бабкін Георгій Володимирович,  
канд. техн. наук, доцент НУК

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від «14» 10 2025 року №1217уч

2. Строк подання студентом кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_

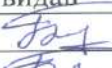
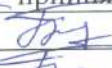
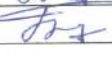
3. Вихідні дані кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) \_\_\_\_\_

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

Електронна презентація

6. Консультанти розділів проекту

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата                                                                        |                                                                                     |
|--------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|        |                                           | завдання видав                                                                      | завдання прийняв                                                                    |
| ОП     | Бабкін Г. В.                              |  |  |
| ОПС    | Бабкін Г. В.                              |  |  |

7. Дата видачі завдання на кваліфікаційну роботу « 15 » вересня 2025 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи                                                          | Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи | Примітка |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------|
| 1     | Видача завдання. Розроблення змісту роботи. Узгодження завдання по спец. розділам            |                                               |          |
| 2     | Розробка розділу 1. Розробка розділу 2.                                                      |                                               |          |
| 3     | Розробка розділу 3. Розробка розділу 4.                                                      |                                               |          |
| 4     | Розробка розділу 5. Затвердження додатків.                                                   |                                               |          |
| 5     | Розробка висновків та переліку посилань. Розробка реферату та вступу.                        |                                               |          |
| 6     | Затвердження висновків, переліку посилань, реферату та вступу. Оформлення ПЗ та презентації. |                                               |          |
| 7     | Підготовка доповіді. Захист МР.                                                              |                                               |          |

Студент

  
(підпис)

Чилий І. А.  
(прізвище та ініціали)

Керівник  
кваліфікаційної роботи

  
(підпис)

Бабкін Г. В.  
(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційну роботу присвячено питанням розробки та дослідження системи векторного керування електроприводом ліфтової лебідки пасажирського ліфта.

У роботі зроблено вибір асинхронного двигуна, перетворювача частоти та обґрунтовано спосіб керування. Проведено імітаційні дослідження розробленого електроприводу в основних технологічних режимах.

Робота виконана із використанням пакету програм: MathCAD, Matlab, MS Office.

Ключові слова: ліфтова лебідка; асинхронний двигун; перетворювач частоти; векторне керування; імітаційне дослідження

## ABSTRACT

The qualification work is devoted to the development and research of a vector control system for the electric drive of the elevator winch of a passenger elevator.

The work includes the selection of an asynchronous motor, a frequency converter and the justification of the control method. Simulation studies of the developed electric drive in the main technological modes were conducted.

The work was performed using the following software packages: MathCAD, Matlab, MS Office.

Keywords: elevator winch; induction motor; frequency converter; vector control; simulation study

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Вступ .....                                                                                                                         | 7  |
| Розділ 1. Механічна система електроприводу .....                                                                                    | 8  |
| 1.1 Обґрунтування принципу реалізації електроприводу .....                                                                          | 8  |
| 1.2 Обладнання ліфту .....                                                                                                          | 11 |
| 1.3 Вимоги до електроприводу ліфтової лебідки .....                                                                                 | 13 |
| 1.4 Кінематична схема механізму, параметри .....                                                                                    | 13 |
| 1.5 Визначення передавального числа редуктора .....                                                                                 | 17 |
| Розділ 2. Силовий ланцюг електричної системи електроприводу .....                                                                   | 20 |
| 2.1 Розрахунок параметрів електродвигуна .....                                                                                      | 20 |
| 2.2 Вибір перетворювача .....                                                                                                       | 26 |
| 2.3 Розрахунок механічних та електромеханічних характеристик приводу ..                                                             | 28 |
| Розділ 3. САК частотно-регульованого асинхронного електроприводу з векторним керуванням .....                                       | 32 |
| 3.1 Визначення робочої області електроприводу .....                                                                                 | 32 |
| 3.2 Розробка математичних моделей АД .....                                                                                          | 35 |
| 3.3 Лінеаризована САК РЕП .....                                                                                                     | 40 |
| 3.4 Дослідження нелінійної САК РЕП .....                                                                                            | 66 |
| 3.5 Розробка електроприводу, що стежить .....                                                                                       | 73 |
| 3.6 Дослідження слідкуючого електроприводу .....                                                                                    | 80 |
| Розділ 4. Охорона праці .....                                                                                                       | 82 |
| 4.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів, що впливають на людину при роботі в лабораторії та дії людини на випадок пожежі ..... | 83 |
| 4.2 Розрахунок освітлення лабораторії .....                                                                                         | 85 |
| 4.3 Запобіжні заходи проти ураження струмом, пожежі та інших нещасних випадків .....                                                | 87 |
| Розділ 5. Охорона заколишньої середи .....                                                                                          | 89 |
| 5.1 Забруднення морської середовища внаслідок викиду суднових відходів діяльності .....                                             | 90 |

|                                           |    |
|-------------------------------------------|----|
| 5.2 Заходи боротьби із забрудненням ..... | 91 |
| Висновки .....                            | 93 |
| Перелік джерел посилання .....            | 94 |

## ВСТУП

Системи електроприводу підйомно-транспортних механізмів широко поширені в різних сферах промисловості та ЖКГ. Від надійної та якісної роботи ліфтових лебідок безпосередньо залежить безпечне та комфортне функціонування ліфтів, кранів та підйомників різного типу.

На сучасному етапі подальше вдосконалення систем електроприводу обґрунтовано підвищенням енергетичної ефективності, покращенням комфортності переміщень кабіни та зниженням експлуатаційних витрат.

При цьому на тлі досягнень у галузі електромоторобудування та силової електроніки на перший план виноситься завдання розробки векторних систем керування електроприводами ліфтових лебідок. Впровадження векторних систем управління дозволяє на новому рівні реалізувати вимоги до систем електроприводу ліфтових і підйомних механізмів.

Саме з цих причин проведення подальших досліджень у галузі розробки та вдосконалення векторних систем керування електроприводами ліфтових лебідок є перспективним та своєчасним. При потребах суспільного розвитку, що розширюються, потрібні безперервне вдосконалення засобів внутрішнього транспорту будівель і споруд із застосуванням сучасних науково-технічних досягнень.

За призначенням ліфти поділяються на різні категорії.

У цій роботі представлена розробка векторної системи керування електроприводом ліфтової лебідки пасажирського ліфта вантажопідйомністю 400 кг зі швидкістю руху кабіни 1 м/с.



## РОЗДІЛ 1

### МЕХАНІЧНА СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

#### 1.1 Обґрунтування принципу реалізації електроприводу

Асинхронний електродвигун був винайдений в 1889 відомим електротехніком польсько-російського походження Михайлом Осиповичем Доливо-Добровольським, який працював у німецькій фірмі Allgemeine Elektricitäts – Gesellschaft.

У 1889 р. М. О. Доливо-Добровольський отримав патент на свій винахід (німецький патент №51083 від 8 березня 1889 під назвою «Anker für Wechselstrommotoren»).

Незважаючи на більш ніж сторічний вік двигуна, його конструкція досі істотно не змінилася. З самого початку двигун був сконструйований як некерований за швидкістю. [2]

Принципи скалярного управління асинхронним двигуном були сформульовані російським академіком М. П. Костенком у 1925 році. Він уперше описав спосіб пов'язаного зміни амплітуди та частоти напруги статора залежно від необхідного моменту (скалярне керування напругою).

У 1963 року В. М. Бродовський сформулював принцип скалярного управління струмом. У цьому способі було запропоновано керувати моментом двигуна, пов'язано змінюючи амплітуду та частоту статора стака. При цих скалярних видах регулювання керування моментом двигуна здійснюється за допомогою зміни амплітуди та частоти вектора напруги або струму статора двигуна.

Математичною основою скалярного регулювання є рівняння, що описують встановлені режими роботи двигуна, тобто режими, в яких швидкість та момент навантаження двигуна залишаються незмінними.

Природно, що у динамічних режимах за зміни швидкості чи навантаження коректність математичної моделі скалярного управління порушується. Це

призводить до досить повільної реакції скалярних систем керування на швидкі дії. Це і є їх основним недоліком:

у швидкісному контурі при скалярному регулюванні різка зміна навантаження призводить до закидів або провалів швидкості.

Подальшим кроком у розвитку теорії та практики управління двигуном стало векторне управління. Його математична основа – диференціальні рівняння, що описують електричну машину однаково коректно і в динаміці, і в статичі. Момент при векторному управлінні отримують за допомогою управління амплітудою та миттєвою фазою вектора статора статора або вектора статорної напруги.

З огляду на адекватність управління в динаміці, векторне управління забезпечує найвищу точність і швидкість регулювання.

Система векторного частотного управління асинхронним двигуном базується на поданні фізичних змінних двигуна просторовими векторами, які можуть змінюватися як модулі, так і положення в просторі. Система координат  $dq$  представлена рис. 1.1.

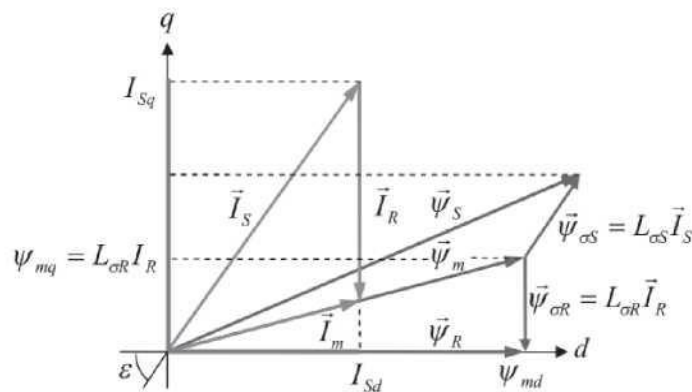


Рисунок 1.1 – Двофазна система координат, що обертається  $dq$

Для двофазної системи координат  $dq$ , що обертається, вісь  $d$  якої орієнтована по потоку ротора, можна записати наступні вирази:

- $\Psi_R q = 0$ ;
- $\omega_k = \omega$  – швидкість обертання поля;
- $\omega_k - \omega^\wedge \Delta \omega$  – швидкість ковзання ротора АТ.

Отже, рівняння рівноваги статора і ротора у цій системі можна переписати так:

$$\begin{cases} U_{sd} = \frac{d\psi_{sd}}{dt} + I_{sd}R_s - \omega\psi_{sq} \\ U_{sq} = \frac{d\psi_{sq}}{dt} + I_{sq}R_s - \omega\psi_{sd} \\ 0 = \frac{d\psi_{sd}}{dt} + I_{rd}R_r \\ 0 = I_{rq}R_r - \Delta\omega\psi_{rd} \end{cases}$$

При  $\psi_R = \text{const}$  рівняння динамічної рівноваги ротора спростяться і набудуть наступного вигляду:

$$\begin{cases} I_{rd}R_r = 0 \\ I_{rq}R_r + \Delta\omega\psi_R = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_{rd} = 0 \\ I_{rq}R_r = -\Delta\omega\psi_R \end{cases}$$

З цього можна зробити висновок про перпендикулярність векторів струму і потоку ротора при управлінні законом регулювання  $\psi_R = \text{const}$ .

Система координат, що обертається, може здаватися дуже штучною, але саме в ній будуються сучасні системи векторного регулювання.

Система регулювання будується в системі координат, що обертається разом із керованим вектором. Справа в тому, що в такій системі диференціальні рівняння, що описують двигун, набувають найпростішого вигляду.

Крім того, оскільки керований вектор не обертається щодо даної системи координат, його амплітуда та фаза визначаються двома скалярними величинами проекцій на осі координат цієї системи.

Отже, управління вектором, у разі, можна звести до управління величиною і знаком його проекцій. Обертання системи враховують за допомогою формул координатних перетворень, вимірюючи або обчислюючи кут її повороту щодо нерухомої системи координат.

## 1.2 Обладнання ліфту

Основним обладнанням ліфта є кабіна, підйомна лебідка, канати, противага, упори, двигун, електромеханічний гальмівний пристрій, зовнішнє та внутрішнє керування. Обладнання ліфта розташовується в шахті та в приміщеннях вище та нижче за неї [3].

У верхній частині підйомної установки швидкісного ліфта (рис. 1.3) розташоване машинне приміщення, нижче за нього - напівповерх з відвідним шківом 2 і відцентровим обмежувачем швидкості 4. Вниз йде шахта, де переміщається кабіна ліфта 5. У сучасних ліфтах тягове зусилля від двигуна лебідки з канатоведущим шківом, на якому канати 3 розташовуються в клиноподібних або напівкруглих доріжках на поверхні шківа кілька заходів.

Тертя утворюється при зв'язку між шківом і головними канатами. У процесі роботи ліфта кабіна (5) переміщається в ліфтовій шахті вздовж напрямних, показаних у позиції 6, які охоплюються напрямними роликами. Противага, показаний на позиції 7 малюнка 3, врівноважує певну частину маси завантаженої кабіни.

На верхній частині кабіни встановлений електропривод, що відповідає за відкриття/закриття ступок дверей, показаних на позиції 12. Живлення на двигун дверей підводиться кабелем, показаним на позиції 11. Аналогічно відбувається апаратний зв'язок керування та сигналізації з обладнанням.

При обриві канатів і перевищенні швидкості спрацьовують спеціальні уловлювачі, встановлені в нижній частині конструкції кабіни. Кліщовий уловлювач показаний на рис. 1.2.

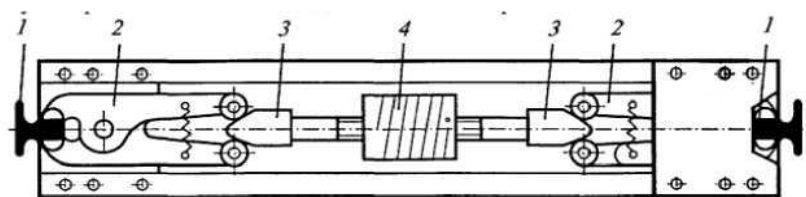


Рисунок 1.2 – Конструкція кліщового уловлювача

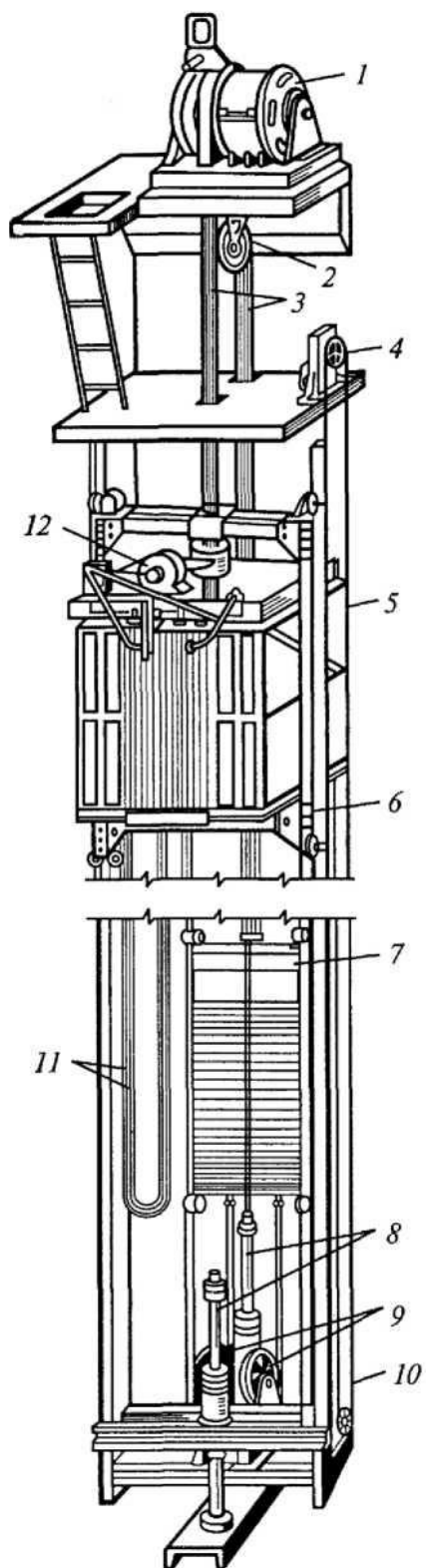


Рисунок 1.3 – Кінематична схема швидкісного пасажирського ліфта

### 1.3 Вимоги до електроприводу ліфтової лебідки

Для пасажирського ліфта, експлуатація якого відбувається у дев'ятиповерховому будинку, приймається наступна номінальна швидкість, що дорівнює від 0,7 м/с до 1 м/с.

Також до важливої вимоги належить необхідність жорсткого обмеження прискорень та уповільнення кабіни.

Максимальна величина прискорення (уповільнення) руху кабіни за нормальних режимів роботи має перевищувати: всім ліфтів, крім лікарняного, 2 м/с<sup>2</sup>, для лікарняного ліфта – 1 м/с<sup>2</sup>.

Похідна прискорення та уповільнення (ривок) правилами не регламентується, проте необхідність його обмеження, як і обмеження прискорення, визначається необхідністю обмеження динамічних навантажень у механічній передачі під час перехідних процесів та завданням забезпечення необхідного комфорту для пасажирів.

Обмеження величин прискорення та ривка має забезпечувати високу плавність перехідних процесів і цим виключити негативний вплив самопочуття пасажирів.

Вимога обмеження прискорень і ривків допустимими значеннями вступає у суперечність із зазначеною вище вимогою забезпечення максимальної продуктивності ліфта, оскільки з нього випливає, що тривалість розгону та уповільнення кабіни ліфта не може бути меншою за певну величину, що визначається цим обмеженням.

### 1.4 Кінематична схема механізму, параметри

Сучасні пасажирські та вантажні ліфти в житлових та адміністративних будівлях обладнуються противагою для врівноваження маси кабіни та частини номінального вантажу, що піднімається.

Для розрахунку електроприводу пасажирського ліфта прийнято такі вихідні дані, подані в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Характеристики ліфту

| Параметр                                | Позначення       | Значення |
|-----------------------------------------|------------------|----------|
| Вантажопідйомність, кг                  | $M_{\Gamma P}$   | 400      |
| Місткість, чол                          | $E$              | 5        |
| Максимальна висота підйому, м           | $H$              | 24       |
| Кількість поверхів                      | $N$              | 9        |
| Швидкість підйому, м/с                  | $v_{\text{ном}}$ | 1        |
| Кількість несучих канатів               | $N_H$            | 4        |
| Маса кабіни, кг                         | $m_o$            | 650      |
| Маса 1000 м несучого каната, кг         | $m_k$            | 530      |
| Маса несучого каната, на 1 кг, кг       | $m_{\text{кан}}$ | 0,53     |
| Діаметр канатоведучого шківа, м         | $D_{\text{ш}}$   | 0,8      |
| Момент інерції шківа, кг <sup>2</sup> м | $J_{\text{ш}}$   | 14       |

Спрощена кінематична схема пасажирського ліфта наведена рис. 1.4.

Здійснено розрахунок параметрів кінематичної схеми:

$$G_0 = m_0 \cdot g = 650 \cdot 9.81 = 6377 \text{ Н}$$

$$G_{\Gamma P} = m_{\Gamma P} \cdot g = 400 \cdot 9.81 = 3924 \text{ Н}$$

$$G_{\text{ІПР}} = G_0 + \alpha \cdot G_{\text{НОМ}} = (m_0 + \alpha \cdot m_{\Gamma P}) \cdot g = (650 + 0.5 \cdot 400) \cdot 9.81 = 8338 \text{ Н}$$

де  $G_{\Gamma P}$  – маса противаги [Н];

$G_{\text{ном}}$  – маса вантажу, що піднімається,

$G_0$  – маса кабіни [Н];

$\alpha$  – коефіцієнт врівноважування прийнятий рівному 0,5.

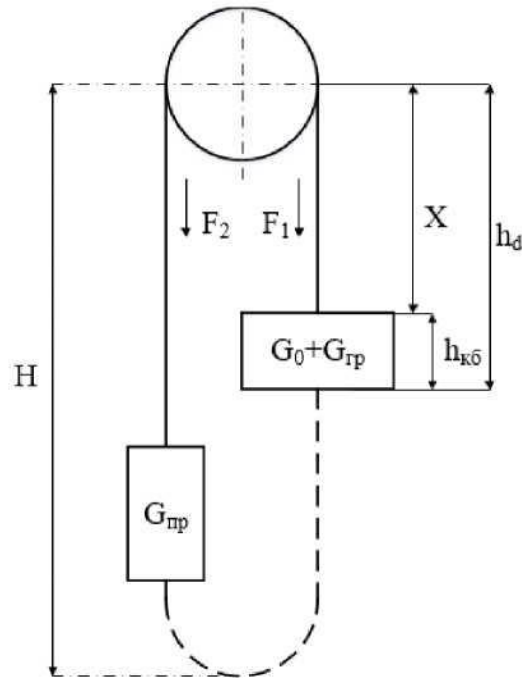


Рисунок 1.4 – Кінематична схема пасажирського ліфта

Вісь обертання шківів, що тягне, розташована від підлоги верхнього поверху на висоті  $h_d = 5000$  мм, висота кабіни  $h_{кб} = 2400$  мм, отже:

$$X = h_d - h_{кб} = 5 - 2.4 = 2.6 \text{ м}$$

Зі схеми, наведеної на рис. 1.4, випливає, що:

$$F_1 = G_0 + G_{\text{пр}} + N_{\text{кан}} \cdot q_{\text{кан}} \cdot g \cdot X = 6377 + 3924 + 4 \cdot 0.53 \cdot 9.81 \cdot 0.26 = 10.25 \text{ кН},$$

$$F_2 = G_{\text{пр}} + N_{\text{кан}} \cdot q_{\text{кан}} \cdot g \cdot (H - X) = 8338 + 4 \cdot 0.53 \cdot 9.81 \cdot (2.4 - 0.26) = 8.784 \text{ кН},$$

де  $q_{\text{кан}}$  – маса метра каната, кг/м,



$$F = F_1 - F_2 = 10.3 - 8.35 = 1.571 \text{ кН}$$

Потужність, кВт, на валу двигуна визначаються за такими формулами:

$$P_1 = \frac{F \cdot v}{\eta_1} \cdot 10^{-3}$$

$$P_2 = F \cdot v \cdot \eta_2 \cdot 10^{-3}$$

де  $P_1$  – потужність під час роботи приводу в руховому режимі;

$P_2$  – відповідно потужність приводу у генераторному режимі;

$\eta_1$  та  $\eta_2$  – ККД черв'ячного редуктора при прямій та зворотній передачі енергії.

Попередньо можна прийняти ККД механічної передачі виходячи з ККД його елементів: каната зі шківом  $\eta_{\chi} = 0.94 \dots 0.95$ , тертя кабіни і противаги про напрямні  $\eta^{\wedge} 0.85 \dots 0.9$ , черв'ячної передачі  $\eta_p = 0.65 \dots 0.70$  і однієї циліндричної пари 8.009. циліндричними шестернями та прийнятий триступінчастий редуктор). Отже:

$$\eta = \eta_{\kappa} \cdot \eta_{un} \cdot \eta_p^3 = 0.945 \cdot 0.87 \cdot (0.94)^3 = 0.683$$

Здійснено розрахунок необхідної потужності електродвигуна:

$$P_1 = \frac{F \cdot v}{\eta_1} \cdot 10^{-3} = \frac{1.571 \cdot 10^3 \cdot 1}{0.683} \cdot 10^{-3} = 2.301 \text{ кВт}$$

$$P_2 = F \cdot v \cdot \eta_2 \cdot 10^{-3} = 1.571 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 0.683 \cdot 10^{-3} = 1.073 \text{ кВт}$$

У зв'язку з тим, що розрахунок проводився за дуже спрощеною кінематичною схемою, далі буде обрано двигун більшої потужності, показаний на рис. 1.5. Докладніше його параметри будуть розглянуті в табл. 1.3.

| Висота осі<br>обертання  | Потуж-<br>ність | Тип      | Частота<br>обертання | ККД<br>при навантаженні      |      |      | Коеф. потужності<br>при навантаженні |      |      | Струм при 380 В     | <u>Іпуск</u><br>IN | <u>Мпуск</u><br>MN | <u>Ммакс</u><br>MN | Момент<br>інерції                    | Маса               |
|--------------------------|-----------------|----------|----------------------|------------------------------|------|------|--------------------------------------|------|------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------------|--------------------|
| Frame<br>Size            | Rated<br>output | Type     | Rated<br>speed       | Efficiency<br>under the load |      |      | Power factor<br>under the load       |      |      | Current<br>at 380 V | <u>IA</u><br>IN    | <u>MA</u><br>MN    | <u>MK</u><br>MN    | Moment<br>of inertia<br>J            | Mass<br>IM B3      |
| мм                       | кВт             |          | об/хв<br>rpm         | %                            |      |      | Cos φ                                |      |      | A                   |                    |                    |                    | кгм <sup>2</sup><br>kgm <sup>2</sup> | кг<br>kg           |
|                          |                 |          |                      | 100                          | 75   | 50   | IE                                   | 100  | 75   |                     |                    |                    |                    |                                      | Al Iron            |
| 1000 об/хв ( 6 полюсів ) |                 |          |                      |                              |      |      |                                      |      |      |                     |                    |                    |                    |                                      | 1000 rpm (6 pole ) |
| 132                      | 5.5             | RA132MB6 | 950                  | 84.0                         | 85.0 | 85.1 | 1                                    | 0.82 | 0.74 | 12.2                | 5.5                | 2.2                | 2.5                | 0.0482                               | 56 79              |

Рисунок 1.5 – Параметри вибраного двигуна RA132MB6

### 1.5 Визначення передавального числа редуктора

Попередньо вибраний двигун RA132MB6 має синхронну частоту обертання  $n_0 = 1000$  об/хв. Припускається, що навантажений двигун працюватиме у номінальній точці механічної характеристики  $S = SK$ . Номінальна швидкість дорівнює:

$$\omega_H = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_H}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 950}{60} = 98.44 \text{ рад/с}$$

де  $n_H$  – номінальна частота обертання двигуна.

Визначимо передатне число редуктора:

$$i_p = \frac{\omega_H \cdot D_{III}}{2 \cdot V} = \frac{98.44 \cdot 0.8}{2 \cdot 1} = 38.301$$

де  $V$  – діаметр канатоведущого шківa, м.м.

Виберемо стандартне значення передавального числа редуктора

$$i_{p.cm} = 41$$

Результуюче зусилля  $F$  представляється як алгебраїчної суми активного зусилля і реактивного, обумовленого тертям зусилля  $B_{тр}$ . Ці складові визначають відповідно активну  $M$  і реактивну  $M_{тр}$  складову наведеного до валу двигуна статичного моменту  $M_{ст}$ . [5]

При максимальній вантажопідйомності  $G_{рп} = 400 \cdot 9,81 = 3924$  [Н]

$$M_{cm} = \frac{[G_{рп} + N_{КАН} \cdot q_{КАН} \cdot (2 \cdot X - H) - \alpha \cdot G_{рп}] \cdot D_{ш}}{2 \cdot i} + M_{пп} = 19.041 + M_{пп}$$

При напівпорожній кабіні  $t_{рп} = 200$  кг,  $G_{р1} = 200 \cdot 9,81 = 1962$  [Н]

$$M_{cm} = \frac{[G_{рп2} + N_{КАН} \cdot q_{КАН} \cdot (2 \cdot X - H) - \alpha \cdot G_{рп}] \cdot D_{ш}}{2 \cdot i} + M_{пп} = -0.101 + M_{пп}$$

– при максимальному навантаженні  $t_{рп} = 400$  кг

$$M_{C.п.} = M_{рп} \cdot M_{пп} = \frac{M_{cm}}{\eta} = \frac{19.041}{0.683} = 27.878 \text{ Нм}$$

– при напівпорожній кабіні  $t_{рп} = 200$  кг

$$M_{C.п.2} = M_{рп2} \cdot M_{пп} = \frac{M_{cm2}}{\eta} = \frac{-0.101}{0.683} = 0.1478 \text{ Нм}$$

Статичний момент механізму при зворотному напрямку енергії, що приведений до валу двигуна:

– при максимальному навантаженні  $t_{рп} = 400$  кг

$$M_{C.O.} = -M_{рп} + M_{пп} = M_{cm} \cdot \eta = 19.041 \cdot 0.683 = 13.005 \text{ Нм}$$

– при напівпорожній кабіні  $t_{рп} = 200$  кг

$$M_{C.O.2} = -M_{ГР2} + M_{ПП} = M_{cm2} \cdot \eta = -0.101 \cdot 0.683 = -0.068983 \text{ Нм}$$

Момент інерції механізму

$$J_M = J_{КГР} + J_{ПРТ} + J_{ШК}$$

$$J_{КГР} = \frac{(G_K + G_\Gamma) \cdot D_{Ш}^2}{4 \cdot g} = \frac{(6500 + 3924) \cdot 0.8^2}{4 \cdot 9.81} = 155.636 \text{ кг м}^2$$

де  $J_{КГР}$  – момент інерції кабіни з вантажем, приведений до валу шківа,

$$J_{ПРТ} = \frac{G_{ПП} \cdot D_{Ш}^2}{4 \cdot g} = \frac{8338 \cdot 0.8^2}{4 \cdot 9.81} = 125.991 \text{ кг м}^2$$

де  $J_{ПРТ}$  – момент інерції противаги, приведений до валу шківа.

Момент інерції механізму:

$$J_M = 155.636 + 125.991 + 14 = 295.627 \text{ кг м}^2$$

$$J_{M \text{ ПП}} = \frac{J_M}{i_{p.cm}^2} = \frac{295.627}{41^2} = 0.176 \text{ кг м}^2$$

Сумарний момент інерції:

$$J_\Sigma = J_{M \text{ ПП}} + J_{\delta\epsilon} = 0.176 + 0.482 = 0.224 \text{ кг м}^2$$

## РОЗДІЛ 2

### СИЛОВИЙ ЛАНЦЮГ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

#### 2.1 Розрахунок параметрів електродвигуна

Паспортні параметри електродвигуна RA132MB6 представлені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Паспортні параметри електродвигуна RA132MB6

| Задані величини                               | Умовне позначення | Одиниця вимірюван | Чисельне значення |
|-----------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Фазна напруга                                 | U <sub>ф</sub>    | В                 | 220               |
| Лінійна напруга                               | U <sub>л</sub>    | В                 | 380               |
| Потужність двигуна                            | P <sub>дв.</sub>  | Вт                | 5500              |
| ККД (при навантаженні 100%)                   | Лн                | %                 | 84                |
| ККД (при навантаженні 75%)                    | Лн                | %                 | 85                |
| Синхронна частота обертання                   | пс                | об/хв             | 1000              |
| Частота обертання                             | пс                | об/хв             | 950               |
| Коефіцієнт потужності (при навантаженні 100%) | cos%              | о.е               | 0,82              |
| Коефіцієнт потужності (при навантаженні 75%)  | cos%              | о.е               | 0,74              |
| Номінальне ковзання                           |                   | %                 | 5                 |
| Кратність пускового струму                    | k <sub>i</sub>    | о.е               | 5,5               |
| Кратність пускового моменту                   | До                | о.е               | 2,2               |
| Кратність максимального моменту               | До max            | о.е               | 2,5               |
| Кратність мінімального моменту                | k <sub>min</sub>  | о.е               | 1                 |
| Коефіцієнт завантаження двигуна               | P <sub>ж</sub>    | о.е               | 0,75              |
| Число пар полюсів                             | P                 | -                 | 3                 |
| Частота мережі живлення                       | f                 | Гц                | 50                |
| Число фаз двигуна                             | m                 | -                 | 3                 |

Синхронна кутова швидкість обертання двигуна:

$$\omega_c = \frac{\pi \cdot n_c}{30} = \frac{\pi \cdot 1000}{30} = 104.72 \text{ рад/с}$$

Номінальна частота обертання двигуна:

$$n_{\text{дв.н}} = (1 - S_n) \cdot n_c = (1 - 0.05) \cdot 1000 = 950 \text{ об/хв}$$

Номінальна кутова швидкість:

$$\omega_{\text{дв.н}} = (1 - S_n) \cdot \omega_c = (1 - 0.05) \cdot 104.72 = 99.484 \text{ рад/с}$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_{\text{дв.н}} = \frac{P_{\text{дв}}}{\omega_{\text{дв.н}}} = \frac{5500}{99.484} = 55.285 \text{ Нм}$$

Тоді номінальний фазний струм:

$$I_{\phi_n} = \frac{P_{\text{дв}}}{m \cdot U_{\phi} \cdot \cos \varphi_n \cdot \eta_n} = \frac{5500}{3 \cdot 220 \cdot 0.82 \cdot 0.84} = 12.098 \text{ А}$$

Т – образна схема заміщення асинхронного двигуна однієї фази наведено рис. 2.1 [6].

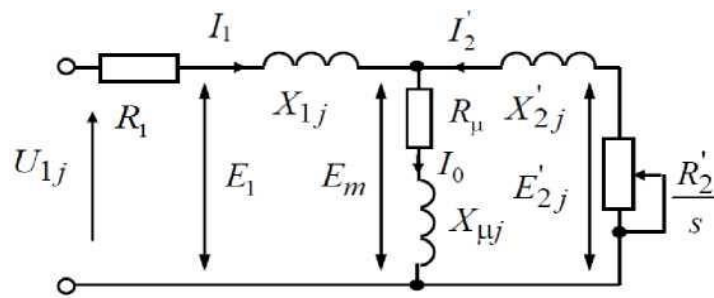
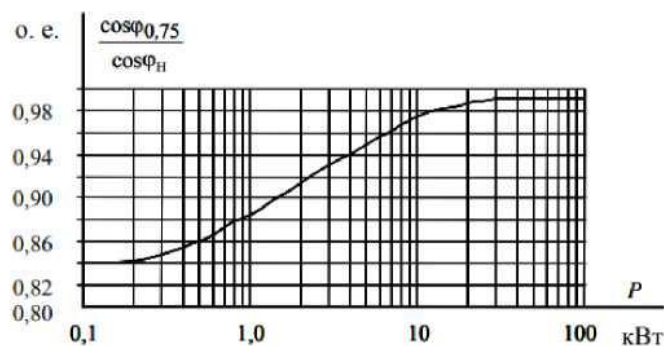


Рисунок 2.1 – Схема заміщення асинхронного двигуна

У цьому розрахунку прийнято до уваги те, що з проектуванні асинхронні двигуни досягають максимальний ККД при завантаженні на 10-15% менше номінального значення. Отримана залежність, набута під час практики з відомими серіями асинхронних двигунів, представлена на рис. 2.2.

Коефіцієнт потужності при частковому завантаженні:

$$\cos \varphi_{p^*} = K \cdot \cos \varphi_n = 0.951 \cdot 0.82 = 0.779$$

Рисунок 2.2 – Залежність  $\cos \varphi / \cos \varphi_n$  від потужності асинхронних двигунів

Коефіцієнт завантаження двигуна приймаємо  $p^* = 0,75$  через зазначені вище особливості проектування асинхронних двигунів.

Тоді струм статора двигуна при частковому завантаженні дорівнює:

$$I_{11} = \frac{p^* \cdot P_{\text{дв}}}{m \cdot U_{\phi} \cdot \cos \varphi_{p^*} \cdot \eta_n} = \frac{0.75 \cdot 5500}{3 \cdot 220 \cdot 0.78 \cdot 0.84} = 9.536 \text{ A}$$

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \left( \frac{p \cdot I_{\phi H} \cdot (1 - S_H)}{1 - p \cdot S_H} \right)^2}{1 - \left( \frac{p \cdot (1 - S_H)}{1 - p \cdot S_H} \right)^2}} = \sqrt{\frac{9.536^2 - \left( \frac{0.75 \cdot 12.098 \cdot (1 - 0.05)}{1 - 0.75 \cdot 0.05} \right)^2}{1 - \left( \frac{0.75 \cdot (1 - 0.05)}{1 - 0.75 \cdot 0.05} \right)^2}} = 4.873 \text{ A}$$

З формули Клосса впливає співвідношення для розрахунку критичного ковзання:

$$S_{кр} = S_H \cdot \frac{k_{\max} + \sqrt{k_{\max}^2 - (1 - 2 \cdot S_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1))}}{1 - 2 \cdot S_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)} = 0.05 \cdot \frac{2.5 + \sqrt{2.5^2 - (1 - 2 \cdot 0.05 \cdot 1 \cdot (2.5 - 1))}}{1 - 2 \cdot 0.05 \cdot 1 \cdot (2.5 - 1)} = 0.284$$

де у першому наближенні коефіцієнт  $\beta = 1$ .

Попередньо для розрахунку активних та індуктивних опорів (параметрів схеми заміщення) обмоток статора та ротора визначаються наступні коефіцієнти:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{\phi H}} = 1 + \frac{4.873}{2 \cdot 5.5 \cdot 12.098} = 1.037$$

$$A_1 = \frac{m \cdot U_{\phi}^2 \cdot (1 - S_H)}{2 \cdot C_1 \cdot k_{\max} \cdot P_{\partial \theta}} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0.05)}{2 \cdot 1.037 \cdot 2.5 \cdot 5500} = 4.839$$

Активний опір ротора, приведений до обмотки статора асинхронного двигуна:

$$R'_2 = \frac{A_1}{\left( \beta + \frac{1}{S_{кр}} \right) \cdot C_1} = \frac{4.839}{\left( 1 + \frac{1}{0.284} \right) \cdot 1.037} = 1.032 \text{ Ом}$$



Активний опір обмотки статора визначається за таким виразом:

$$R_1 = C_1 \cdot R'_2 \cdot \beta = 1.037 \cdot 1.032 \cdot 1 = 1.07 \text{ Ом}$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{S_{kp}^2} - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{0.284^2} - 1^2} = 3.379$$

$$X_R = \gamma \cdot C_1 \cdot R'_2 = 3.379 \cdot 1.037 \cdot 1.032 = 3.614 \text{ Ом}$$

Тоді індуктивний опір обмотки ротора, наведений до обмотки статора, приблизно може бути розрахований як:

$$X'_2 = 0.58 \cdot \frac{X_R}{C_1} = 0.58 \cdot \frac{3.614}{1.037} = 2.022 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір статора обмотки:

$$X_1 = 0.42 \cdot X_R = 0.42 \cdot 3.614 = 1.518 \text{ Ом}$$

За знайденими значеннями Q, R, X<sub>k</sub> визначимо критичне ковзання та перевіримо правильність розрахунку

$$S_{k1} = \frac{C_1 \cdot R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}} = \frac{1.037 \cdot 1.032}{\sqrt{1.07^2 + 3.614^2}} = 0.284 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір ланцюга намагнічування визначається через значення ЕРС обмотки статора

$$\begin{aligned}
 E_1 &= \sqrt{(U_\phi \cdot \cos \varphi_n - R_1 \cdot I_{\phi n})^2 + (U_\phi \cdot \sin \varphi_n - X_1 \cdot I_{\phi n})^2} = \\
 &= \sqrt{(220 \cdot 0.82 - 1.07 \cdot 12.098)^2 + (220 \cdot 0.573 - 1.518 \cdot 12.098)^2} = \\
 &= 199.025 \text{ В}
 \end{aligned}$$

Індуктивний опір намагнічування:

$$X_m = \frac{E_1}{I_0} = \frac{199.025}{4.873} = 40.842 \text{ Ом}$$

Індуктивність обмотки статора, обумовлена потоками розсіювання:

$$L_{1\delta} = \frac{X_1}{2\pi f} = \frac{1.518}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.00483 \text{ Гн}$$

Наведена індуктивність обмотки ротора, обумовлена потоками розсіювання:

$$L'_{2\delta} = \frac{X'_2}{2\pi f} = \frac{2.022}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.00643 \text{ Гн}$$

Результуюча індуктивність, обумовлена магнітним потоком у повітряному зазорі, що створюється сумарною дією статора полюсів (індуктивність контуру намагнічування):

$$L_m = \frac{X_m}{2\pi f} = \frac{40.842}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.13 \text{ Гн}$$

Момент критичний рухового режиму:

$$M_{кр} = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2}{2 \cdot \omega_n \cdot C_1 \cdot [R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_k^2}]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 99.484 \cdot 1.037 \cdot [1.07 + \sqrt{1.07^2 + 3.614^2}]} = 145.488 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Критичне ковзання:

$$S_k = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}} = \pm \frac{1.032}{\sqrt{1.07^2 + 3.614^2}} = \pm 0.274$$

Максимальний момент двигуна:

$$M_{\max} = k_{\max} \cdot M_n = 2.5 \cdot 55.285 = 138.214 \text{ Нм}$$

Мінімальний момент двигуна:

$$M_{\min} = k_{\min} \cdot M_n = 1 \cdot 55.285 = 55.285 \text{ Нм}$$

Знайдені параметри схеми заміщення електродвигуна зведено табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Параметри схеми заміщення

| Ri [Ом] | Lis [Гн] | R'2 [Ом] | L'2s [Гн] | Lm [Гн], |
|---------|----------|----------|-----------|----------|
| 1,07    | 0,00483  | 1,032    | 0,00643   | 0,13     |

## 2.2 Вибір перетворювача

Перетворювачі частоти змінного струму забезпечують холостий хід на малій швидкості та роботу на повній швидкості з плавним прискоренням та уповільненням. Високий ККД та безпроблемна робота обладнання є гарантією

тривалого терміну служби.

Відповідно до мережі живлення, потужності двигуна і характеру навантаження розглядаємо перетворювач частоти фірми Danfoss серії VLT Lift Drive моделі LD-302P5K5 з наступними паспортними даними, зазначені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Характеристики перетворювача частоти

|                                 |                               |
|---------------------------------|-------------------------------|
| Виробник:                       | Danfoss                       |
| Серія:                          | VLT Lift Drive LD 302         |
| Модель:                         | LD-302P5K5                    |
| Застосування:                   | ліфти                         |
| Потужність, кВт:                | 5,5                           |
| Номинальний струм, А:           | 13                            |
| Напруга живлення, В:            | 380-400                       |
| Фазність (кількість фаз):       | 3                             |
| Вихідна частота, Гц:            | 0-300                         |
| Клас захисту:                   | IP20                          |
| Перевантаження, % протягом 1    | 160                           |
| Час розгону, з:                 | 0,01-3600                     |
| Час гальмування, з:             | 0,01-3600                     |
| ЕМС фільтр:                     | +                             |
| Гальмівний блок:                | опція                         |
| Інтерфейс RS485 (Modbus RTU):   | +                             |
| Пусковий момент:                | -                             |
| Регулятор:                      | ПІД - регулювання             |
| Векторне керування зі зворотним | + управління вектором напруги |
| Робоча температура, °C:         | 0...+45                       |
| Температура зберігання, °C:     | -25...+65                     |

Перетворювач частоти фірми Danfoss виділяється наявністю спеціалізованого ліфтового контролера, програмне забезпечення якого дозволяє забезпечувати високий рівень комфорту руху. Також перетворювач частоти VLT Lift Drive адаптований для умов роботи з ліфтовим обладнанням та оснащений спеціальною функцією завдання S-подібної кривої, що забезпечує плавне

переміщення ліфтової кабіни. [7]

### 2.3 Розрахунок механічних та електромеханічних характеристик приводу

Механічна характеристика асинхронного електродвигуна розраховується за такою формулою:

$$M = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[ (R_1 + R'_2 \cdot s^{-1})^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2 \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 1.032}{104.72 \cdot s \cdot \left[ (1.07 + 1.032 \cdot s^{-1})^2 + (1.518 + 2.022)^2 \right]}$$

Механічна характеристика асинхронного електродвигуна зображено рис. 2.3. Вона справедлива області номінальних швидкостей.

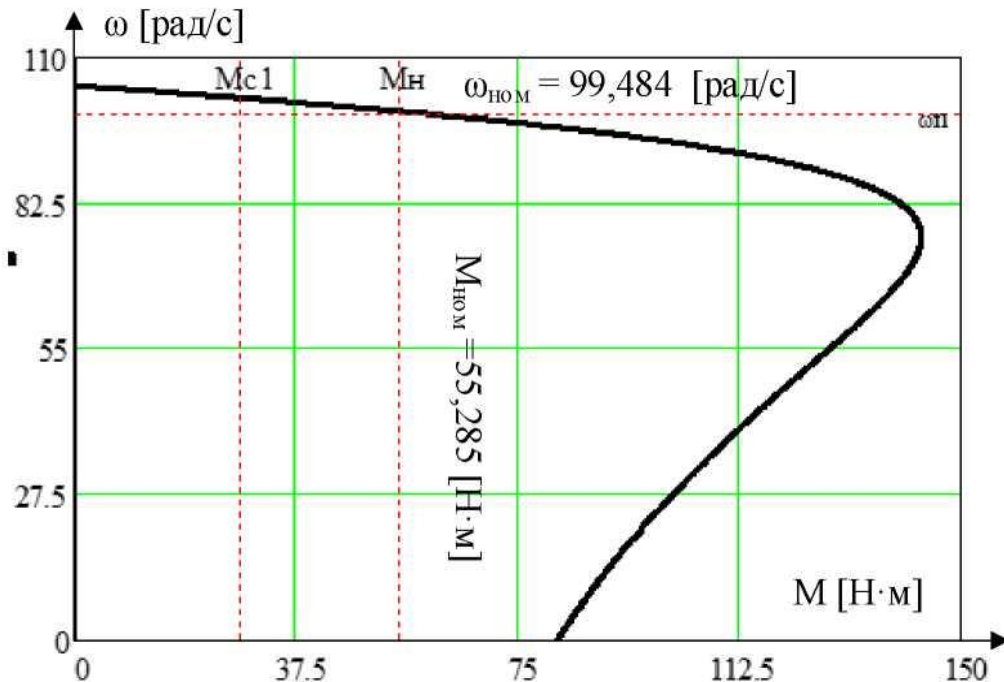


Рисунок 2.3 – Механічна характеристика асинхронного електродвигуна

Залежність струму ротора  $\Gamma_2$ , наведеного до обмотки статора, від ковзання  $S$  визначається так:

$$I'_2(s) = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}} = \frac{220}{\sqrt{\left(1.07 + \frac{1.032}{s}\right)^2 + (1.518 + 2.022)^2}} \text{ A}$$

Номінальний струм статора асинхронного двигуна /н при номінальному ковзанні  $SH=0,05$  визначається так:

$$\begin{aligned} I'_2(\omega) &= \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}} = \\ &= \frac{220}{\sqrt{\left(1.07 + \frac{1.032}{0.05}\right)^2 + (1.518 + 2.022)^2}} = 10.004 \text{ A} \end{aligned}$$

Графік електромеханічної характеристики  $\omega = f(2)$  наведено на рис. 2.4.

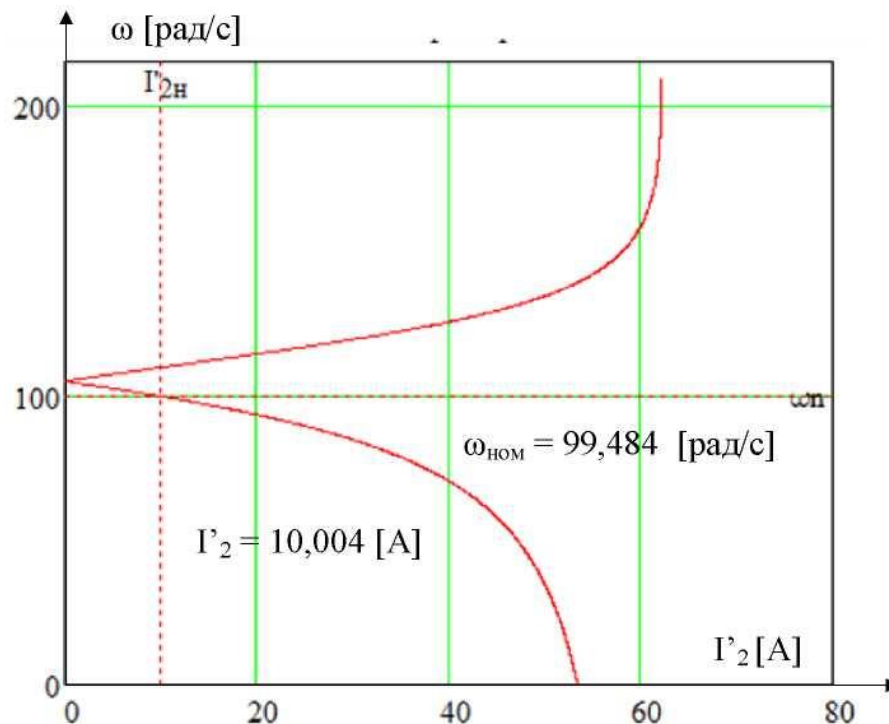


Рисунок 2.4 – Графік електромеханічної характеристики струму обмотки ротора

$$\omega\text{-f (I2)}$$

Номінальна швидкість обертання двигуна дорівнює  $\omega_H=99,484$ , струм ротора двигуна при номінальній швидкості дорівнює 10,004 А

На електромеханічній характеристиці видно перетин ліній швидкості і струму, отже, номінальна точка характеристики порахована правильно.

$$\begin{aligned} I_1(\omega) &= \sqrt{I_0^2 + I_2'(\omega)^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(\omega) \cdot \sin \varphi_{2H}} = \\ &= \sqrt{4.873^2 + 10.004^2 + 2 \cdot 4.873 \cdot 10.004 \cdot 0.16} = \\ &= 11.809 \text{ А} \end{aligned}$$

Для побудови електромеханічної характеристики струму статора використано такий вираз:

$$\begin{aligned} I_1(\omega) &= \sqrt{I_0^2 + I_2'(\omega)^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(\omega) \cdot \sin \varphi_{2H}} = \\ &= \sqrt{4.873^2 + I_2'(\omega)^2 + 2 \cdot 4.873 \cdot 10.004 \cdot 0.16} \end{aligned}$$

де

$$\sin \varphi_{2H} = \frac{X_1 + X_2'}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}} = \frac{1.518 + 2.022}{\sqrt{\left(1.07 + \frac{1.032}{s}\right)^2 + (1.518 + 2.022)^2}}$$

Електромеханічні характеристики струму статора двигуна наведено рис. 2.5.

Першою контрольною точкою є точка номінального режиму роботи при номінальній швидкості обертання двигуна, яка дорівнює 99,484 рад/с. Струм статора двигуна при номінальній швидкості дорівнює  $I^H = 11,809$  А. У точці номінального режиму роботи відбувається перетин лінії струму статора і номінальної швидкості обертання двигуна, отже, точка обчислена правильно.

Також на характеристиці видно, що вона починається не від початку осі ординат (вісь швидкості), а починається від деякого значення, яке дорівнює струму холостого ходу двигуна. Він дорівнює  $I_0 = 4,873 \text{ A}$ .

Номинальний струм статора двигуна:

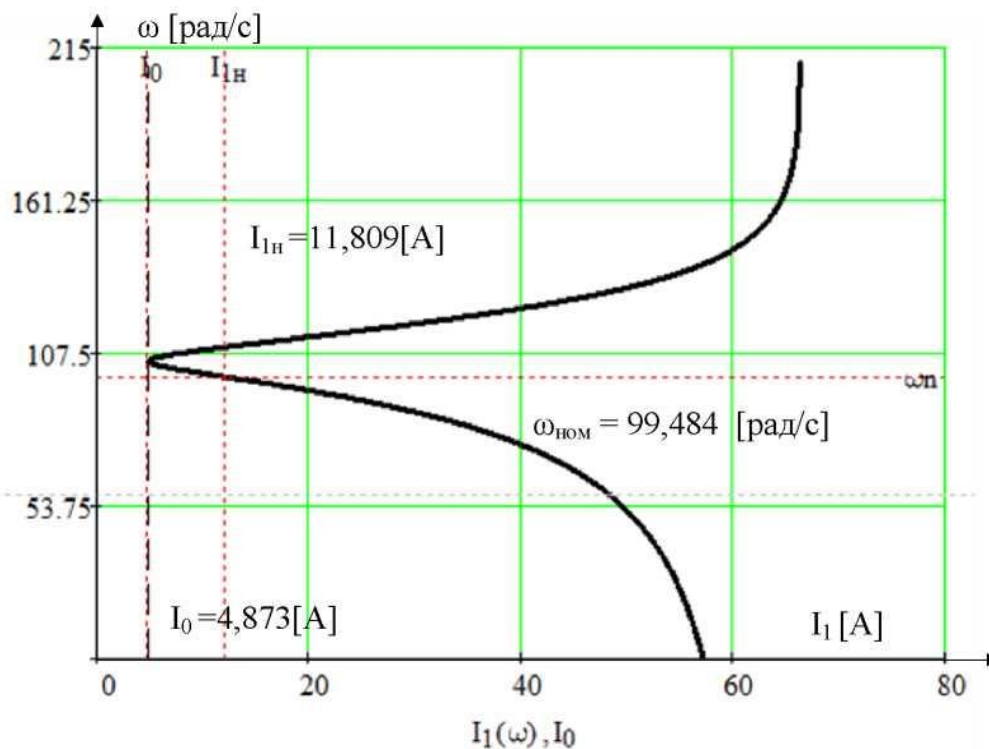


Рисунок 2.5 – Графік природної електромеханічної характеристики струму статора  $I = f(s)$  асинхронного двигуна

Виходячи з отриманих результатів, можна сказати про те, що характеристика побудована правильно, так як відбувається перетин номінального струму і номінально швидкості при номінальному режимі, перетин лінії критичної швидкості і струму при критичному ковзанні в точці критичного ковзання, швидкість дорівнює синхронної в точці перетину характеристики з лин.

Отже, номінальні параметри, отримані при побудові статичних характеристик, відповідають паспортним даним двигуна, похибка вбирається у 5%, отримані дані вважатимуться адекватними і основі можна будувати імітаційну модель.





## РОЗДІЛ 3

САК ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ  
З ВЕКТОРНИМ КЕРУВАННЯМ

## 3.1 Визначення робочої області електроприводу

Область роботи електроприводу у випадку для реверсивного електроприводу ліфтової лебідки в 4-х квадрантах площині координат показано рис. 3.1.

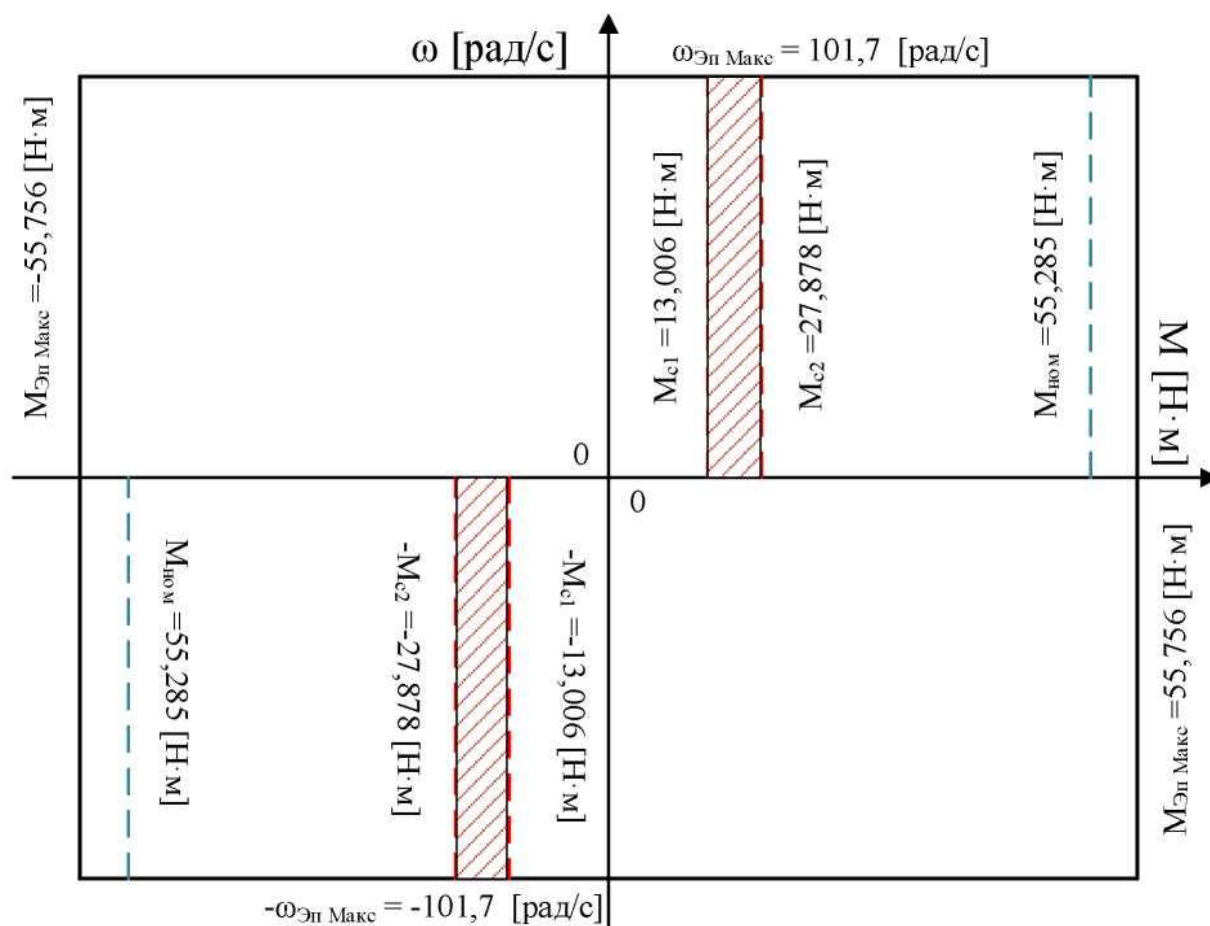


Рисунок 3.1 – Область роботи електроприводу ліфтової лебідки

Враховуючи, що найбільшим моментом опору електроприводу механізму ліфтової лебідки є  $M_{с2}=25,878$  [Н м], максимальна робоча область з моменту електроприводу вибрано значення, що вдвічі перевищує значення  $M_{с2}$  і дорівнює  $55,756$  [Н м], при  $M_n=55,2$ . Докладніше робоча область

електроприводу, з прикладу рухового режиму показана на рис. 3.2 і 3.3.

Вибір значення кутової швидкості, коли буде здійснюватися переміщення ліфтової кабіни, є важливим завданням.

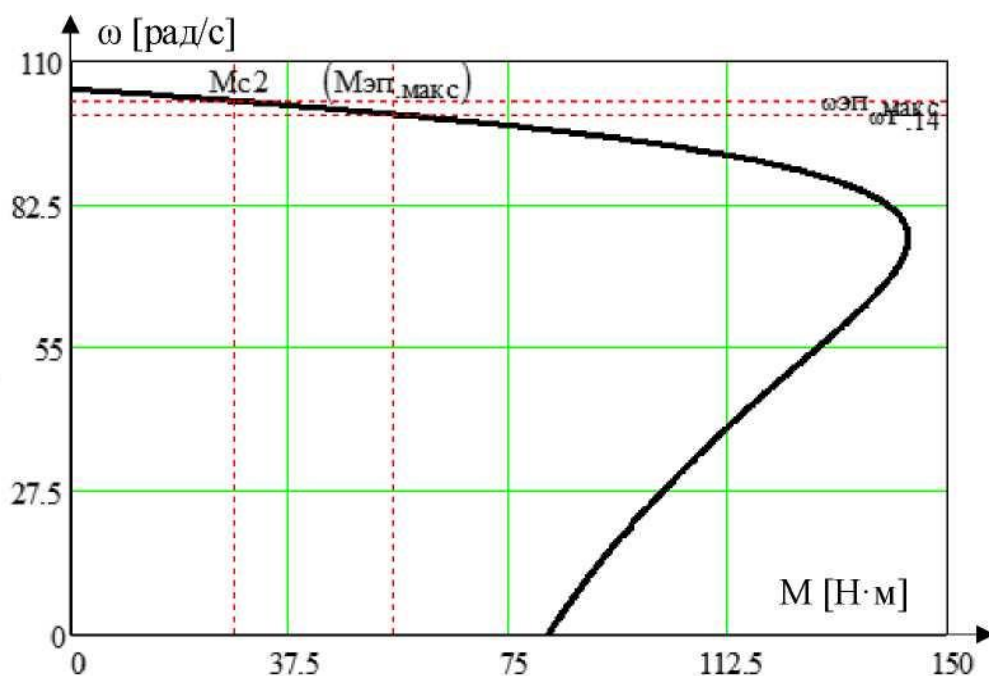


Рисунок 3.2 – Визначення зони роботи електроприводу

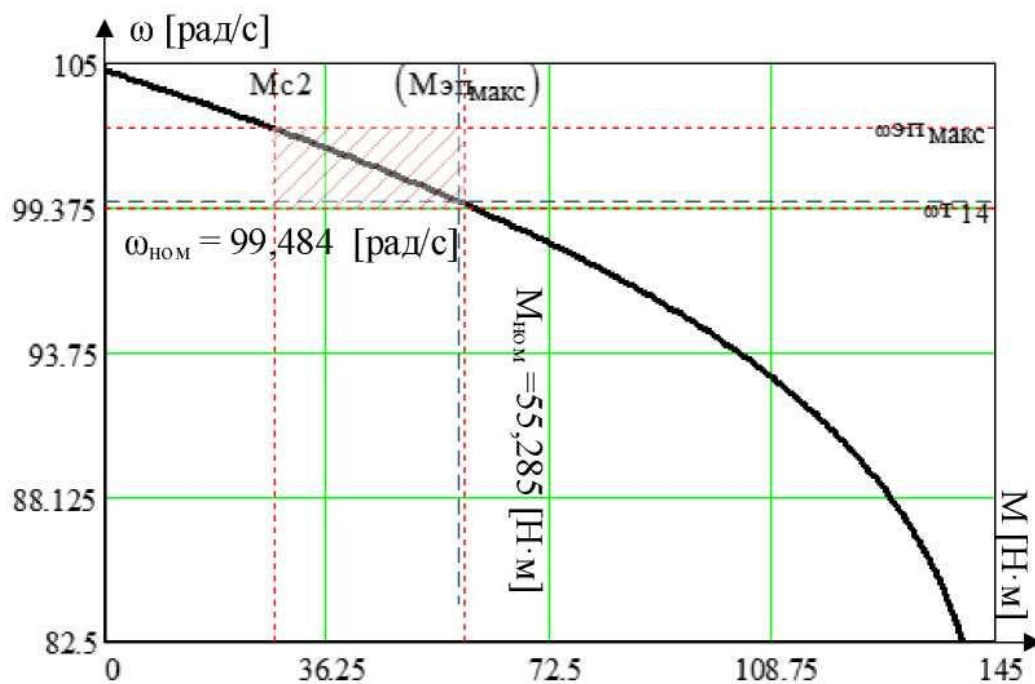


Рисунок 3.3 – Збільшена сфера роботи електроприводу

Враховуючи результати, показані на рис. 3.2 і 3.3, обраним значенням кутової швидкості є номінальне значення кутової швидкості двигуна RA132MB6, що дорівнює 99,484 [рад/с]. Нижче докладно представлені значення, винесені рис. 3.2 і 3.3.

$$M_{\text{эн max}} = 55.756 \text{ Нм}$$

$$M_{c2} = 27.878 \text{ Нм}$$

$$\omega_{14} = 99.4 \text{ рад/с}$$

$$\omega_{\text{эн max}} = 101.7 \text{ рад/с}$$

Розрахунок характеристики блоку формування завдання управління потекосцеплением представлено нижче:

$$U_{zc1} = U_{zc \text{ max}} \cdot \frac{\omega_n}{\omega_{\text{эн max}}} = 10 \cdot \frac{99.484}{101.7} = 9.7801 \text{ В}$$

де прийнято  $U = 10$ ;

$$U_{\text{эп}}(U_{zc}) \Big|_{\substack{U_{zc} = 0 \\ |U_{zc}| = U_{zc1}}} = U_{\text{эп max}} \text{ В}$$

де значення з  $T_{\text{max}} = 10 \text{ В}$ ;

$$U_{\text{эп}}(U_{zc}) \Big|_{\substack{|U_{zc}| = U_{zc1} \\ |U_{zc}| = U_{zc \text{ max}}}} = U_{\text{эп max}} \cdot \frac{U_{zc1}}{|U_{zc}|} \text{ В}$$

В однозонному електроприводі з векторним управлінням приймаємо  $U_{\psi} = U_{z\max} = \text{const}$ .

### 3.2 Розробка математичних моделей АД

Для докладнішого вивчення, як і перехідних процесів двигуна, так і системи керування обраного двигуна RA132MB6 буде проводитися поетапно, з докладним порівнянням показників якості кожної моделі. Завдяки цьому можна гарантувати адекватність моделювання. Для побудови математичної моделі та моделювання перехідних процесів використовується програма Matlab Simulink. [8]

Для побудови імітаційної моделі прямого пуску асинхронного двигуна у нерухомій системі координат необхідно розрахувати додаткові параметри. Еквівалентна індуктивність обмотки статора:

$$L_1 = L_{\sigma 1} + L_m = 0.00483 + 0.13 = 0.13483 \text{ Гн}$$

Еквівалентна індуктивність обмотки ротора, наведеного до ланцюга статора:

$$L'_2 = L_{\sigma 2} + L_m = 0.00643 + 0.13 = 0.13643 \text{ Гн}$$

Розрахуємо коефіцієнти структурної схеми:

$$K_r = \frac{L_m}{L'_2} = \frac{0.13}{0.13643} = 0.9528$$

$$L_\varepsilon = L_1 - \frac{L_m^2}{L'_2} = 0.13483 - \frac{0.13^2}{0.13643} = 0.011 \text{ Гн}$$

$$R_{\varepsilon} = R_1 + R'_2 \cdot K_r^2 = 1.07 + 1.032 \cdot 0.9528^2 = 2.007 \text{ Ом}$$

$$A_r = \frac{R'_2}{L'_2} = \frac{1.032}{0.13643} = 7.5643$$

Сумарний момент інерції приймаємо як суму моменту інерції двигуна та момент інерції механізму, наведений до валу двигуна:

$$J_{\Sigma} = J_{МПР} + J_{\partial\partial} = 0.176 + 0.482 = 0.224 \text{ кг м}^2$$

Система рівнянь трифазної системи напруг

$$\begin{cases} U_A(t) = \sqrt{2} \cdot U_{1\phi} \cdot \sin(314 \cdot t) \\ U_B(t) = \sqrt{2} \cdot U_{1\phi} \cdot \sin(314 \cdot t - 120^\circ) \\ U_C(t) = \sqrt{2} \cdot U_{1\phi} \cdot \sin(314 \cdot t + 120^\circ) \end{cases}$$

Система рівнянь нерухомої двофазної системи напруг

$$\begin{cases} U_{\alpha}(t) = \sqrt{2} \cdot U_{1\phi} \cdot \sin(314 \cdot t) \\ U_{\beta}(t) = \sqrt{2} \cdot U_{1\phi} \cdot \sin(314 \cdot t) \end{cases}$$

Перехід від трифазної системи напруги до нерухомої двофазної здійснюється за допомогою прямого перетворення Кларка:

$$U_{\alpha}(t) = U_A(t)$$

$$U_{\beta}(t) = \frac{U_A(t) + 2 \cdot U_B(t)}{\sqrt{3}}$$

Реалізація перетворення Кларка в Matlab Simulink показано рис. 3.4.

Імітаційна модель асинхронного двигуна в нерухомій системі координат побудована Matlab Simulink показано рис. 3.5.

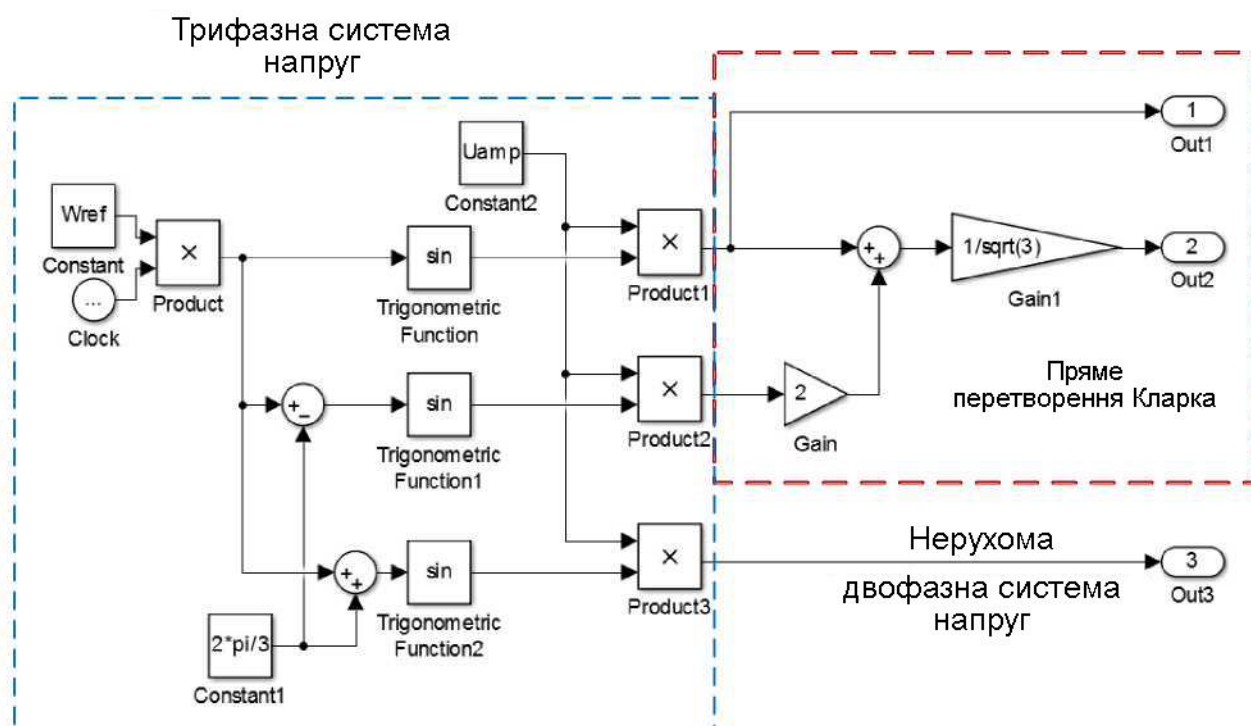


Рисунок 3.4 – Реалізація перетворення Кларку на Matlab Simulink

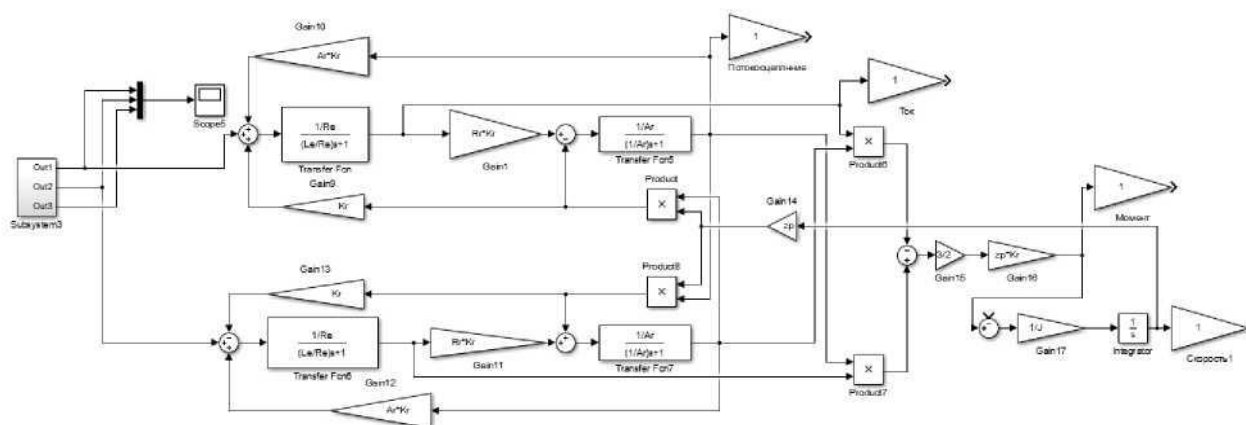


Рисунок 3.5 – Імітаційна модель асинхронного двигуна в нерухомій системі координат Matlab Simulink

Оскільки система управління будується в системі координат, що обертається, в Matlab Simulink була побудована відповідна імітаційна модель асинхронного двигуна, показана на рис. 3.6. Структурна схема модель

асинхронного двигуна в системі координат, що обертається, з орієнтацією по вектору потокосцеплення ротора показана на рис. 3.9.

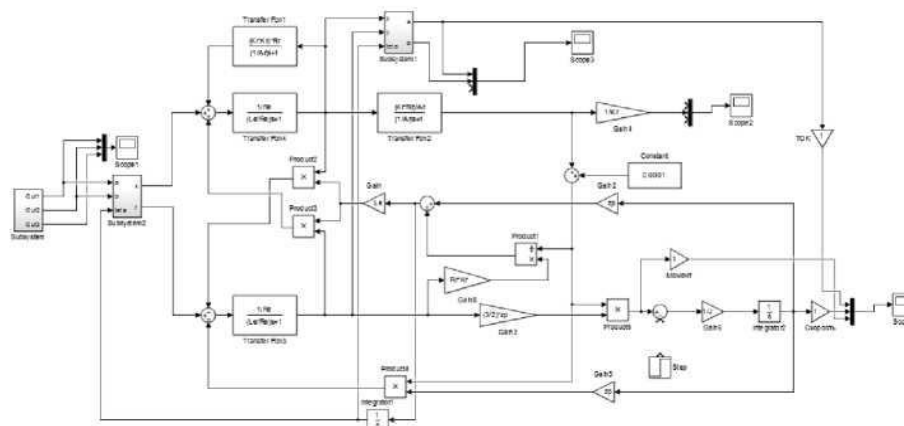


Рисунок 3.6 – Імітаційна модель асинхронного двигуна в системі координат, що обертається в Matlab Simulink

На рис. 3.7 наведено перехідні процеси при пуску АТ у різних системах координат. Нерухлива система координат використовується для отримання найбільш реалістичних перехідних процесів, у той час як в системі, що обертається, буде розроблятися система управління.

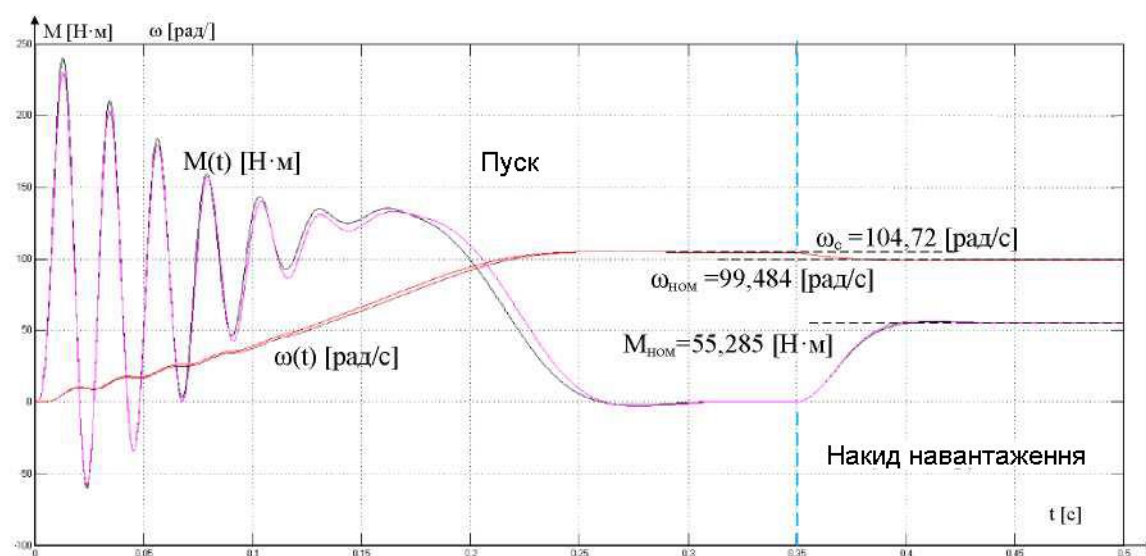


Рисунок 3.7 – Порівняння перехідних процесів при прямому пуску АТ змодельованих у різних системах координат



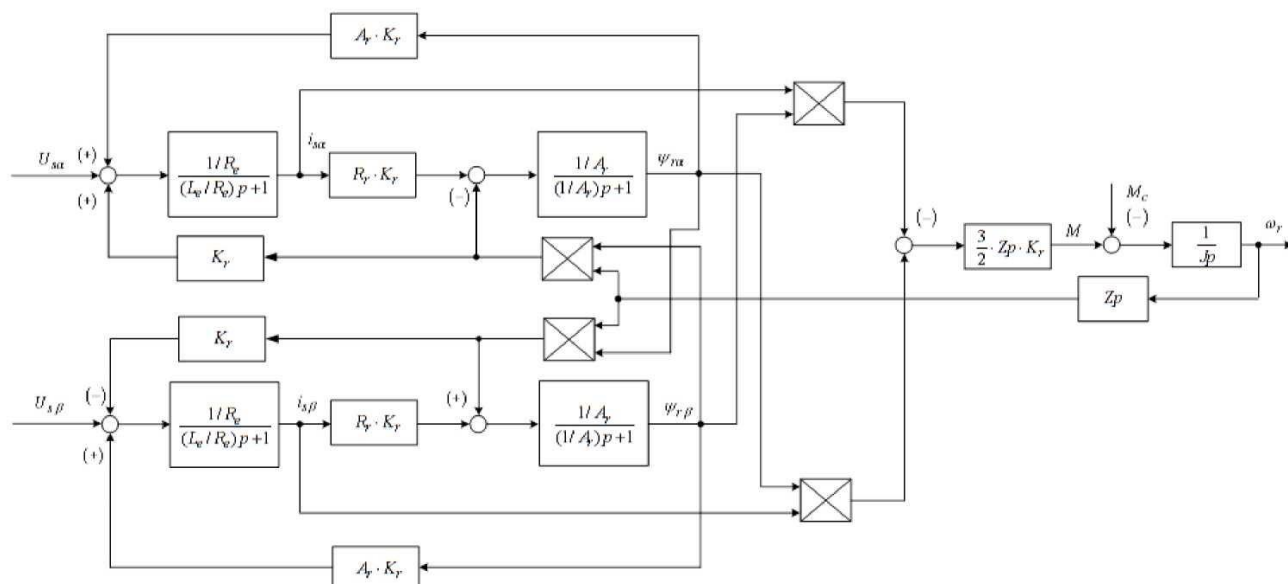


Рисунок 3.8 – Структурна схема моделі асинхронного двигуна у нерухомій системі координат

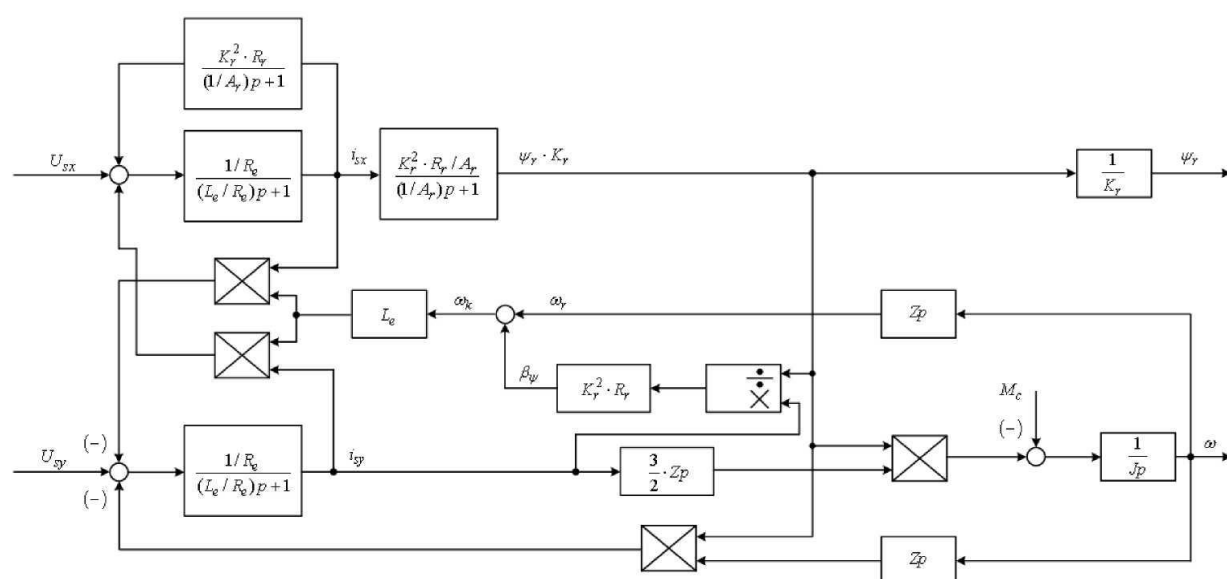


Рисунок 3.9 – Структурна схема моделі асинхронного двигуна в системі координат, що обертається, з орієнтацією по вектору потокозцеплення ротора

Спираючись на отримані результати та порівняння їх з розрахованими раніше, можна дійти невтішного висновку у тому що розрахунок параметрів АТ, як і моделювання перехідних процесів у різних системах координат, з допомогою програми Matlab Simulink, виконані правильно.



$$T_{\mu To} = \frac{T_{CT}}{3} = \frac{0.00025}{3} = 8.333 \cdot 10^{-5} \text{ с} - \text{мала постійна часу ланцюга зворотний}$$

зв'язок по струму;

$$T_{c\psi} = \left(16 \cdot \frac{1}{f_{шум}}\right) \cdot n_{\psi} = \left(16 \cdot \frac{1}{8000}\right) \cdot 2 = 0.004 \text{ с} - \text{період розрахунку}$$

потокотзчеплення, де  $n_{\psi} = 2$  прийняте число вимірювань;

$$T_{\mu\psi o} = \frac{T_{c\psi}}{3} = \frac{0.004}{3} = 0.00133 \text{ с} - \text{мала постійна часу ланцюга зворотного}$$

зв'язку по потоку зчеплення;

$$T_{cc} = \left(16 \cdot \frac{1}{f_{шум}}\right) \cdot n_c = \left(16 \cdot \frac{1}{8000}\right) \cdot 2 = 0.004 \text{ с} - \text{період розрахунку}$$

(вимірювання) швидкості, де  $n_c = 2$  – прийняте число вимірювань;

$$T_{\mu co} = \frac{T_{cc}}{3} = \frac{0.004}{3} = 0.00133 \text{ с} - \text{мала постійна часу ланцюга зворотний}$$

зв'язок за швидкістю.

Адекватність параметрів моделі, довідкових та одержаних розрахункових параметрів електродвигуна забезпечується рішенням спільної системи рівнянь щодо струму намагнічування:

$$\begin{cases} \psi_{2xH} = \frac{M_{ЭМН}}{\frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{1\phi H}^2 - I_0^2}} \\ \psi_{2xH} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot I_m \end{cases}$$

Рішення спільної системи щодо струму намагнічування показано рис. 3.21.

Струм намагнічування, що відповідає параметрам структурної схеми  $I = 4,405 \text{ [A]}$  несуттєво відрізняється від значення розрахункового струму намагнічування  $I_0$ .

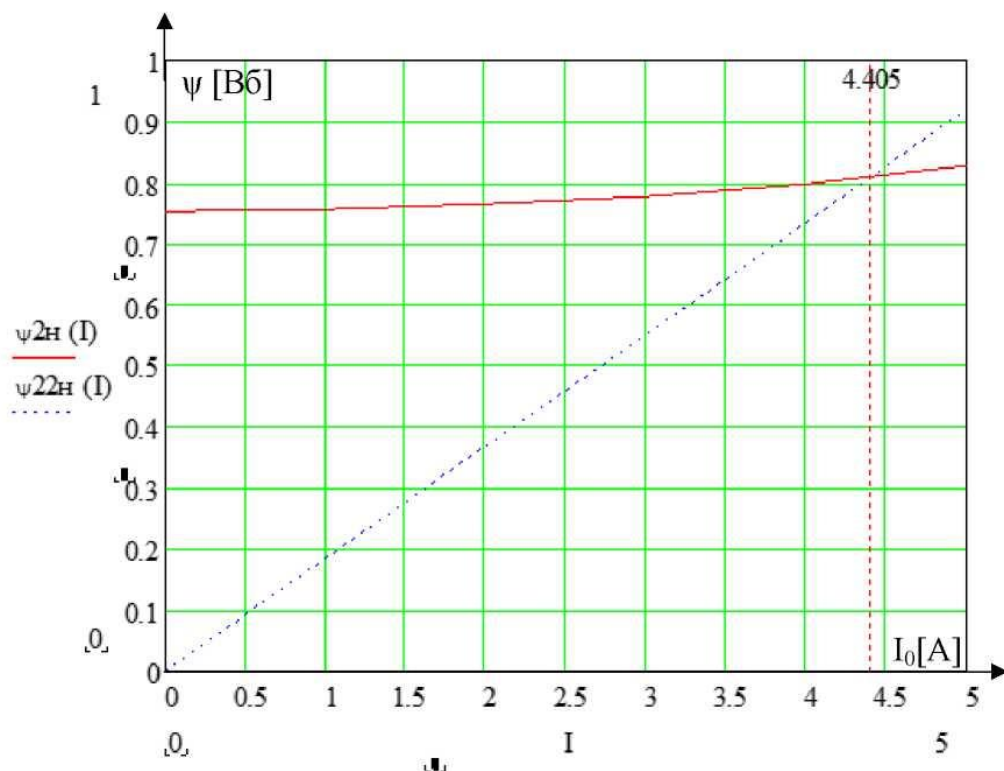


Рисунок 3.21 Розв'язання системи рівнянь щодо струму намагнічування у програмному середовищі MathCad

Струм намагнічування, що відповідає параметрам структурної схеми  $I^* = 4,405$  [A] несуттєво відрізняється від значення розрахункового струму намагнічування  $I_0$ .

Виходячи з цього, розрахуємо параметри структурної схеми, необхідні оптимізації контурів регулювання:

– значення номінального потокозчеплення двигуна

$$\psi_{2хн}^* = \psi_{2н}^* = \sqrt{2} \cdot I_0^* \cdot L_m = \sqrt{2} \cdot 4.405 \cdot 0.013 = 0.81 \text{ Вб}$$

– значення номінального струму  $I_{1х}$ :

$$I_{1хн}^* = \sqrt{2} \cdot I_0^* = \sqrt{2} \cdot 4.405 = 6.13 \text{ A}$$

– значення номінального струму  $I_{1х}$ :

$$I_{1yn}^* = \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{1\phi n}^2 - (I_0^*)^2} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{12.098^2 - 4.405^2} = 15.935 \text{ A}$$

### 3.3.1 Оптимізація контурів регулювання Оптимізація контуру струму

Структурна схема контуру струму з інерційним зворотним зв'язком і повною компенсацією внутрішнього негативного зворотного зв'язку по ЕРС двигуна наведена на рис. 3.21. Контур струму  $11x$  і  $11y$  є ідентичними.

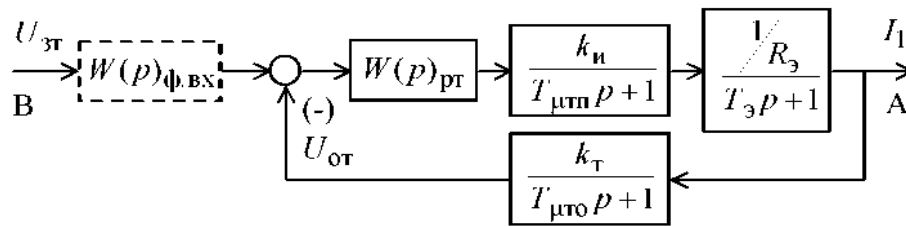


Рисунок 3.21 – Структурна схема контуру струму

На схемі рис. 3.21 прийняті такі позначення:

$U_{3T}$  – напруга завдання струм, В;

$T_{\mu тп} = T_H = 0.0000625$  с;

$T_{\mu тo} = 0.000083333$ с – мала постійна часу ланцюга зворотний зв'язок;

$k_T = \frac{U_{эм max}}{I_{1q max}} = \frac{10}{20.8} = 0.48$  В/А – Коефіцієнт зворотного зв'язку по струму.

Передатна функція ПІ-регулятора струму

$$W_{PT}(p) = k_{PT} \cdot \frac{T_{PT} \cdot p + 1}{T_{PT} \cdot p}$$

Коефіцієнт посилення регулятора струму

$$k_{PT} = \frac{T_3 \cdot R_3}{k_n \cdot k_T \cdot a_T \cdot (T_{\mu тп} + T_{\mu тo})} = \frac{0.0055 \cdot 2.0069}{31.113 \cdot 0.4854 \cdot 2 \cdot (0.0000625 + 0.000083333)} = 2.4887$$

де  $a_r = 2$  коефіцієнт оптимізації контуру струму.

Постійна часу регулятора струму,  $T_{рт} = T_e = 0,0055$  [с].

Оптимізований контур струму має таку передатну функцію:

– замкнутого контуру з управління

$$W(p)_{\text{т зам}} = \frac{\frac{1}{k_m} \cdot (T_{\mu to} p + 1)}{a_m T_{\mu mn} T_{\mu to} T_{\mu tэ} p^3 + a_m T_{\mu tэ}^2 p^2 + a_m T_{\mu tэ} p + 1} \approx$$

$$\approx \frac{\frac{1}{k_m} \cdot (T_{\mu to} p + 1)}{a_m T_{\mu tэ}^2 p^2 + a_m T_{\mu tэ} p + 1}$$

де  $T_{цте} = T_{цтп} + T_{цто} = (0,0000625 + 0,000083333 = 0,00014583)$  [с – еквівалентна мала постійна часу оптимізованого контуру струму;

Налаштування контуру струму з ПІ – регулятором близьке до налаштування модульного оптимуму (МО) системи 2-го порядку.

Очікувані показники якості роботи контуру струму

Залежно від співвідношення малих постійних часу  $T$  і  $T$  контур має такі значення показників якості:

– статична помилка з управління:

$$\Delta I_{1ycm} = 0 \text{ A}$$

– смуга пропускання по модулю:

$$\omega_n^{(м)} = \frac{(0.71 \div 0.9)}{T_{\mu mn} + T_{\mu to}} = \frac{0.9}{0.00014583} = 6171.56 \text{ рад/с}$$

– перерегулювання та час першого входження в 5% зону при відпрацюванні ступінчастого керуючого впливу:

$$\sigma = (4.3 \div 6.7) \%$$

$$t_{py1}^{(5)} = (4.1 \div 2.75) \cdot (T_{\mu mn} + T_{\mu mo}) = 4.1 \cdot 0.00014583 = 0.000597903 \text{ c}$$

Моделювання контуру струму у програмі Matlab Simulink

Імітаційна модель контуру струму представлена на рис. 3.22. На рис. 3.23 і 3.24 показані перехідний процес та ЛАЧХ контуру струму. Результати очікуваних показників якості контуру струму та отриманих експериментально зведені у табл. 3.1.

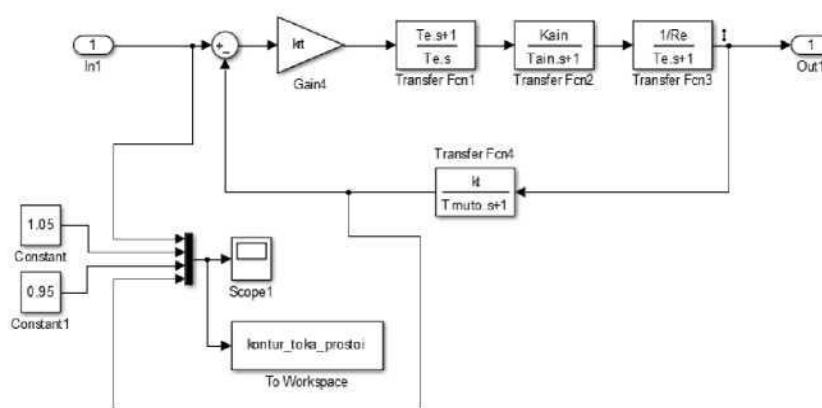


Рисунок 3.22 – Модель контуру струму, представлена у програмі Matlab Simulink

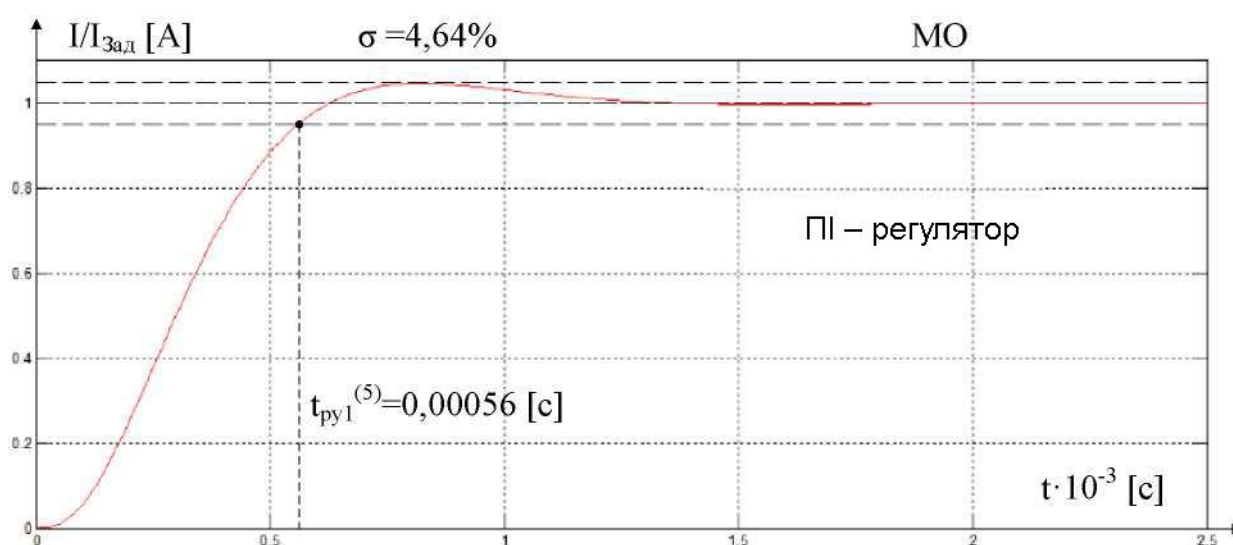


Рисунок 3.23 Перехідні характеристики контуру струму

Таблиця 3.1 – Показники якості контуру струму

|           | (м)     | $t(5) \text{ pyl}$ | $\sigma$             |
|-----------|---------|--------------------|----------------------|
| Очікувані | 6171,56 | 0.0005979          | $t > \sigma \cdot I$ |
| Отримані  | ~6190   | 0,00056            | 4,64                 |

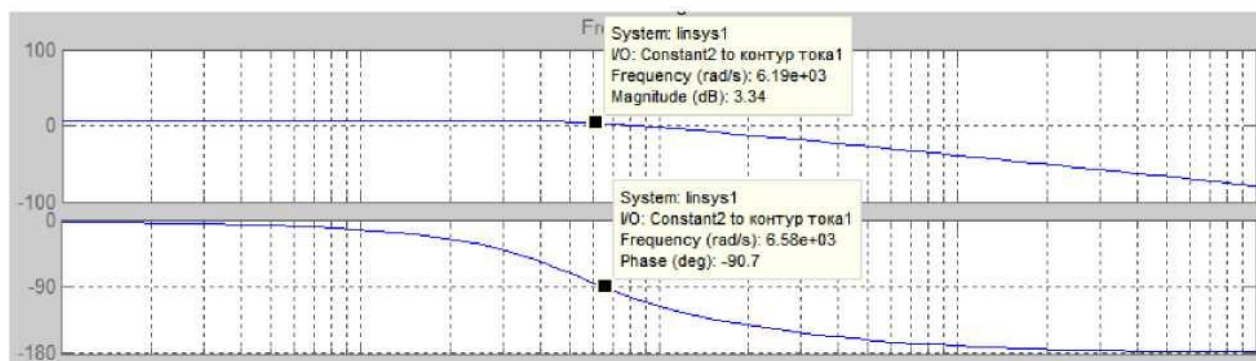


Рисунок 3.24 – Аналіз ЛАЧХ контуру струму

### Оптимізація контуру потокозчеплення

Структурна схема контуру потокозчеплення з інерційним зворотним зв'язком та ПІ-регулятором наведена на рис. 3.25.

При оптимізації контуру потокозчеплення внутрішній оптимізований замкнутий контур струму представлений усіченою функцією передачі 1-го порядку.

$$W(p)_{m \text{ зам}} \approx \frac{1}{k_m} \frac{1}{T_m \cdot p + 1}$$

$$\text{де } T_m = a_m \cdot T_{\mu m \varepsilon} = a \cdot (T_{\mu mn} + T_{\mu mo}) = 2 \cdot (0.0000625 + 0.0000833) = 0.00029166 \text{ с}$$

– еквівалентна постійна часу оптимізованого контуру струму;



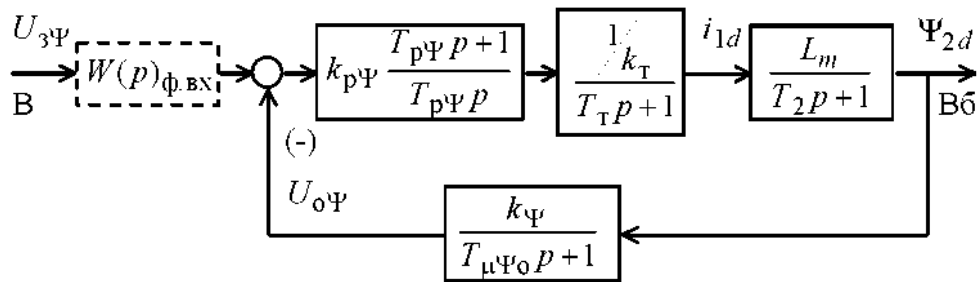


Рисунок 3.25 – Структурна схема контуру потокозчеплення з ПІ-регулятором

$$k_{\psi} = \frac{U_{\psi \max}}{\psi_{2n}^*} = \frac{10}{0.81} = 12.345 \text{ В/Вб}$$

Передатна функція ПІ-регулятора потокозчеплення представлена в наступному вигляді:

$$W(p)_{p\psi} = k_{p\psi} \frac{T_{p\psi} \cdot p + 1}{T_{p\psi} \cdot p}$$

Коефіцієнт посилення та постійна часу регулятора потокозчеплення визначаються за виразами:

$$k_{p\psi} = \frac{T_2 \cdot k_m}{L_m \cdot k_{\psi}} \cdot \frac{1}{a_{\psi} \cdot T_{\mu\psi\epsilon}} = \frac{0.1322 \cdot 0.7692}{0.13 \cdot 12.345} \cdot \frac{1}{2 \cdot 0.0015916} = 12.3039$$

$$T_{p\psi} = T_2 = 0.1322 \text{ с}$$

де  $T_{\mu\psi\epsilon} = (T_{\mu\psi\pi} + T_{\mu\psi\sigma}) = (0.0002916 + 0.0013) = 0.0015916 \text{ [с]}$  – еквівалентна мала постійна контура потокозчеплення;

$T = T_T = 0.0002916 \text{ [с]}$  – мала постійна часу прямому каналі контуру потокозчеплення;

$a_t = 2$  – коефіцієнт оптимізації контуру потокозчеплення.

Контур потокозчеплення з ПІ-регулятором, налаштований таким чином,

має наступну передатну функцію замкнутого контуру управління:

$$W(p)_{\psi \text{ зам}} = \frac{\frac{1}{k_{\psi}} \cdot (T_{\psi 0} p + 1)}{a_{\psi} T_T T_{\mu \psi 0} T_{\mu \psi \varepsilon} p^3 + a_{\psi} T_{\mu \psi \varepsilon}^2 p^2 + a_{\psi} T_{\mu \psi \varepsilon} p + 1} \approx$$

$$\approx \frac{\frac{1}{k_{\psi}} \cdot (T_{\psi 0} p + 1)}{a_{\psi} T_{\mu \psi \varepsilon}^2 p^2 + a_{\psi} T_{\mu \psi \varepsilon} p + 1}$$

Налаштування контуру поточкозчеплення з ПІ-регулятором близьке до налаштування на МО системи 2-го порядку. Контур є астатичною системою регулювання першого порядку з управління і забезпечує нульову помилку з управління  $\Delta\Psi = 0$ , що встановилася.

– смуга пропускання по модулю

$$\omega_n^{(M)} = \frac{(0.71 \div 0.9)}{T_{\mu \psi \varepsilon}} \approx \frac{0.9}{0.0015916} = 565.469 \text{ рад/с}$$

– перерегулювання та час першого входження в 5% зону при відпрацюванні ступінчастого керуючого впливу

$$\sigma = (4.3 \div 6.7)\%$$

$$t_{py1}^{(5)} = (4.1 \div 2.75) \cdot T_{\mu \psi \varepsilon} \approx 4.1 \cdot 0.0015916 = 0.006526 \text{ с}$$

Моделювання контуру поточкозчеплення у програмі Matlab Simulink

Модель контуру поточкозчеплення зі спрощеним контуром струму представлена рис. 3.26. Зміст «контур потоку» і «зворотний зв'язок поточкозчеплення» представлено рис. 3.27 і 3.28. Перехідний процес контуру поточкозчеплення представлений рис. 3.29. Логарифміческая амплітудно-фазова частотна характеристика за представлена.

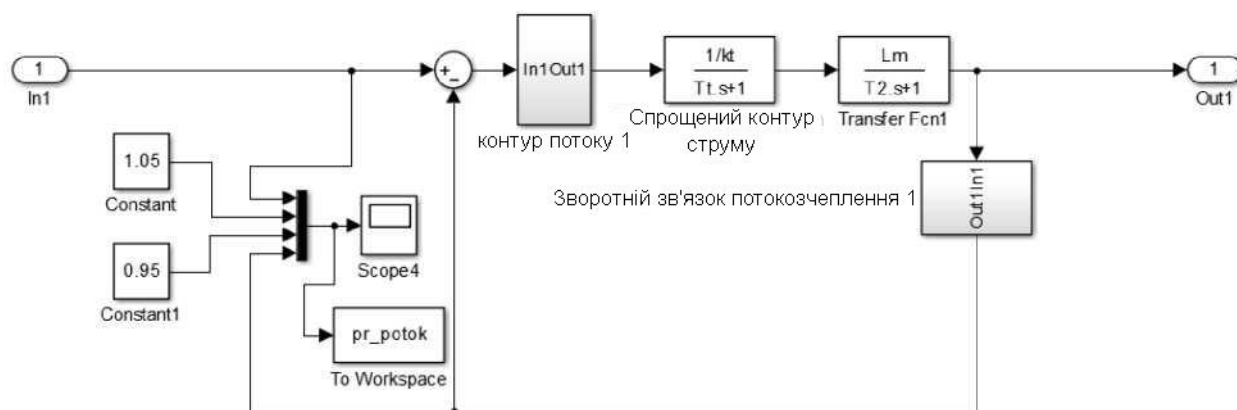


Рисунок 3.26 – Модель контуру потокозчеплення зі спрощеним контуром струму

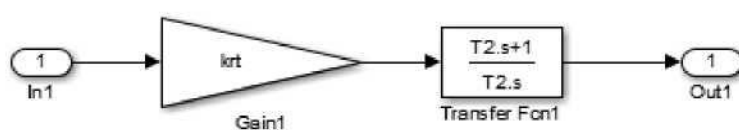


Рисунок 3.27 – Зміст блоку «контур потоку»

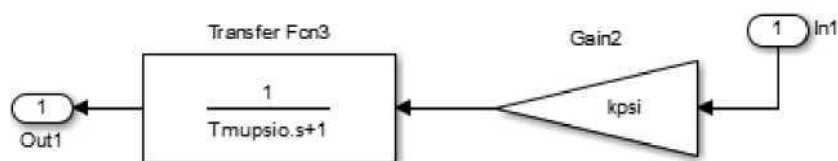


Рисунок 3.28 – Зміст блоку «зворотний зв'язок потокозчеплення»

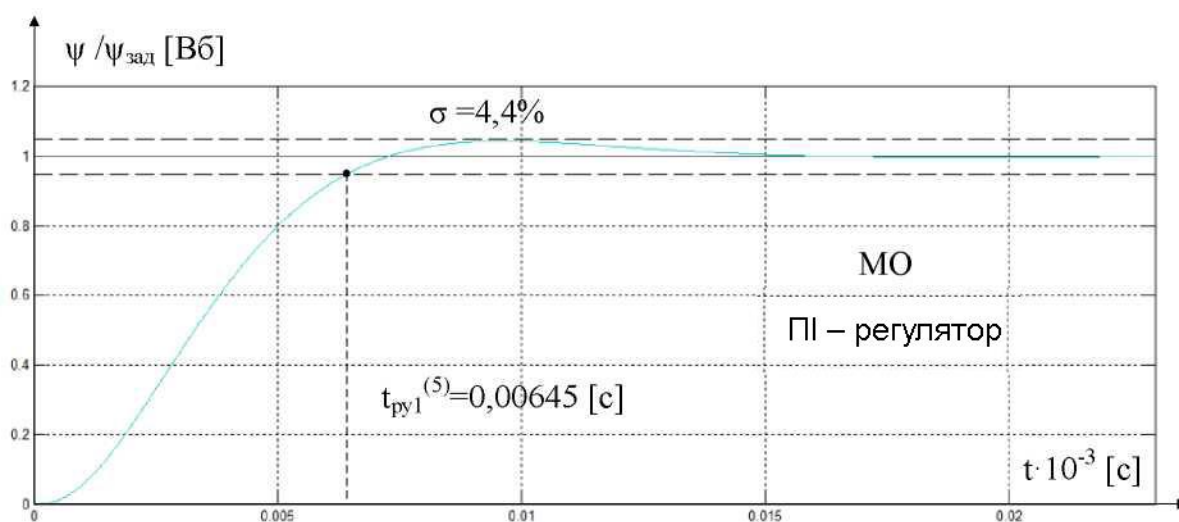


Рисунок 3.29 – Перехідний процес контуру потокозчеплення

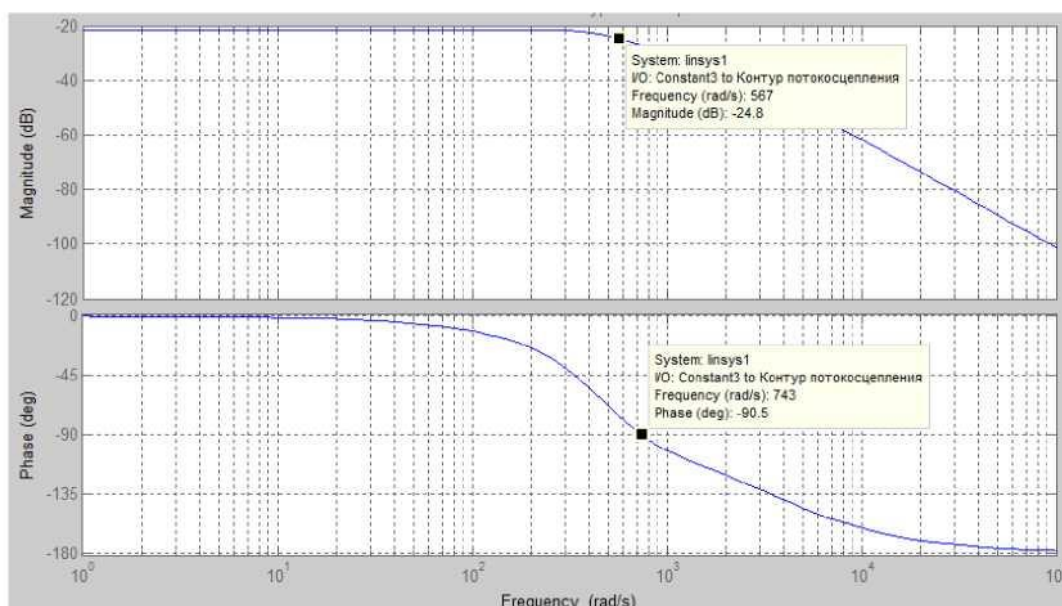


Рисунок 3.30 – Аналіз ЛАЧХ контуру потокозчеплення

Порівняння очікуваних результатів та отриманих експериментальним шляхом розрахованого контуру потокозчеплення представлено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Порівняння очікуваних результатів

|           | (м)     | t(5)     | $\sigma$          |
|-----------|---------|----------|-------------------|
| Очікувані | 565,469 | 0,006526 | $\gamma$ -' vcf П |
| Отримані  | 567     | 0,00645  | 4,4               |

Оптимізація контуру швидкості з ПІ регулятором

Структурна схема контуру швидкості з інерційним зворотним зв'язком та ПІ-регулятором наведена на рис. 3.31.

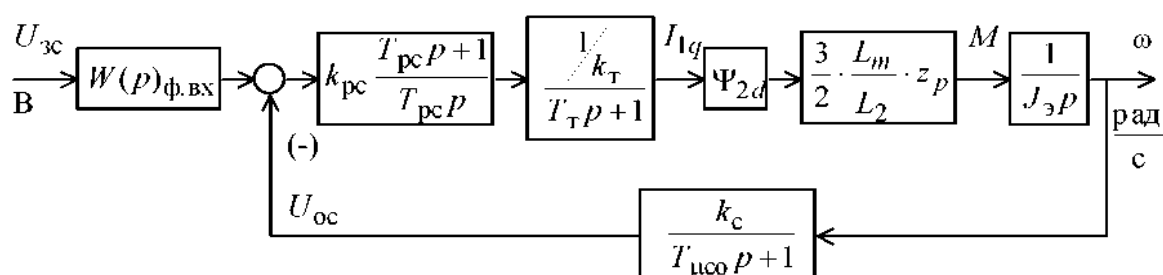


Рисунок 3.31 – Структурна схема контуру швидкості з ПІ-регулятором

Передатна функція ПІ-регулятора швидкості виглядає так:

$$W(p)_{pc} = k_{pc} \frac{T_{pc} \cdot p + 1}{T_{pc} \cdot p}$$

Коефіцієнт посилення та постійна часу регулятора швидкості визначаються за виразами:

$$\begin{aligned} k_{pc} &= \frac{J_{\varepsilon} \cdot k_T}{\Psi_{2d} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot k_c} \cdot \frac{1}{a_c \cdot T_{\mu c \varepsilon}} = \\ &= \frac{0.224 \cdot 0.7692}{0.896 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{0.13}{0.1364} \cdot 3 \cdot 0.1212} \cdot \frac{1}{2 \cdot 0.00159167} = 98.879 \end{aligned}$$

де  $T_{pc} = a_c \cdot T_{\mu c \varepsilon} = 2 \cdot 2 \cdot 0.00159167 = 0.0065$  [с],

$T_{\mu c \varepsilon} = (T_{\mu \varepsilon \pi} + T_{\mu \varepsilon o}) = (0.00029167 + 0.0013) = 0.00159167$  [с] – еквівалентна мала постійна часу оптимізованого контуру швидкості;

$T_{\mu c \varepsilon} = T_T = 0.0029167$  [с] – мала постійна часу в прямому каналі контуру швидкості;

$b_c = a_c = 2$  – коефіцієнти оптимізації контуру швидкості.

Коефіцієнт зворотного зв'язку контуру за швидкістю

$$k_{pc} = \frac{U_{зад}}{\omega_{\varepsilon n \max}} = \frac{10}{101.7} = 0.0983$$

Контур швидкості з ПІ-регулятором та постійним налаштуванням у першій зоні та адаптивним ПІ-регулятором у другій зоні має наступні передатну функцію замкнутого контуру з управління:

$$\begin{aligned}
W(p)_{c3aM} &= \frac{1}{k_c} \times \\
&\times \frac{(b_c a_c T_{\mu c3} p + 1) \cdot (T_{\mu c0} p + 1)}{b_c a_c^2 T_T T_{\mu c0} T_{\mu c3}^2 p^4 + b_c a_c^2 T_{\mu c3}^3 p^3 + b_c a_c^2 T_{\mu c3}^2 p^2 + b_c a_c T_{\mu c3} p + 1} \approx \\
&\approx \frac{\frac{1}{k_c} (b_c a_c T_{\mu c3} p + 1) \cdot (T_{\mu c0} p + 1)}{b_c a_c^2 T_{\mu c3}^3 p^3 + b_c a_c^2 T_{\mu c3}^2 p^2 + b_c a_c T_{\mu c3} p + 1}
\end{aligned}$$

Очікувані показники якості контуру швидкості

Оптимізований контур при відпрацюванні ступінчастих керуючих впливів забезпечує високу швидкодію при перерегулюванні в загальному випадку понад 43%.

Налаштування контуру швидкості з ПІ-регулятором забезпечує нульові значення статичної та швидкісної помилки контуру

$$\Delta\omega_{уст} = 0$$

$$\Delta\omega_{ск} = 0$$

Динамічні показники контуру мало залежать від співвідношення малих постійних часу і попередньо можуть бути прийняті такі значення:

Смуга пропускання контуру по модулю та по фазі

$$\omega_n^{(M)} \approx \frac{0.85}{T_{\mu c3}} = \frac{0.85}{0.00159167} = 534.034 \text{ рад/с}$$

$$\omega_n^{(\phi)} \approx \frac{0.59}{T_{\mu c3}} = \frac{0.59}{0.00159167} = 370.682 \text{ рад/с}$$

– перерегулювання, час першого та остаточного входження в 5% зону при відпрацюванні стрибка завдання

$$\sigma \geq 43\%$$

$$t_{py1}^{(5)} \approx 2.94 \cdot T_{\mu c3} = 2.94 \cdot 0.00159167 = 0.004679 \text{ c}$$

$$t_{py2}^{(5)} \approx 14.7 \cdot T_{\mu c3} = 14.7 \cdot 0.00159167 = 0.023 \text{ c}$$

Моделювання контуру швидкості у програмі Matlab Simulink

Імітаційна модель контуру швидкості, налаштованого на симетричний оптимум, представлена рис. 3.32. На рис. 3.33 і 3.34 представлений перехідний процес контуру швидкості та логарифмічна амплітудно-фазова частотна характеристика даного контуру.

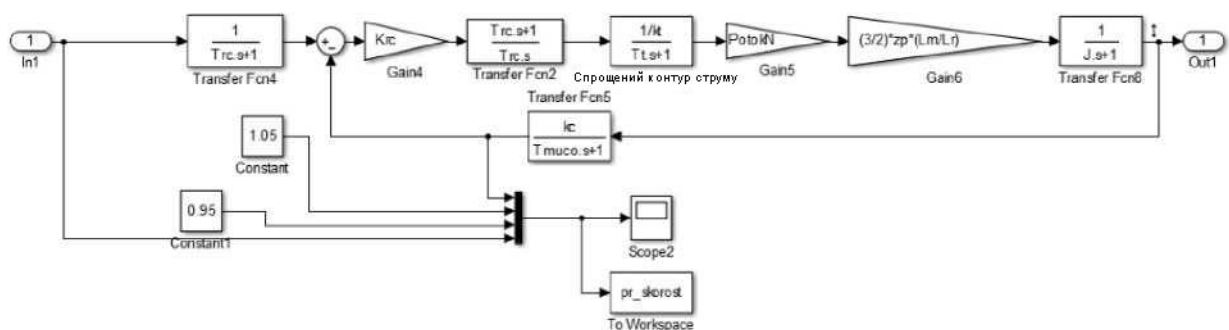


Рисунок 3.32 – Модель контуру швидкості зі спрощеним контуром струму, налаштована на СО, представлена у програмі Matlab Simulink

Порівняння очікуваних результатів та отриманих експериментальним шляхом розрахованого контуру швидкості з вхідним фільтром на вході представлено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Порівняння результатів

|           | (м)    | (ф)      | py1      | t(5)    | σ    |
|-----------|--------|----------|----------|---------|------|
| Очікувані | 469,82 | 326,1109 | 0,004679 | 0,023   | 43   |
| Отримані  | 534    | 370      | 0,0047   | 0,02137 | 43,4 |

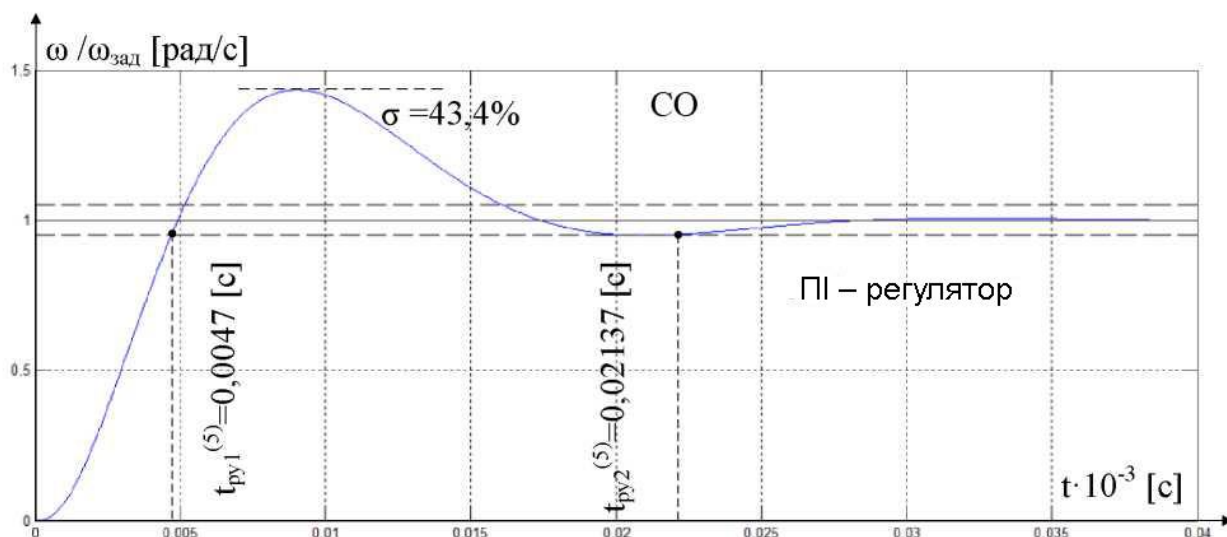


Рисунок 3.33 – Перехідний процес контуру швидкості, налаштованого на СО

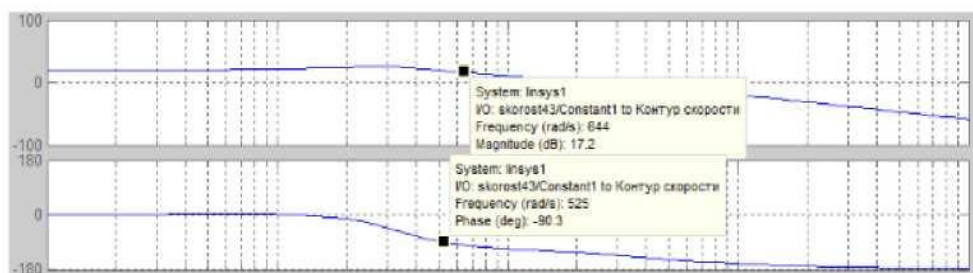


Рисунок 3.34 – Аналіз ЛАЧХ контуру швидкості, налаштованого на СО

Якщо на вході контуру встановити фільтр, що згладжує, то перерегулювання не перевищуватиме 8,3 %. Передатна функція замкнутого контуру швидкості з управління набуває вигляду вказаного нижче. Імітаційна модель контуру швидкості налаштованого на СО+Ф показана рис. 3.35 і перехідний процес контуру швидкості налаштованого на СО+Ф показаний рис. 3.36.



$$W(p)_{\text{сз.м}} = \frac{1}{k_c} \times \frac{(b_c a_c T_{\mu\text{сз}} p + 1)}{b_c a_c^2 T_T T_{\mu\text{сз}} T_{\mu\text{сз}}^2 p^4 + b_c a_c^2 T_{\mu\text{сз}}^3 p^3 + b_c a_c^2 T_{\mu\text{сз}}^2 p^2 + b_c a_c T_{\mu\text{сз}} p + 1} \approx \frac{1}{k_c} (b_c a_c T_{\mu\text{сз}} p + 1) \approx \frac{1}{b_c a_c^2 T_{\mu\text{сз}}^3 p^3 + b_c a_c^2 T_{\mu\text{сз}}^2 p^2 + b_c a_c T_{\mu\text{сз}} p + 1}$$

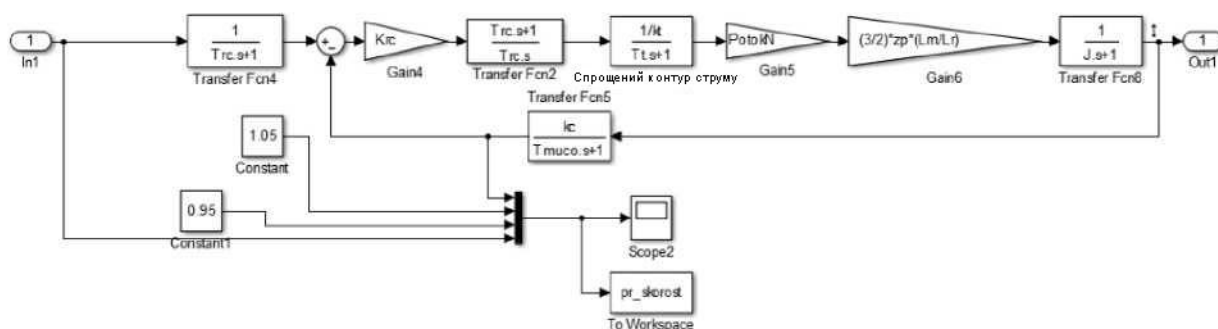


Рисунок 3.35 – Модель контуру швидкості зі спрощеним контуром струму, налаштована на СО+Φ, представлена у програмі Matlab Simulink

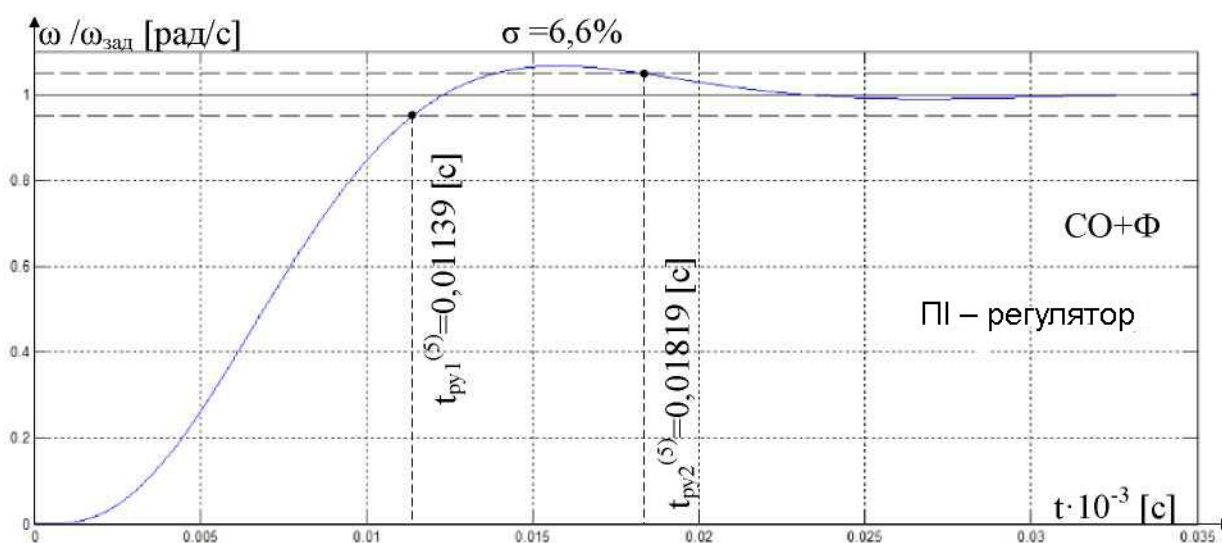


Рисунок 3.36 – Перехідний процес контуру швидкості, налаштованого на СО + Φ

Порівнювання очікувані показники якості та результати моделювання в кожному контурі можна зробити висновок про те, що налаштування було проведено адекватно і всі результати максимально наближені до очікуваних. Однак до контуру швидкості, налаштованого на СО+Φ, необхідно внести зміни.

### Затримка контуру швидкості

Для отримання результатів моделювання, найбільш наближених до реальних перехідних процесів, було прийнято рішення збільшити малу постійну часу в контурі швидкості і примусово обмежити швидкодію контуру швидкості, з метою розділити по швидкодії між собою контур потягосцеплення і контур швидкості.

$T^{\wedge} = (26 \cdot T_{\text{цт}} + T_{\text{цсо}}) = (0,003792 + 0,0013) = 0,005092$  [с] – еквівалентна мала постійна часу оптимізованого контуру швидкості.

Після перерахунку коефіцієнта посилення було прийнято значення, що дорівнює  $KPC = 147,188$ . Результат моделювання перехідного процесу імітаційного контуру моделювання, налаштованого на СО+Ф і з урахуванням прийнятих змін представлений рис. 3.37.

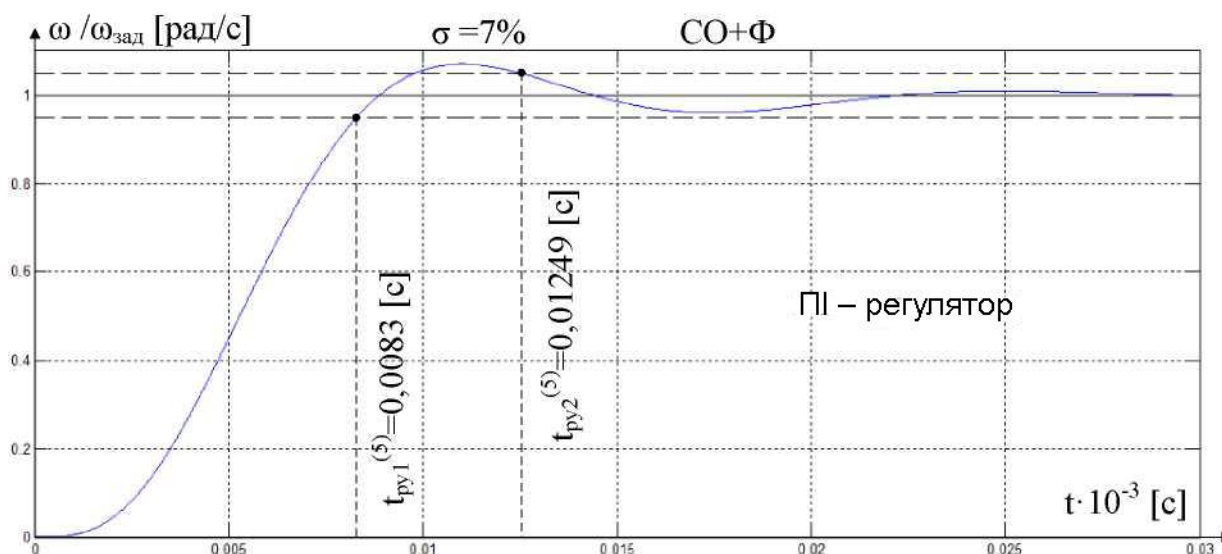


Рисунок 3.37 – Перехідний процес контуру швидкості, налаштованого на СО + Ф

Перевірка зміни показників якості з урахуванням застосування повноцінного контуру струму

При оптимізації перерахованих вище контурів використовувався внутрішній оптимізований замкнутий контур струму, представлений усіченою передатною функцією 1-го порядку, що негативно позначається на реалістичності моделі. Тому в даному підрозділі проведено порівняння показань

якості імітаційних моделей контуру поточосцеплення та швидкості з урахуванням застосування контуру струму та моделей з усіченою передатною функцією 1-го порядку.

Модель порівняння зміни показників якості контуру поточосцеплення представлена рис. 3.38. На рис. 3.39 показані результати порівняння перехідних процесів.

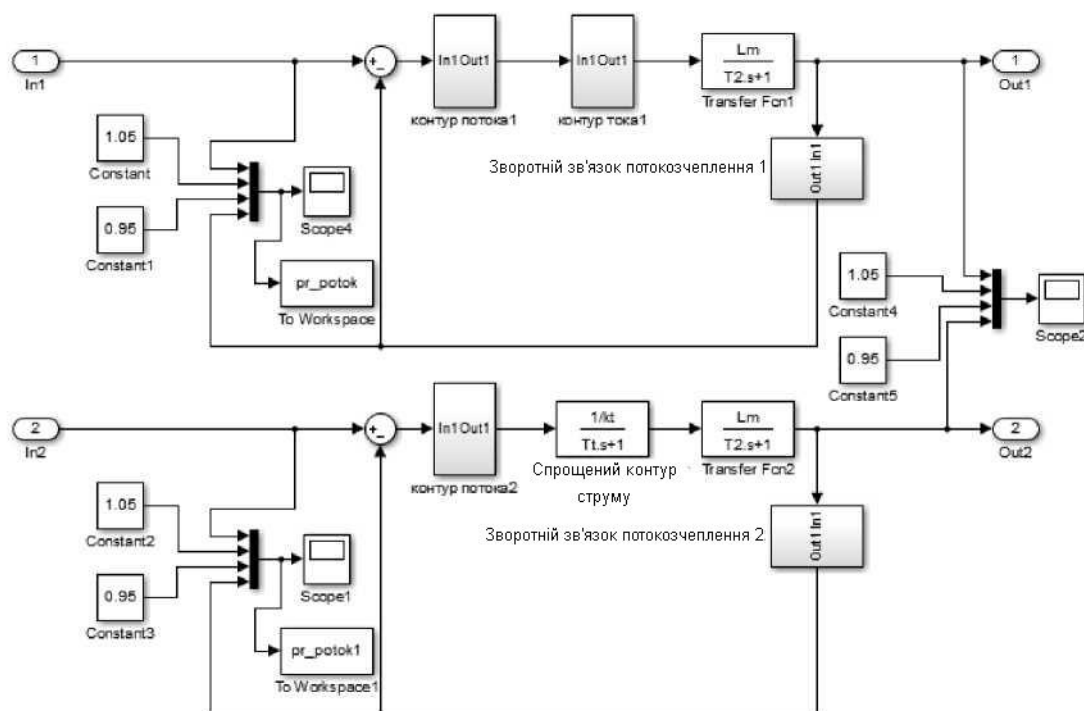


Рисунок 3.38 – Модель порівняння змін показників якості контуру поточосцеплення

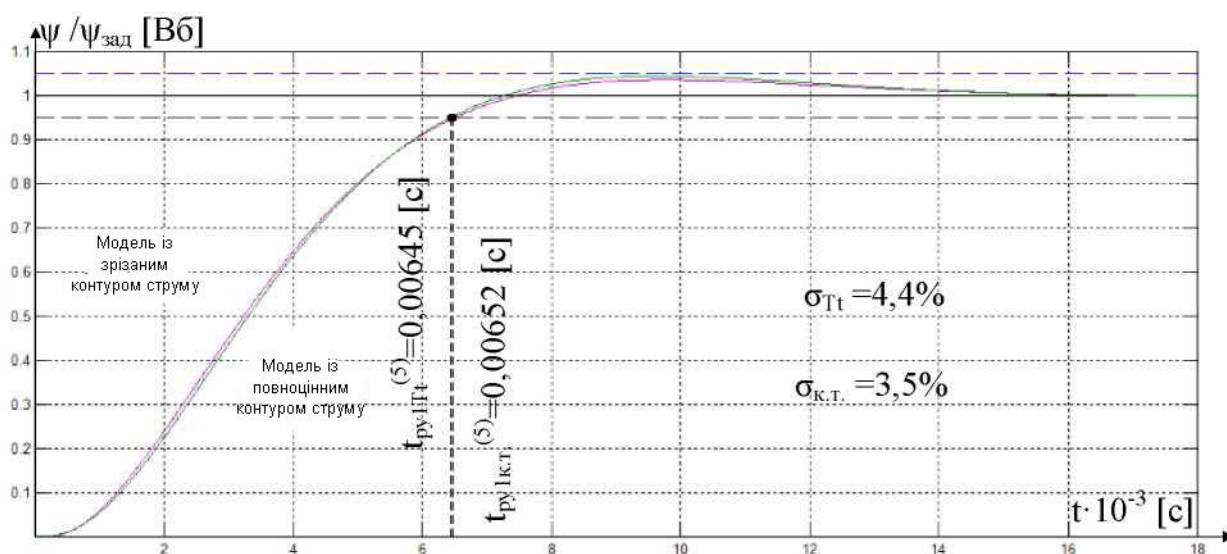


Рисунок 3.39 – Порівняння перехідних процесів контуру поточосцеплення

З показань рис 3.38, можна дійти невтішного висновку, що із застосуванням повноцінного контуру струму час входження в 5% зону збільшилося на 0,01% а перерегулювання зменшилося на 0,9%.

Модель порівняння змін показників якості контуру швидкості представлена рис. 3.40. На рис. 3.41 показані результати порівняння перехідних процесів.

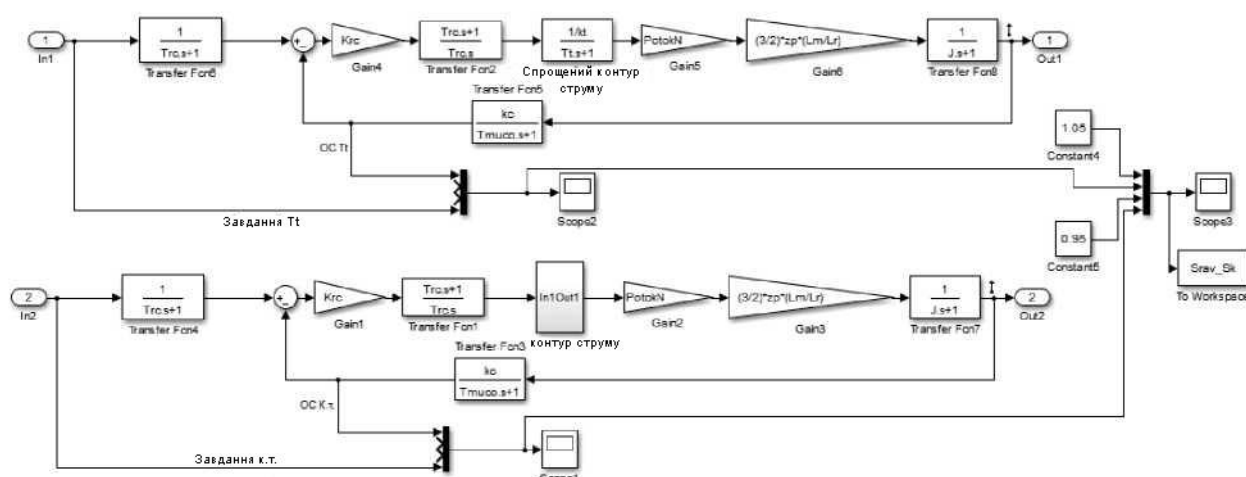


Рисунок 3.40 – Модель для порівняння змін показників якості контуру швидкості

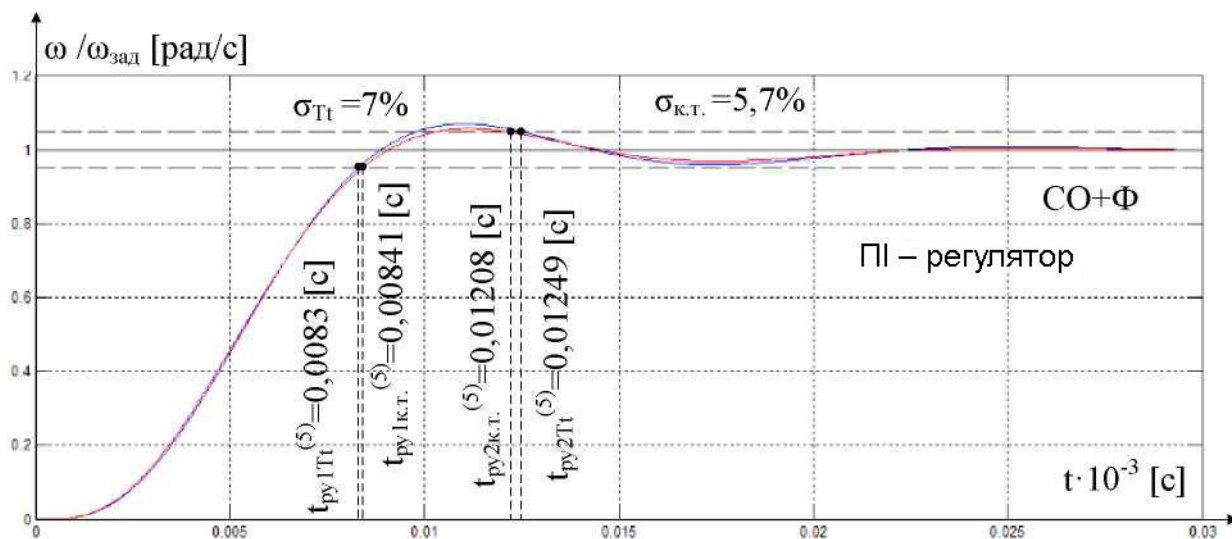


Рисунок 3.41 – Порівняння перехідних процесів контуру швидкості

З показань рис. 3.41, можна дійти невтішного висновку, що із застосуванням повноцінного контуру струму час входження в 5% зону

збільшилося на 0,013%, час входження до другої 5% зону зменшилося на 0,032%, а перегулювання зменшилося на 1,3%.

#### Перевірка векторної системи керування на математичних моделях АТ

Після проведення оптимізації контурів потокозчеплення та швидкості необхідно скласти імітаційну модель лінеаризованої САК РЕП частотно-регульованого асинхронного електроприводу з векторним керуванням. Структурна схема цієї моделі вже було наведено на рис. 3.19. На рис. 3.42 наведено імітаційну модель лінеаризованої САК РЕП, створену у програмі Matlab Simulink. На рис. 3.43, 3.44 і 3.45 наведено зміст таких блоків як: «АД», «контур струму», «контур потокозчеплення» і «контур швидкості». Також для формування потокозчеплення моделі було виділено затримка сигналу для контуру швидкості дорівнює 0,023 с. На рис. 3.45 наведено порівняння показників якості САК РЕП у системі координат, що обертається, з показниками якості, отриманими в попередньому розділі.

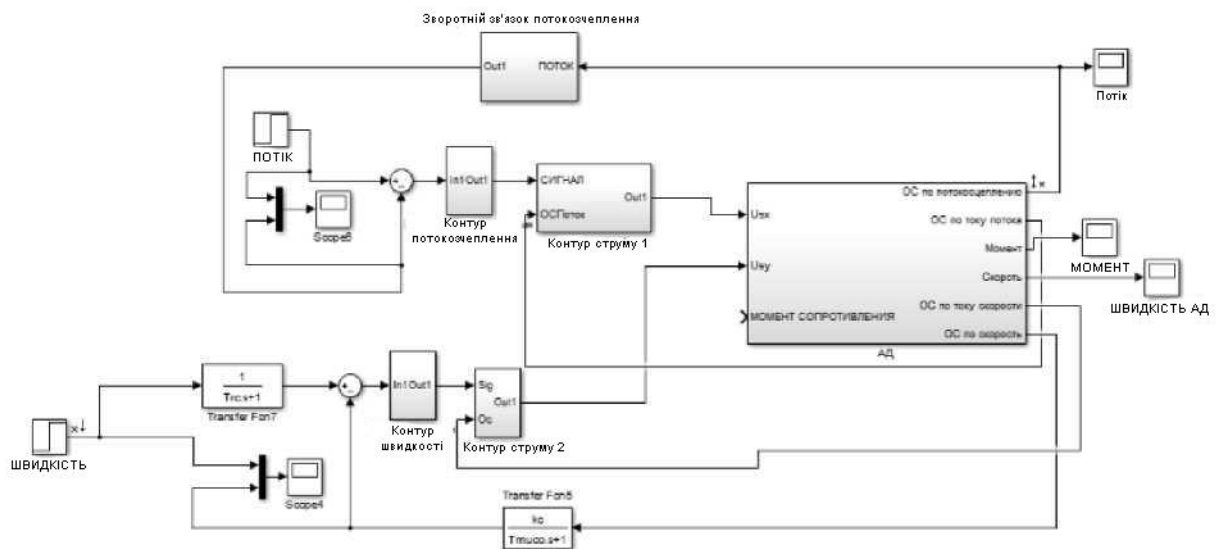


Рисунок 3.42 – Імітаційна модель лінеаризованої САК РЕП в системі координат, що обертається



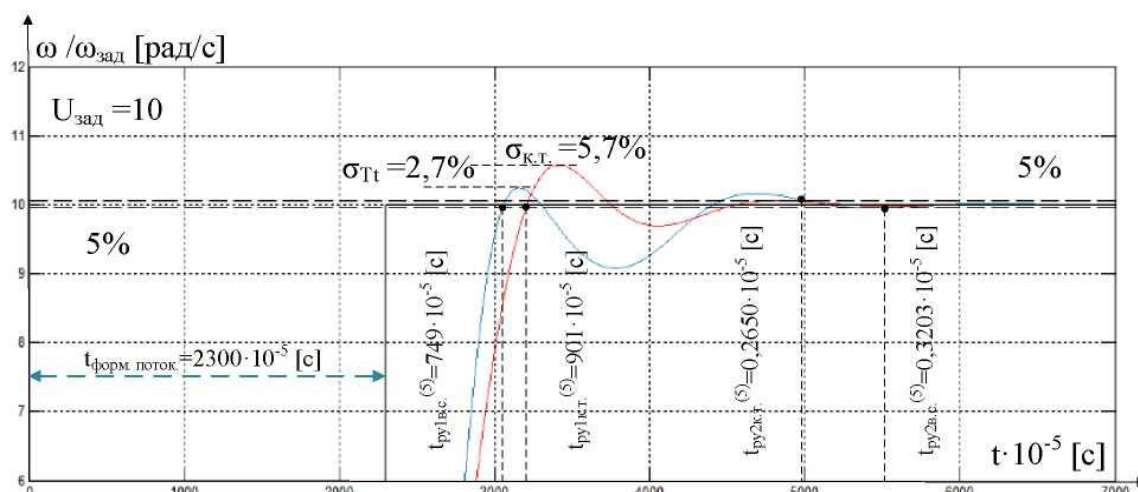


Рисунок 3.46 – Порівняння перехідних процесів у контурі швидкості і в системі координат, що обертається

Виходячи з отриманих даних, що містяться на рис. 3.40, можна зробити висновок про те, що додавання системи управління до системи координат, що обертається, зроблено правильно. Однак перерегулювання швидкості зменшилося на 3%, час входження до першої 5% зони зменшився на 16%, а час входження до другої зони збільшився на 10%.

Після того як експериментально було доведено, що система управління адекватно функціонує в системі координат, що обертається, необхідно скласти об'єднану модель системи управління і нерухомої системи координат лінеаризованої САК РЕП частотнорегульованого асинхронного електроприводу.

Структурна схема САК РЕП з векторним керуванням у нерухомій системі координат наведена на рис. 3.47. На рис. 3.48 показано зміст підсистем, які відповідають за перетворення координат.

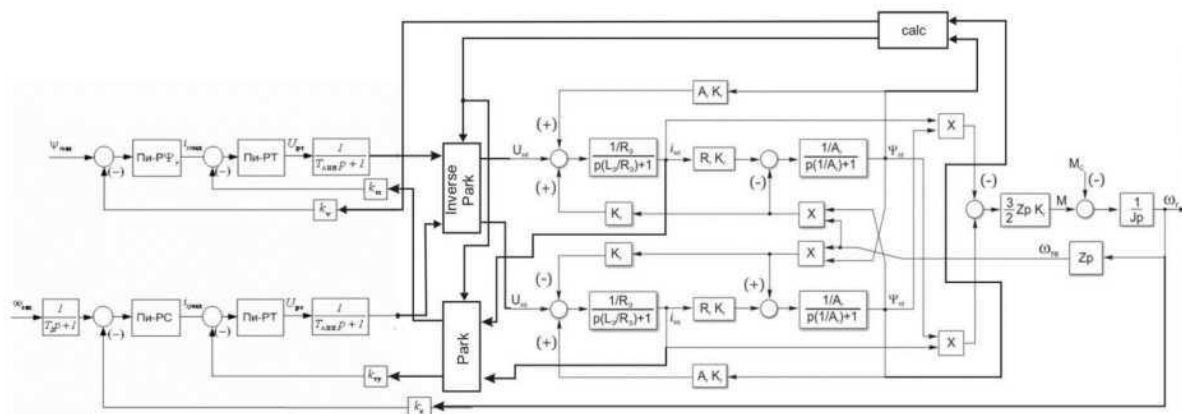


Рисунок 3.47 – Структурна схема САК РЕП із векторним керуванням у нерухомій системі координат

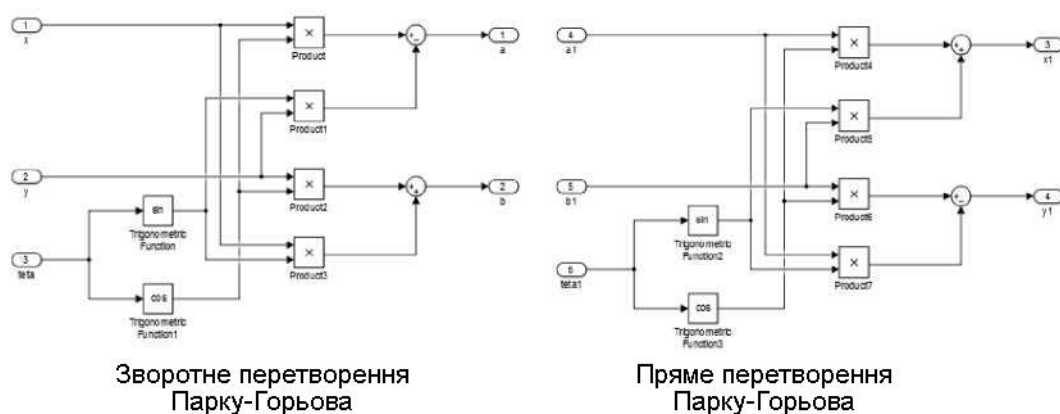


Рисунок 3.48 – Зміст підсистем «Зворотний» та «Прямий»

На рис. 3.49 показано імітаційну модель САК РЕП у нерухомій системі координат.



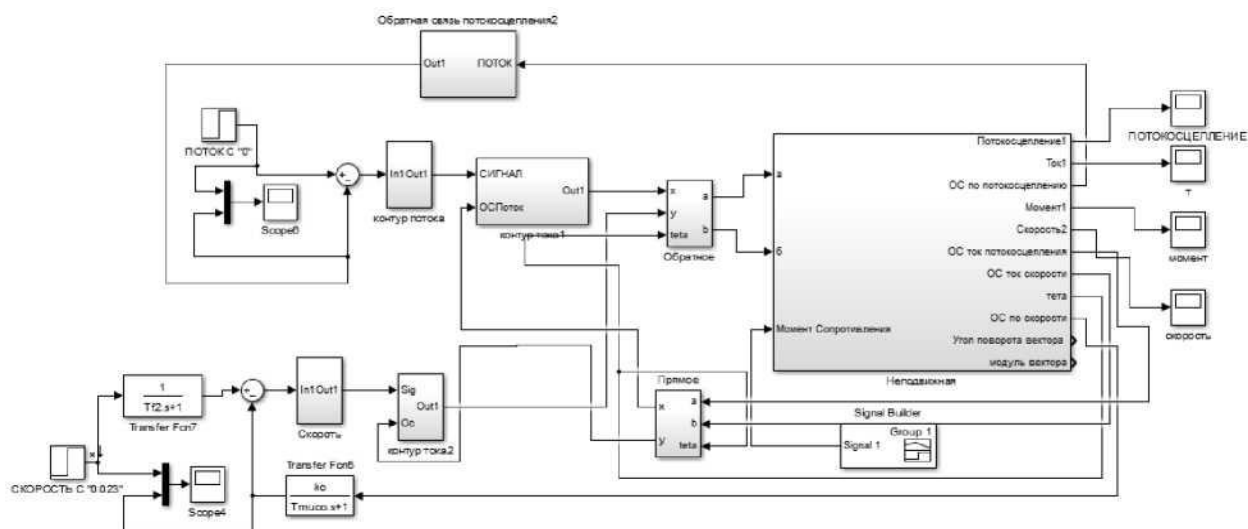


Рисунок 3.49 – Імітаційна модель САК РЕП у нерухомій системі координат

На рис. 3.50 показано зміст підсистеми «нерухома», що включає нерухому систему координат АД з рівняннями для розрахунку кута повороту вектора потокосцеплення і модуля вектора потокосцеплення.

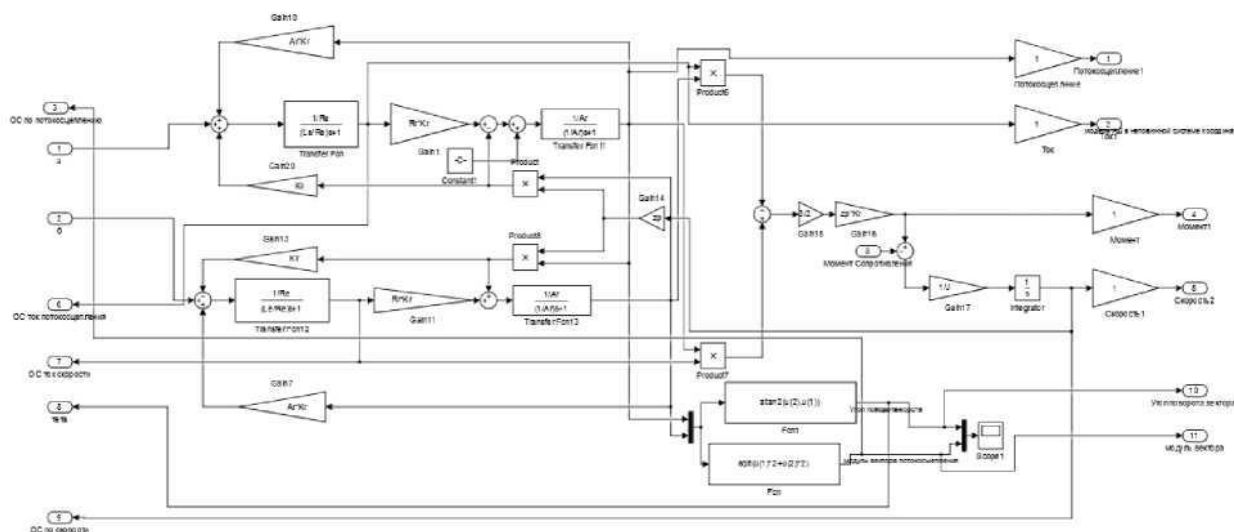


Рисунок 3.50 – Зміст підсистеми «нерухома»

Перевірка імітаційної моделі відбудеться при порівнянні перехідних процесів за швидкістю між лінеаризованою САК РЕП в системі координат, що обертається, і лінеаризованою САК РЕП в нерухомій системі координат. Порівняння перехідних процесів та перевірка компенсації помилки при накресленні номінального моменту представлено рис. 3.51.

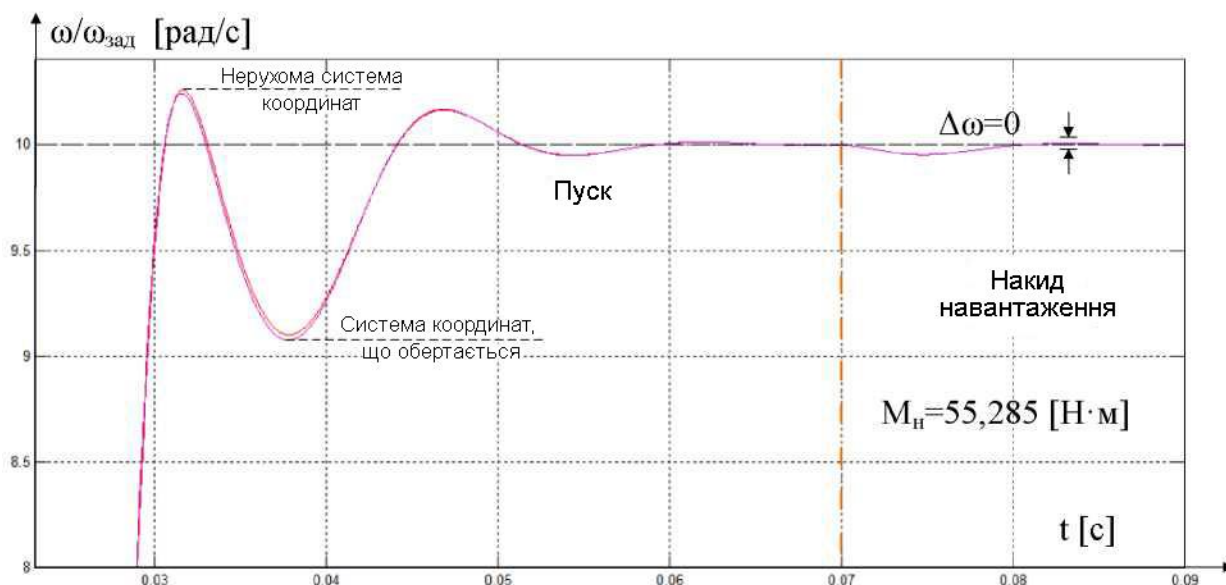


Рисунок 3.51 – Порівняння перехідного процесу швидкості у різних системах координат та перевірка компенсації помилки при накиданні номінального моменту

З показань рис. 3.51 можна сказати, що лінеаризована САК РЕП в нерухомій системі координат побудована адекватно і малопомітну різницю в перехідному процесі швидкості можна помітити тільки при детальному збільшенні.

Пояснення роботи нелінійного контуру швидкості з обмеженнями у лінеаризованій САК РЕП

У цьому підрозділі пояснюється некоректна модель поведінки нелінійного контуру швидкості з обмеженнями в лінеаризованій САК РЕП без урахування штучної затримки контуру швидкості з обмеженнями, показана на рис. 3.46 і 3.51. Для наочності проведено додаткове порівняння відпрацювання завдання між лінійним контуром швидкості та лінійним контуром. Загальна імітаційна модель із двома лінійними САК РЕП з різним налаштуванням кожного контуру швидкості наведена на рис. 3.52.

Для якісної оцінки роботи кожного контуру, зроблено порівняння перехідних процесів між лінійним контуром швидкості і лінійним контуром швидкості з обмеженнями, а й між контурами потягосцеплення. Це дозволить наочно показати взаємодія між контуром швидкості та потягосцепленням при різних налаштуваннях системи управління.

Порівняння перехідних процесів швидкості та потокозчеплення при відпрацюванні завдання показано на рис. 3.53 та 3.54

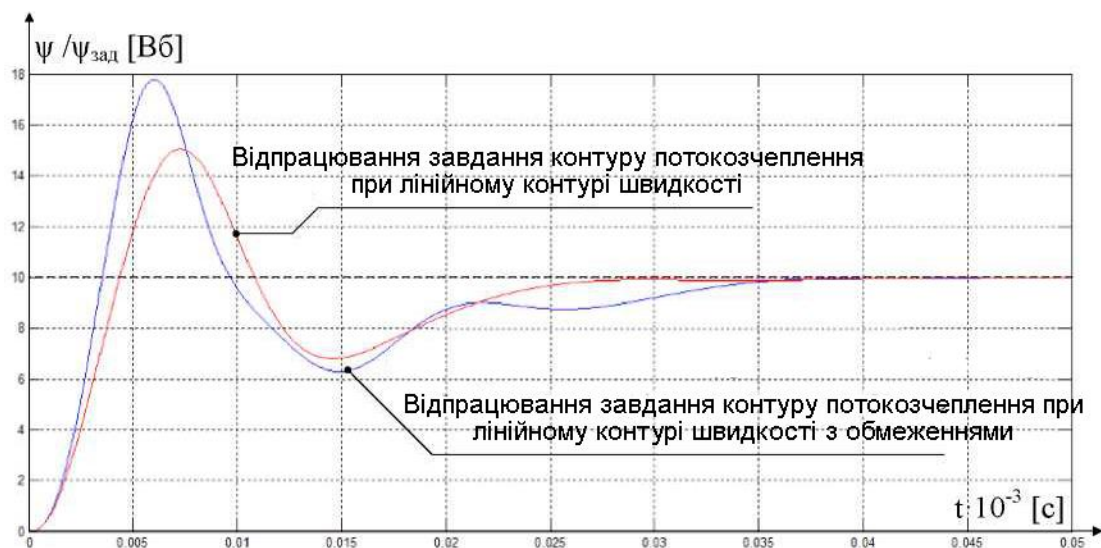


Рисунок 3.53 – Порівняння роботи контуру потокозчеплення при взаємодії з лінійним контуром швидкості та лінійним контуром швидкості з обмеженнями

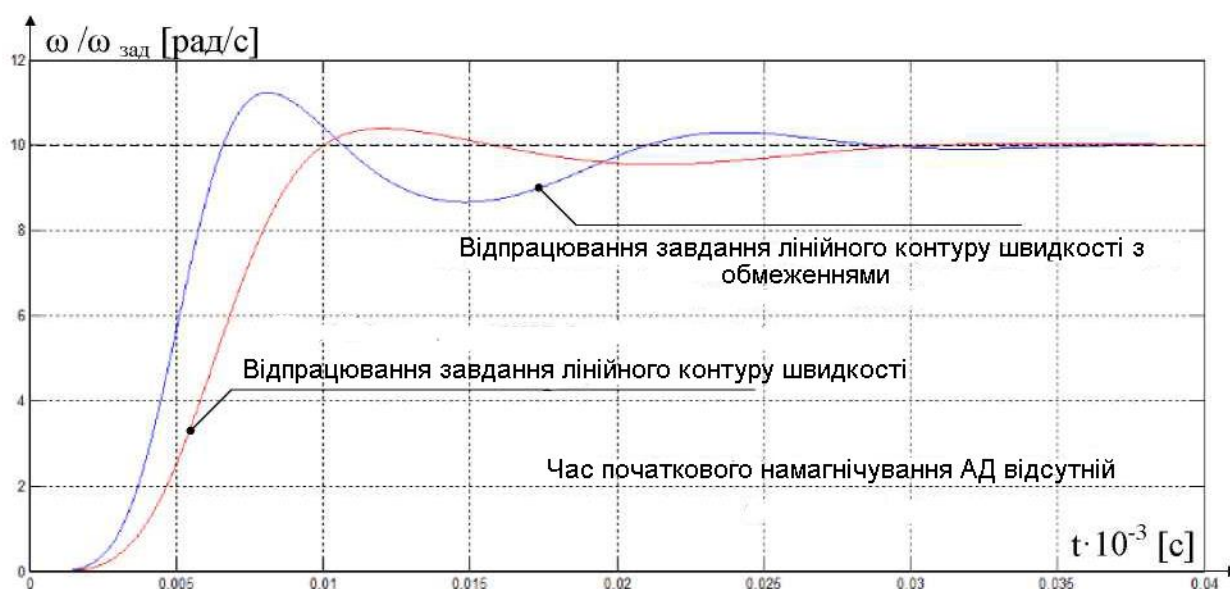


Рисунок 3.54 – Порівняння відпрацювання завдання між лінійним контуром швидкості та лінійним контуром швидкості з обмеженнями

Лінійний контур швидкості з обмеженнями спочатку оптимізований виходячи з умови сталості потокозчеплення. Тому без урахування початкового намагнічування АД (затримки контуру швидкості) і при ступінчастому завданні контур швидкості та контур потокозчеплення заважатимуть один одному і отримати якісний перехідний процес від контуру швидкості неможливо. Результати такого моделювання показані на рис. 3.53 і 3.54.

Отже, підвищення якості при ступінчастому завданні в линеаризованной

САК РЕП повинна враховуватися затримка контуру швидкості. Надалі, при переході до нелінійно САК РЕП і введення задатчика інтенсивності з  $S$  – образною характеристикою, можна спостерігати як взаємно впливають один на одного затримка за завданням на контур швидкості, контур швидкості зі штучно заниженим швидкодією та обмеження регуляторів у нелінійній системі.

### 3.4 Дослідження нелінійної САК РЕП

Нелінійностями представленим електроприводі є обмеження на виході регуляторів. Введення обмежень обумовлено необхідністю обмеження максимальної амплітуди напруги обмоток АД, обмеження струмів у обмотках статорних АД, а також обмеження моменту на валу двигуна.

Також проведена корекція інтегрального насичення в СК, показана на рис. 3.55, 3.56 та 3.57. Обмеження регуляторів мають такі значення:

$$U_X = 0.312 \cdot U_{зад} = 0.312 \cdot 10 = 3.12 \text{ В}$$

$$U_Y = 0.95 \cdot U_{зад} = 0.95 \cdot 10 = 9.5 \text{ В}$$

$$I_X = I_{лч\max} = 20.8 \text{ А}$$

$$I_Y = I_{лч\max} = 20.8 \text{ А}$$

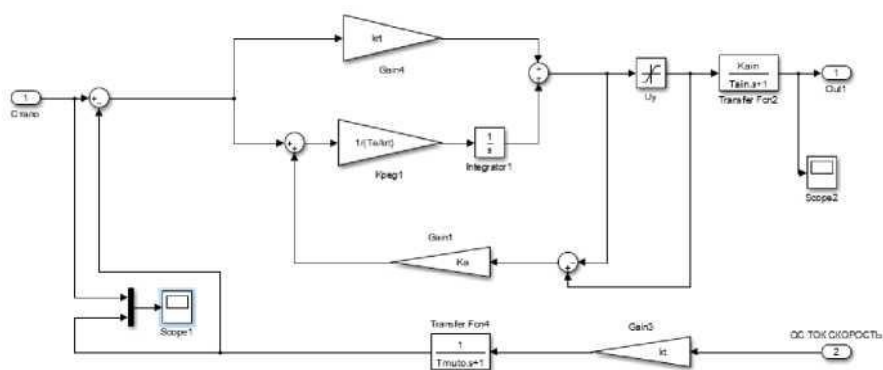


Рисунок 3.55 – Корекція інтегрального насичення регулятора струму

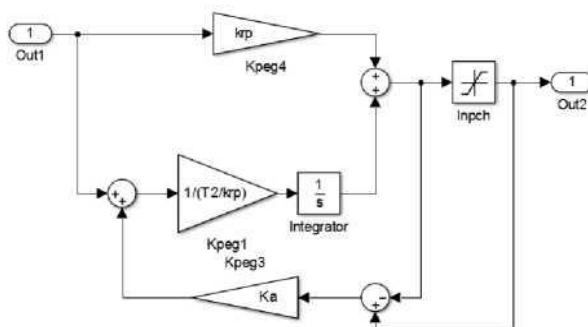


Рисунок 3.56 – Корекція інтегрального насичення регулятора поточосцеплення

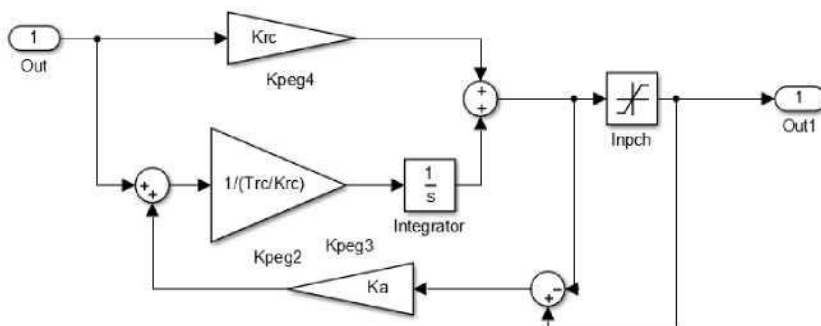


Рисунок 3.57 – Корекція інтегрального насичення регулятора швидкості

Начерк навантаження формується не за допомогою ступінчастого сигналу, а через аперіодичну ланку, показану на рис. 3.58, щоб імітувати поступове збільшення навантаження ліфтової кабіни за 0,25 с.



Рисунок 3.58 – Формування навантаження в імітаційній моделі

Для імітації повного циклу роботи електроприводу ліфтової лебідки було створено спеціальний цикл подачі завдання напруги та навантажень, показаний на рис. 3.59. Перехідний процес з прикладеним статичним моментом механізму нелінійної САК РЕП показаний на рис. 3.60

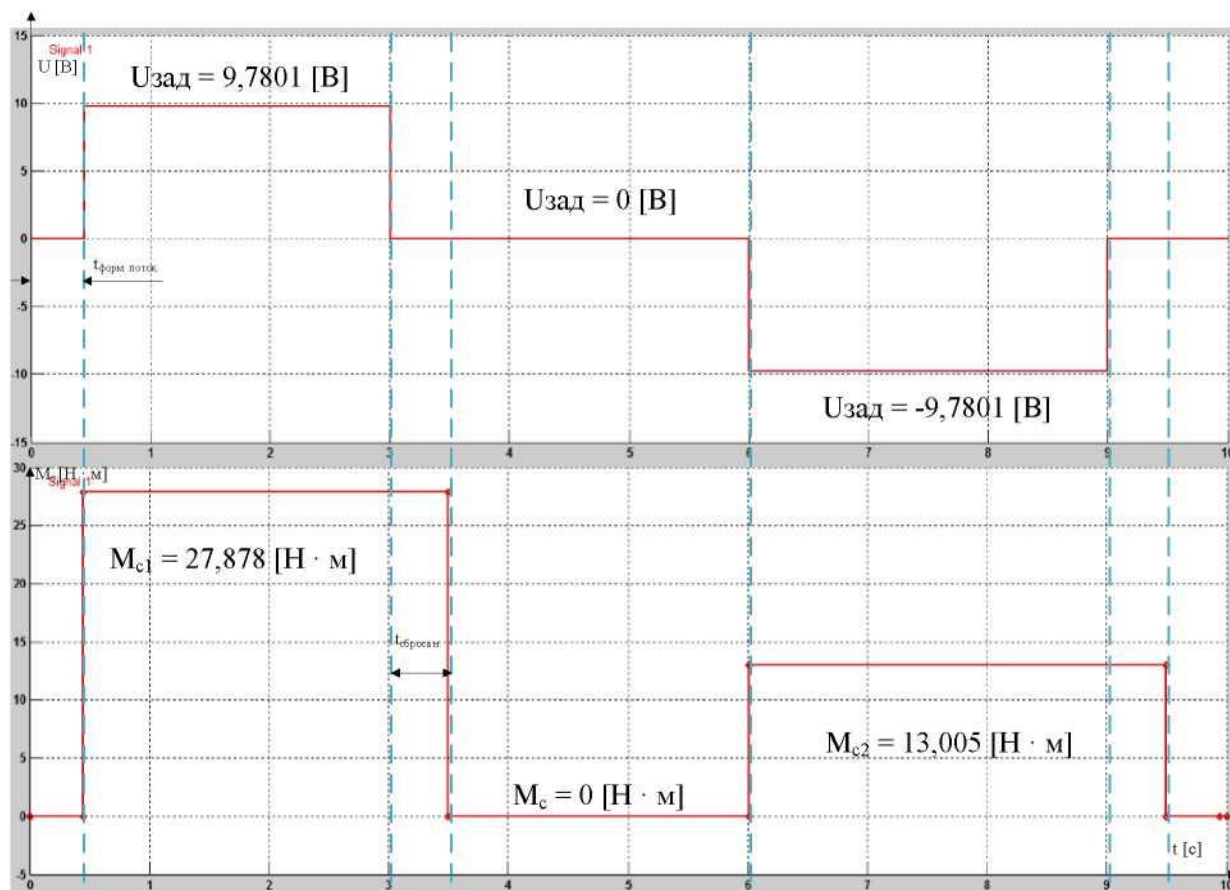


Рисунок 3.59 – Цикл подачі завдання напруги та навантажень

Виходячи з даних, отриманих з рис. 3.60 зроблено висновок про те, що нелінійна САК РЕП у нерухомій системі координат побудована правильно, обмеження налаштовані правильно.





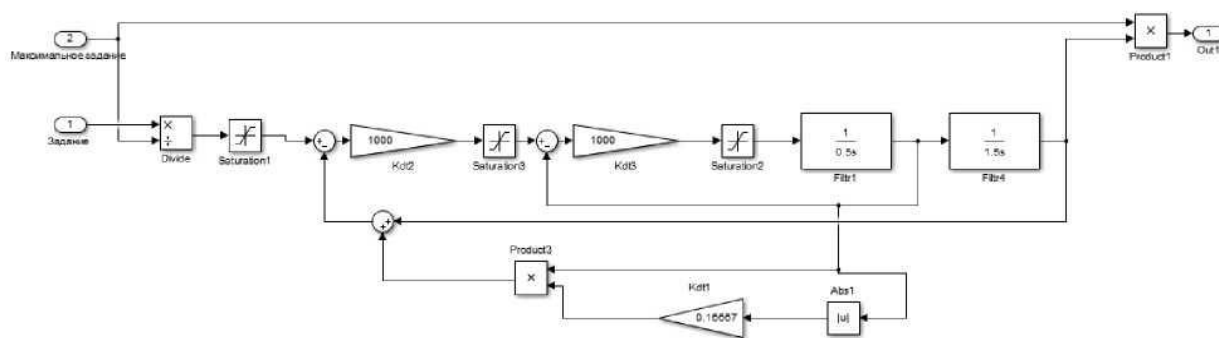


Рисунок 3.62 – Задатчик інтенсивності з  $\wedge$ -подібною характеристикою

Далі, на рис. 3.63, 3.64 і 3.65, показано часові характеристики кожного задатчика інтенсивності та розрахунок параметрів вибраного задатчика.

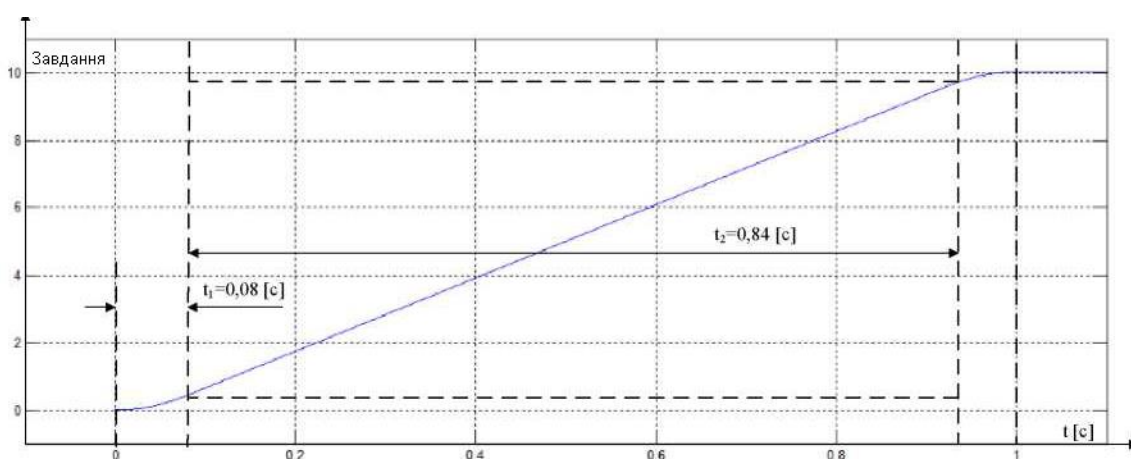


Рисунок 3.63 – Тимчасова характеристика задатчика з  $\wedge$ -подібною характеристикою за 1 секунду

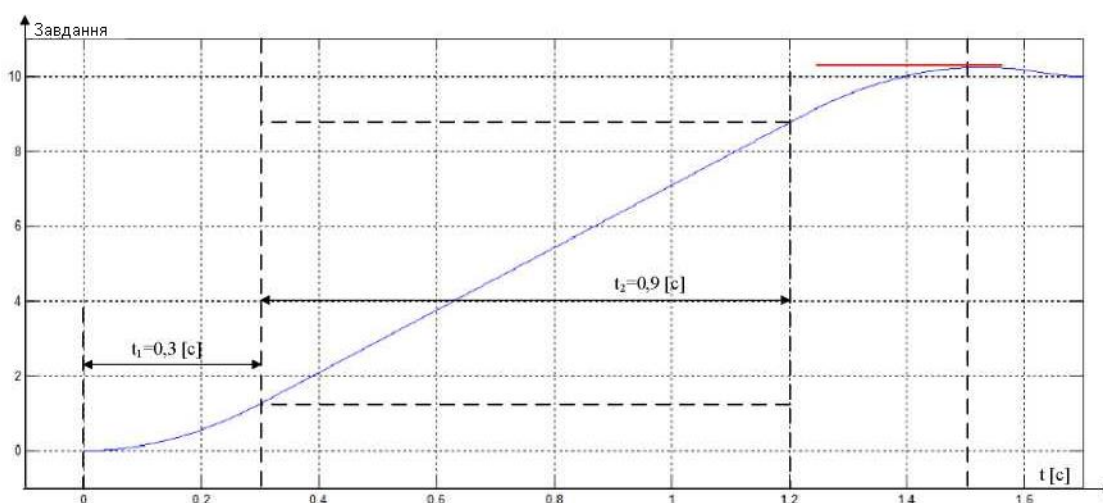


Рисунок 3.64 – Тимчасова характеристика задатчика з  $\wedge$ -подібною характеристикою за 1,5 секунди

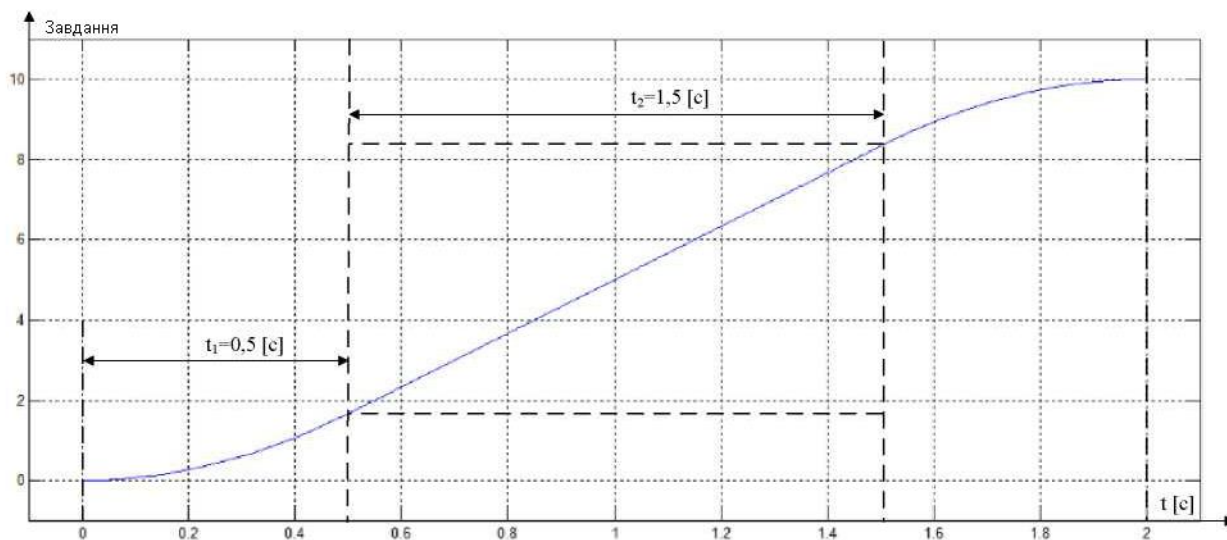


Рисунок 3.65 – Тимчасова характеристика задатчика з подібною характеристикою за 2 секунди

Аналізуючи результати S-подібної характеристик, показаних на рис. 3.64, 3.65 і 3.66 були зроблені висновки про те, що задатчик інтенсивності, розрахований на часовий проміжок, рівний 1 секунді не підходить для системи електроприводу ліфтової лебідки. Причиною цього стало те, що характеристика містить велику лінійну ділянку формування сигналу, який призведе до досить сильного поштовху при пуску кабіни вгору/вниз. Також, при використанні такої характеристики електроприводу, величина прискорення/уповільнення кабіни дорівнює  $1\text{ м/с}^2$ . При налаштуванні задатчика інтенсивності на 1,5 секунд було отримано явне перегулювання сигналу, що вкрай негативно позначиться не тільки на формуванні швидкості, але і дотриманні виставлених обмежень швидкості.

Параметри вибраного задатчика інтенсивності:

$$T_{I1} = t_1 = 0.5 \text{ с}$$

$$T_{I2} = t_1 + t_2 = 0.5 + 1 = 1.5 \text{ с}$$

$$k = 0.05 \cdot \frac{t_1}{t_1 + t_2} = 0.05 \cdot \frac{0.5}{0.5 + 1.5} = 0.01667$$

На рис. 3.67 показані перехідні процеси швидкості, моменту та струму електроприводу із задатчиком інтенсивності.

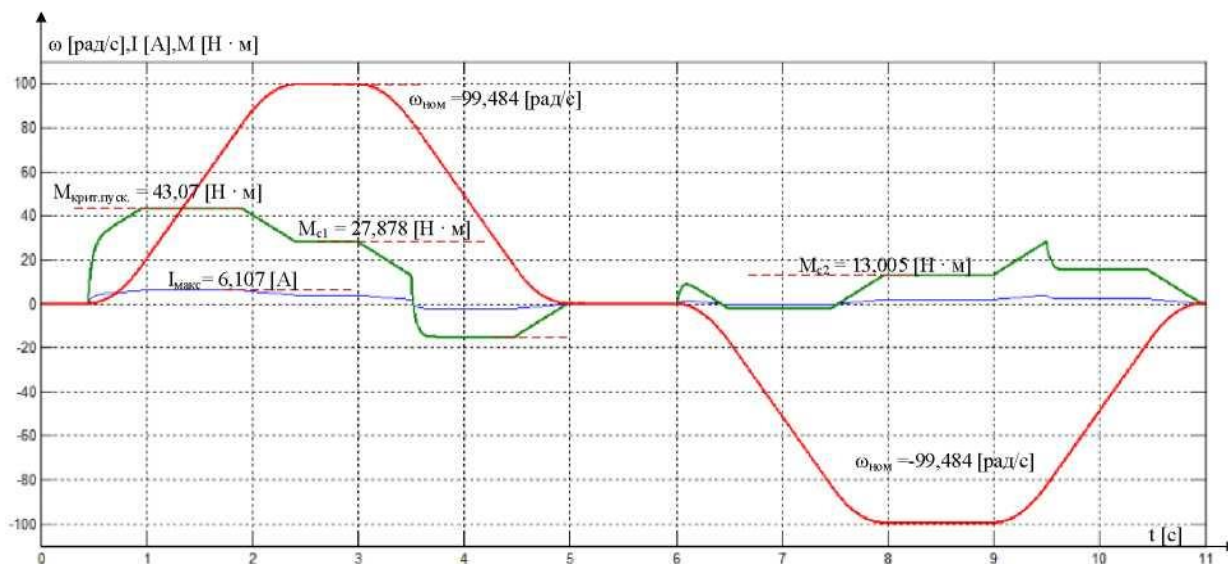


Рисунок 3.67 – Перехідні процеси швидкості, моменту та струму із застосуванням задатчика інтенсивності

Виходячи з результатів, показаних на рис. 3.67, нелінійна САК РЕП ліфтової лебідки налаштована правильно. Додатково, на рис. 3.68 показано взаємодію контуру швидкості та контуром потокозчеплення, при застосуванні задатчика інтенсивності та при обліку часу намагнічування АД

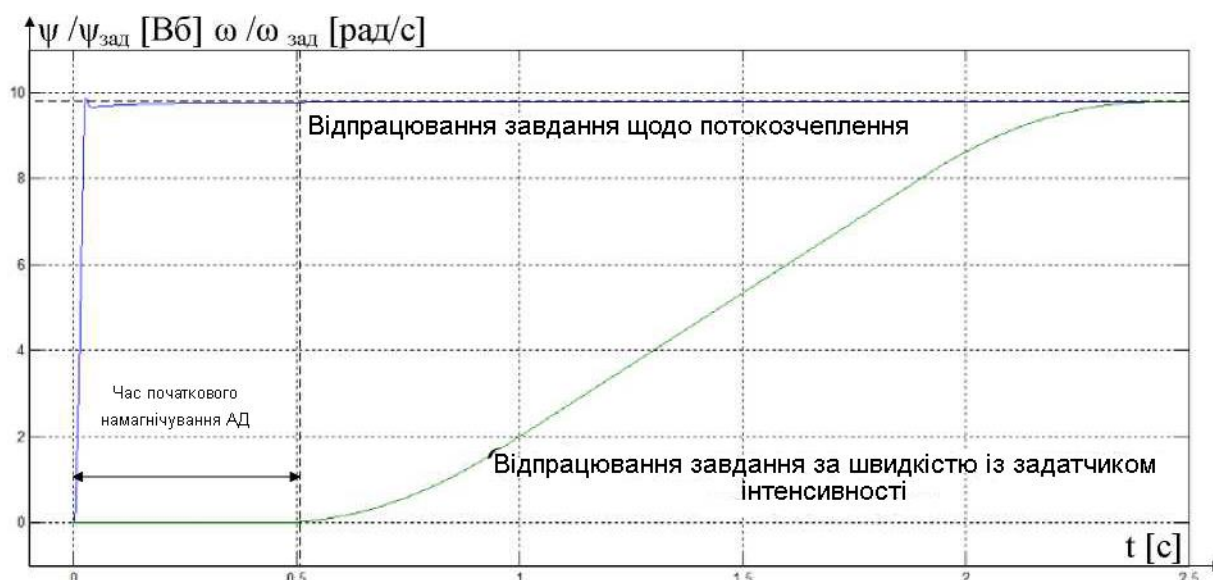


Рисунок 3.68 – Взаємодія контуру та контуром потокозчеплення при застосуванні задатчика інтенсивності та при врахуванні часу намагнічування АД

### 3.5 Розробка електроприводу, що стежить

Слідкує електропривод реалізується на базі регульованого електроприводу за допомогою підключення технологічного модуля додаткового зовнішнього контуру регулювання положення.

Структурна схема слідкуючого електроприводу показана рис. 3.70.

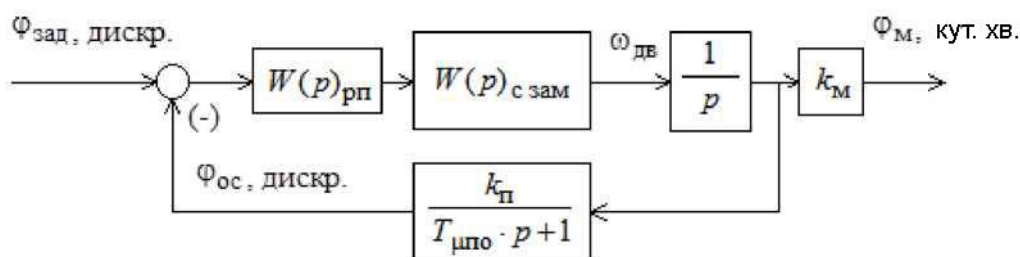


Рисунок 3.70 – Структурна схема електроприводу, що стежить

### Оптимізація контуру положення

Коефіцієнт передачі імпульсного датчика положення, встановленого на вихідному валу механізму, кут повороту якого вимірюється в кутових хвилинах, представлений нижче:

$$k_{\partial n} = \frac{n_{\partial n} \cdot i}{360 \cdot 60} = \frac{2048 \cdot 41}{360 \cdot 60} = 3.8874 \text{ диск/кут.хв.}$$

де  $n_{\partial n} = 2048$ ;

Коефіцієнт зворотного зв'язку контуру за положенням

$$k_n = k_{on} \cdot k_{\partial n} = 1 \cdot 3.8874 = 3.8874$$

де  $k_{on}$  – коефіцієнт перетворення періоду вихідних сигналів датчика код кута повороту, приймається  $k_{on}=1$ .

Коефіцієнт передачі механізму розраховується у такий спосіб:

$$k_m = \frac{R_{ш}}{i} = \frac{0.4}{41} = 0.009756$$

де  $R_{ш}$  – радіус шківів ліфтової лебідки,

$i$  – передатне число обраного раніше редуктора.

Датчик кута повороту встановлено на валу електродвигуна. Отже, можна прийняти такі твердження, з урахуванням налаштованого ПІ регулятора швидкості:

$$T_{\mu\pi\pi} = 2 \cdot 2 \cdot T_{\mu\pi\pi} + T_{\mu\pi\pi} = 2 \cdot 2 \cdot 0.0018092 + 0.0013 = 0.0085368 \text{ с}$$

Також приймемо малу постійну часу ланцюга зворотного зв'язку за становищем рівного малого постійного часу ланцюга зворотного зв'язку за швидкістю

$$T_{\mu\pi\pi} + T_{\mu\pi\pi}$$

У цьому випадку при оптимізації контуру положення внутрішній оптимізований замкнутий контур швидкості знаходиться раніше налаштований контур швидкості.

Оптимізація контуру положення

Передатна функція П-регулятора положення

$$W_{pn}(p) = k_{pn}$$

Коефіцієнт посилення регулятора положення знаходиться за виразом

$$k_{pn} = \frac{k_c}{k_n \cdot a_n \cdot T_{\mu n}} = \frac{10/101.7}{3.8874 \cdot 2 \cdot 0.0072368} = 196.711$$

де  $a = 2$  – коефіцієнт оптимізації контуру положення.

Очікувані показники якості П-регулювальника

– статична помилка по керуванню, що встановилася при постійному значенні задає сигналу, кут. хв,

$$\Delta\varphi_{y_{cm}} = 0$$

– перерегулювання, час першого та остаточного входження в 5% зону при відпрацюванні стрибка завдання

$$\sigma = 6.24\%$$

$$t_{py1}^{(5)} = 13.2 \cdot T_{\mu c} = 13.2 \cdot 0.0018092 = 0.023881 \text{ с}$$

$$t_{py2}^{(5)} = 20.3 \cdot T_{\mu c} = 20.3 \cdot 0.0018092 = 0.036726 \text{ с}$$

Очікувані показники якості ПІ – регулятора

– статична помилка по керуванню, що встановилася при постійному значенні задає сигналу, кут. хв,

$$\Delta\varphi_{ycm} = 0$$

– Встановилася швидкісна помилка, кут. хв,

$$\Delta\varphi_{ck} = 0$$

• перерегулювання, час першого та остаточного входження в 5% зону при відпрацюванні стрибка завдання

$$\sigma = 51.6\%$$

$$t_{py1}^{(5)} = 11 \cdot T_{\mu c \vartheta} = 11 \cdot 0.0018092 = 0.0199012 \text{ с}$$

$$t_{py2}^{(5)} = 37.2 \cdot T_{\mu c \vartheta} = 37.2 \cdot 0.0018092 = 0.0673024 \text{ с}$$

Імітаційна модель контуру положення з ПІ регулятором представлена рис. 3.71. На рис. 3.73 представлений перехідний процес контуру положення ПІ регулятором. Очікувані та експериментально отримані показники якості зведені до табл. 3.4.

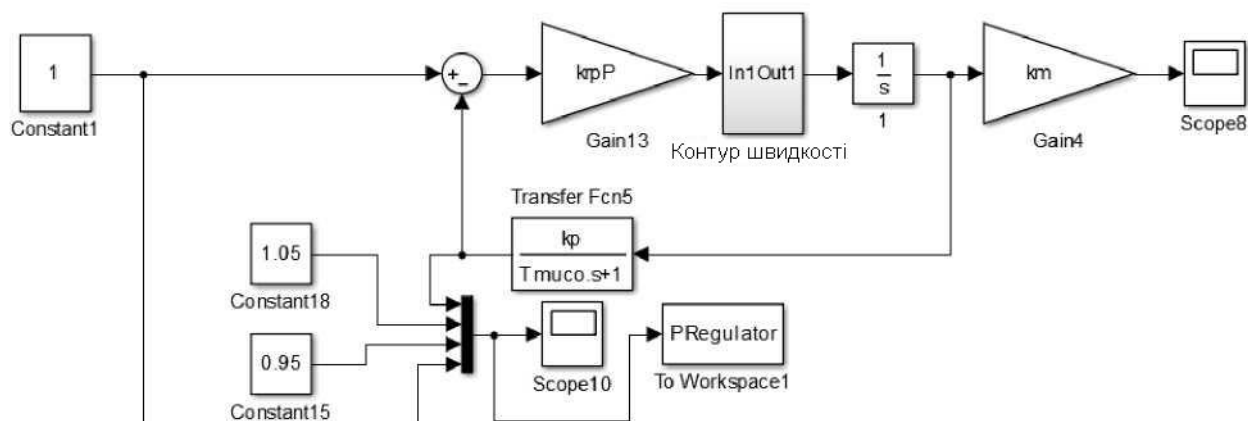


Рисунок 3.71 – Імітаційна модель контуру положення з П регулятором

Зміст блоку «Контур швидкості» показує рис. 3.72.

Слід зазначити, що контур струму тут не усіченою функцією першого порядку, а повноцінним контуром струму. Тому логічно очікувати відхилення від очікуваних показників якості.

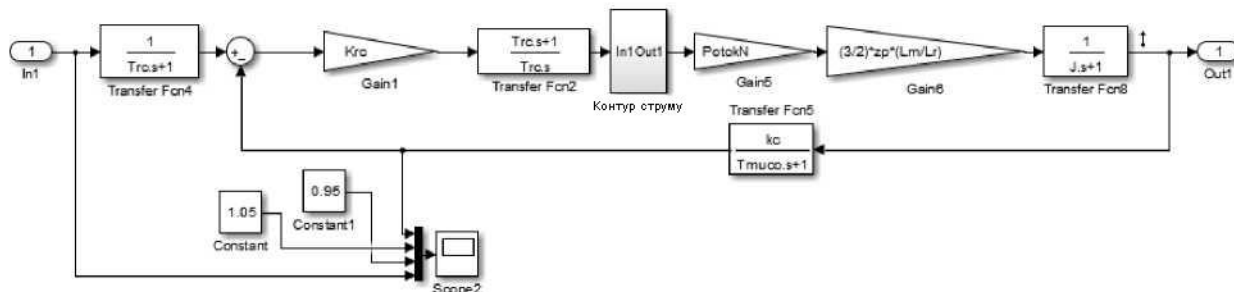


Рисунок 3.72 – Зміст блоку «Контур швидкості», показаного в імітаційній моделі контуру положення



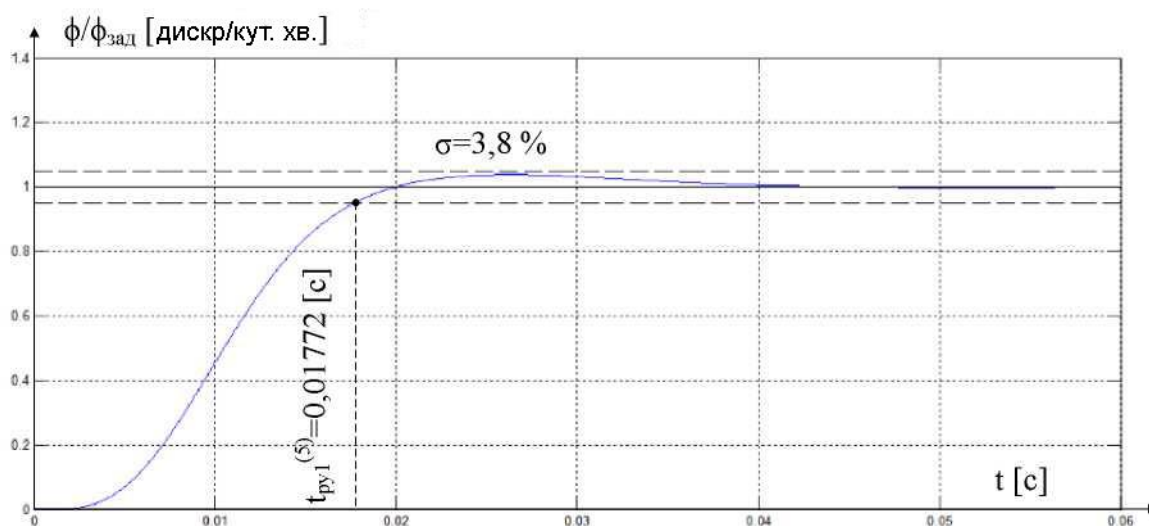


Рисунок 3.73 – Перехідний процес контуру положення з П регулятором

Таблиця 3.4 – Очікувані показники

|           | $t(5)$  | $\sigma$ |
|-----------|---------|----------|
| Очікувані | 0,02318 | 6,24%    |
| Отримані  | 0,01772 | 3,8%     |

Імітаційна модель контуру положення з ПІ регулятором представлена на рис. 3.74. На рис. 3.75 представлений перехідний процес контуру положення з ПІ регулятором. Очікувані та експериментально отримані показники якості зведені до табл. 3.5.

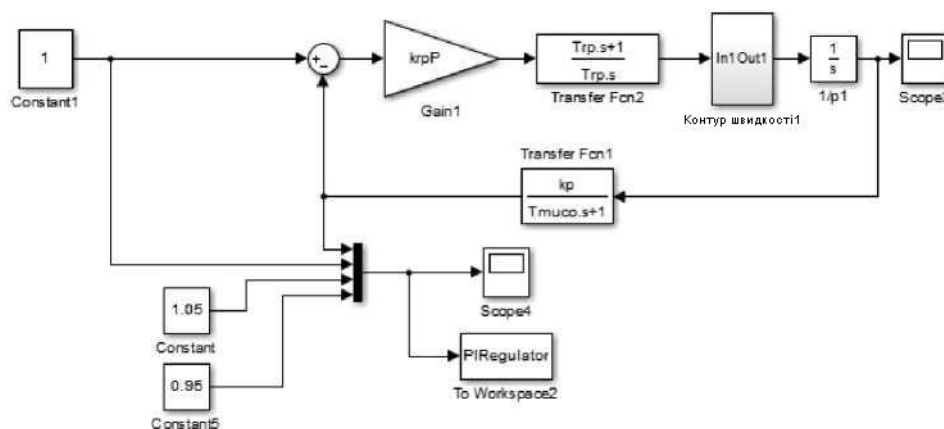


Рисунок 3.74 – Імітаційна модель контуру положення з ПІ регулятором

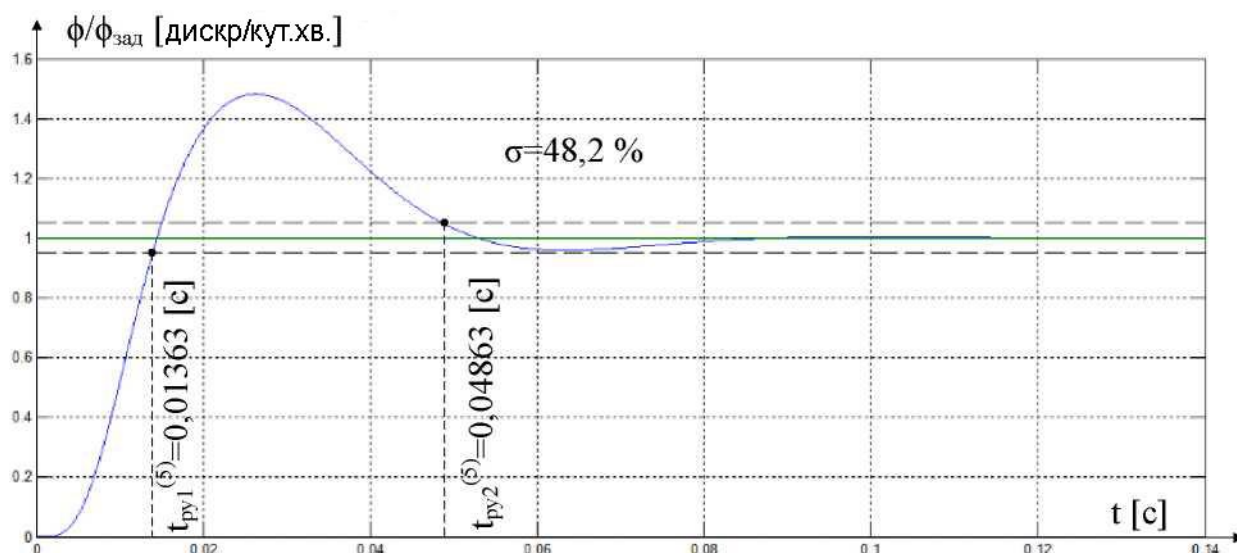


Рисунок 3.75 – Перехідний процес контуру положення з ПІ регулятором

Таблиця 3.5 – Очікувані показники

|           | $t(5)$    | $t(5)$    | $\sigma$ |
|-----------|-----------|-----------|----------|
| Очікувані | 0,0199012 | 0,0673021 | 51,6%    |
| Отримані  | 0,01363   | 0,04863   | 48,2%    |

Після оптимізації контуру положення порівняємо відпрацювання П і ПІ регулятора із заданою величиною. Результати відпрацювання сигналу регулятора показаний на рис. 3.76, а регулятора на рис. 3.77.

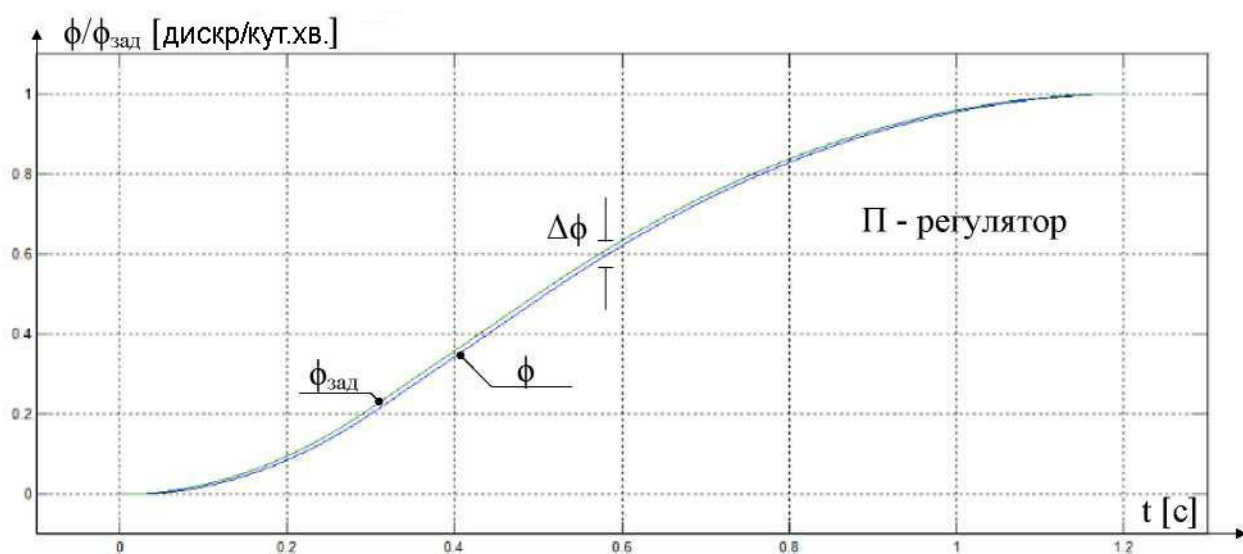


Рисунок 3.76 – Результат відпрацювання сигналу П регулятора контуру положення

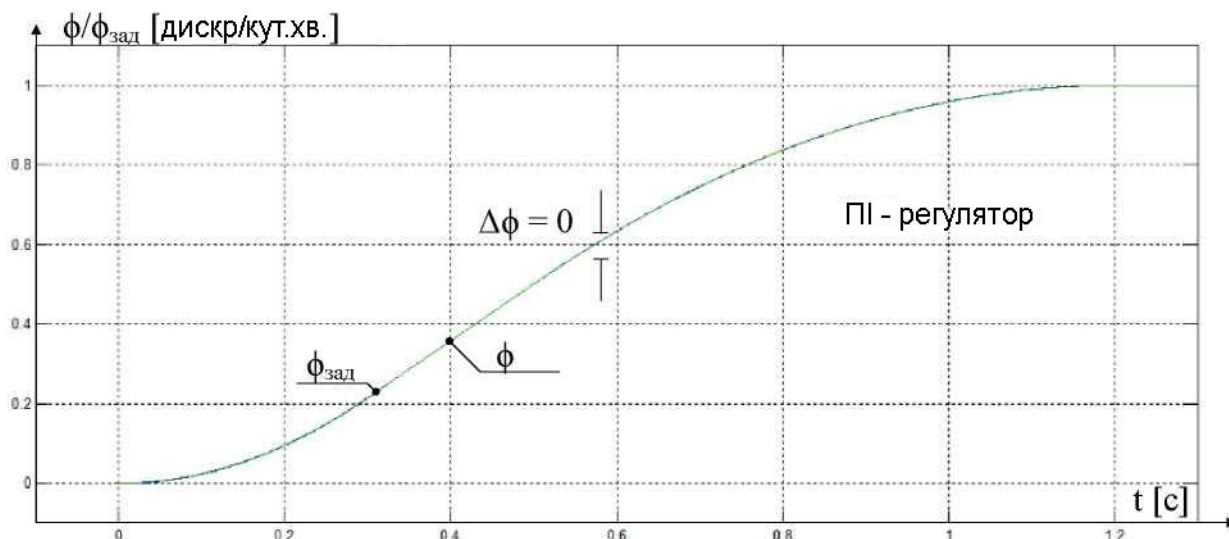


Рисунок 3.77 – Результат відпрацювання сигналу ПІ регулятора контуру положення

### 3.6 Дослідження слідкуючого електроприводу

Грунтуючись на результатах, показаних на рис. 3.76 і 3.77, було прийнято рішення відмовитися від контуру положення з регулятором П з-за наявності помилки у відпрацюванні сигналу. Імітаційна модель слідкуючого електроприводу з ПІ регулятором контуру положення, з уже вбудованою корекцією інтегрального насичення та обмеженням за швидкістю, наведена на рис. 3.78. Перехідний процес лінійної швидкості електроприводу показаний на рис. 3.79.

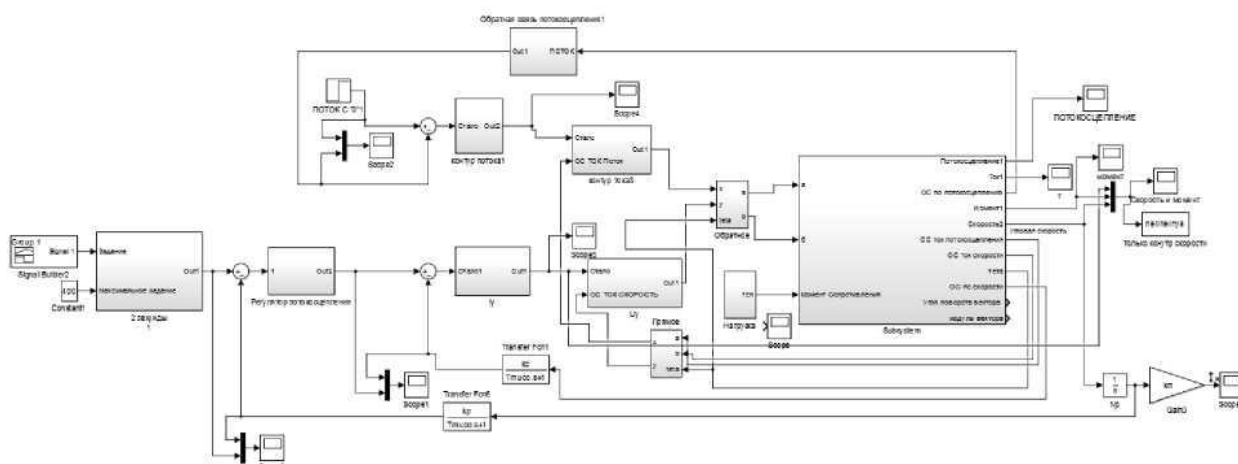


Рисунок 3.78 – Підсумкова імітаційна модель електроприводу, що стежить

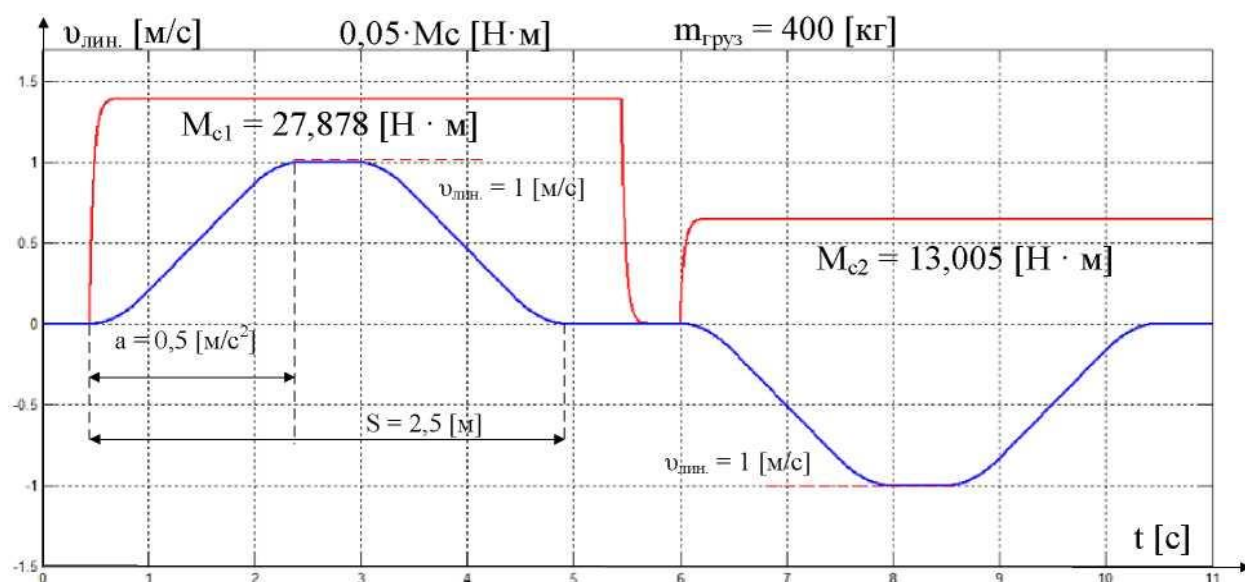


Рисунок 3.79 – Перехідний процес лінійної швидкості електроприводу

Виходячи з результатів показаних на рис. 3.78 і 3.79, можна зробити висновок про те, що розроблена система автоматичного керування електроприводу, що стежить, що дозволяє під час експлуатації електропривод ліфтової лебідки точно позиціонувати кабінку під час зупинки на кожному поверсі. Також умова про фіксовану лінійну швидкість переміщення ліфтової кабінки, що дорівнює 1 м/с виконано.

## РОЗДІЛ 4

### ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці – це система правових соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження здоров'я та працездатності людини в роботі.

Правовою основою законодавчих актів щодо охорони праці є Конституція України та Кодекс законів про працю України, а також такі закони:

- Закон про охорону праці;
- Закон про використання ядерної енергії та радіаційного захисту;
- Закон про охорону здоров'я;
- Закон про пожежну безпеку;
- Закон про забезпечення санітарного та епідеміологічного благополуччя населення;

Закон про загальноосвітнє державне соціальне страхування від нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання, які призвели до втрати працездатності.

У ст. 43 Конституції записано: «Кожний має право на працю, що включає можливість заробляти собі на життя роботою, що він вільно обирає або на який вільно згоджується», «Кожний має право на належні, безпечні і здорові. визначена законом», «Використанні праці жінок і неповнолітніх на небезпечних для їхнього здоров'я роботах забороняється».

Кожен, хто працює, має право на відпочинок (ст. 45 Конституції). Це право забезпечується наданням днів щотижневого відпочинку, а також оплачуваної щорічної відпустки, встановленням скороченого робочого дня для окремих професій і виробництв, скороченою тривалістю робочих днів.

Основним документом у галузі охорони праці є Закон України «Про охорону праці», дія якого розповсюджується на всі галузі підприємства, установи

та організації незалежно від форм власності та видів їх діяльності, на всіх громадян. роботи на цих підприємствах.

4.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів, що впливають на людину при роботі в лабораторії та дії людини на випадок пожежі

Особливістю негативного впливу комп'ютерних технологій на працездатність і здоров'я людини є комплексна одночасна дія кількох шкідливих факторів, при значній інтенсивності яких відбувається накопичення акумулювання їх впливу, що викликає суттєві зміни. органі та систем.

До основних негативних факторів належать: вимірювання різних діапазонів електромагнітного спектру (рентгенівське та оптичне випромінювання, високочастотні та низькочастотні ЕМП, ЕМП із надто низькими факторами виробничого середовища.

На працездатність та самопочуття негативно впливає шум від роботи електронно-обчислювальних машин. При цьому тривала дія шуму призводить до зниження розумової працездатності на 10-15 %, швидкої зорової втоми, послаблення уваги, порушення психофізіологічних процесів. Вплив шуму ВДТ є однією з причин розвитку стресу, погіршення настрою, сенсорного перевантаження, змін кровопостачання тканин та органів у зв'язку зі спазмами капілярів.

Професійна діяльність працівника на ВДТ є причиною. Функціональних змін нервово-м'язового апарату і кровопостачання ока, які призводять до розвитку астеноптичних скарг. Встановлено, що жінки частіше, ніж чоловіки, жалуватись на зоровий дискомфорт. При цьому відмічено, що в більшості випадків частота астенопії зростає зі збільшенням тривалості роботи за ВДТ.

Астеноптичні скарги пов'язані також із освітленням робочого місця, відблиском екрану, тремтінням та мерехтінням зараження, сухістю повітря і т.д. Встановлено, що у 72 % користувачів ВДТ мають місце скарги на біль в очах.

Результатом напруженої тривалої зорової роботи на ЕОМ може бути не тільки специфічний зоровий дискомфорт, але і виникнення головного болю.

До психологічних і поведенинкових розладів відносяться: агресивність, фрустрація, нервозність, дратівливість, порушення сну, швидкий розвиток втоми і далі.

При виникненні пожежі самими небезпечними факторами є токсичні продукти горіння (оксиди вуглецю, ціанід водою та інші).

Тому в першу чергу необхідно терміново залишити активну зону горіння. Перед тим, як вийти з приміщення, потрібно перекрити газ та вимкнути всі електроприлади, а краще здійснити повне знеструмлення об'єкту. При виході щільно закрити двері.

Якщо аж виникла на вашому поверсі і безпосередньої загрози для працівників немає, то потрібно здійснити західні заходи від можливого негативного впливу води, яку використовують для гасіння. При цьому знеструмлюють приміщення, відсувають від стін меблі, накривають обладнання та предмети захисною плівкою або іншими підручними засобами. На випадок виникнення пожежі на нижньому поверсі, виникає загроза негативного впливу диму на людей та перешкод для їх евакуації. У такому випадку приміщення потрібно негайно залишити, але перед тим, як виходити через двері, їх треба трохи при відчинити (ні в якому разі не можна різко відчиняти або вибивати двері, бо миттєвий доступ кислорода може викликати викид полум'я віджим). перепаду температури та впливу полум'я.

При рятуванні потерпілих зі будівель, що горять, та при гасінні пожежі виконувати наступні правила:

- перед тим як увійти в палаюче приміщення накритися з головою мокрим покривало, плащем худю;
- двері в задимлене приміщення відкривати обережно, поволі, прикриваючи корпус тіла дверним полотном для того, щоб уникнути спалаху полум'я від швидкого припливу свіжого повітря;

- у дуже задимленому приміщенні пересуватися поповзом або схилившись, бо більшість нагрітих газоподібних речовин та дим скуповуються у верхній частині приміщення;
- якщо виникло займання одягу, лягти на землю (підлогу) та перекинутися для збиття пламені (ні в якому разі не бігти, тому що пламені розгоріться ще сильніше);
- при гасінні пожежі використовувати вогнегасники та інші засоби гасіння за призначенням, спрямуванням їх на поверхню, що горить.

#### 4.2 Розрахунок освітлення лабораторії

Маємо приміщення з таким розміром:

- а) довжина -  $A = 6$  м;
- б) ширина  $= 4$  м;
- в) висота  $H = 3$  м;
- г) висота робочої поверхні  $h_P = 1$  м.

Для освітлення приймаємоо світильник типу УМП-15.

Коефіцієнт зображення стелі  $\rho_P = 70\%$ , стін  $\rho_C = 50\%$ , робочої поверхні  $\rho_R = 10\%$ .

Напруга живлення 220 В.

Відстань від стелі до робочої поверхні:

$$H_0 = H - h_P = 3 - 1 = 2 \text{ м.}$$

Відстань від стелі до світильника:

$$h_C = 0,2 \cdot H_0 = 0,2 \cdot 2 = 0,4 \text{ м.}$$

Висота підвішування світильник на освітлювальній:



$$h = H_0 - h_c = 2 - 0,4 = 1,6 \text{ м.}$$

Висота підвішування світильник над:

$$H_{\text{п}} = h = h_p = 1,6 + 1 = 2,6 \text{ м.}$$

Для досягнення найбільшої рівномірності освітлення приймаємо відношення  $L/h = 1,5$ , тоді відстань між центрами світильників:

$$L = 1,5 \cdot h = 1,5 \cdot 1,6 = 2,4 \text{ м.}$$

Необхідна кількість світильників:

$$N = \frac{S}{L^2} = \frac{6 \cdot 4}{2,4^2} = 4 \text{ шт.}$$

Приймаємо 4 світильники (2 ряди по 2 світильники). Індекс приміщення:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} = \frac{6 \cdot 4}{1,6 \cdot (6 + 4)} = 1,5.$$

При  $i = 1,5$ ,  $\rho_{\text{П}}=70\%$ ,  $\rho_{\text{С}}=50\%$ ,  $\rho_{\text{Р}}=10\%$  для світильників типу УПМ-15 коефіцієнт використання світлового потоку  $\eta = 0,55$ . тоді основний потік однієї лампи:

$$\Phi = \frac{E_{\text{min}} \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 24 \cdot 1,3 \cdot 1,15}{4 \cdot 0,55} = 4983 \text{ лм.}$$

За знайденим світовим потоком оббираємо лампу Г 215-225-300 потужністю 300 Вт, що має світовий потік 4610 лм, найбільш близький до розрахункового. При цьому фактична освітленість:

$$E_{\phi} = E_H \frac{\Phi_L}{\Phi_p} = 300 \frac{4610}{4893} = 283 \text{лк.}$$

Загальна потужність освітлюваної установки:

$$P_3 = P_n \cdot N = 300 \cdot 4 = 1,2 \text{ кВт.}$$

Таким чином розраховано, що для загального освітлення приміщення необхідно 4 світильники сумарною потужністю 1,2 кВт.

#### 4.3 Запобіжні заходи проти ураження струмом, пожежі та інших нещасних випадків

Відкриті металеві частини електричних машин або обладнання, які не повинні бути під напругою, але можуть виявитися під напругою внаслідок їх несправності, повинні заземлюватися, крім випадків, коли машини або обладнання:

- живлятися постійним струмом, напруга якого не перевищує 55 В, або змінним струмом, середньоквадратичне значення напруги якого між проводниками не перевищує 55 В, причому для отримання цього напруги не повинні застосовуватися автотрансформат;
- живитися струмом напруга якого не перевищує 250 В, від роздільних трансформаторів, що живить тільки одного споживача;
- виготовлені відповідно до принципу підвійної ізоляції.

Всі електричні апарати повинні бути виготовлені та встановлені таким чином, щоб при їхньому нормальному обслуговуванні або прикметі до них вони не викликали травм.

Головні та розподільні щити повинні бути влаштовані так, щоб забезпечувати зручний доступ персоналу до апаратів і обладнання. Бічні та тильні, а якщо необхідно, і особисті сторони щитів повинні бути оснащені належним огороженням.

У випадку, коли застосовують незаземлену первичну або вторинне систему розподіл струму для силових, опалювальних або освітлювальних ланцюгів, повинно бути передбачено пристрій, що забезпечує неперервний контроль за рівнем ізоляції щодо землі і подач. що вказує на ненормально низьку величину ізоляції.

Усі електричні кабелі та електропроводка, що перебувають поза обладнанням, повинні бути принаймні такого типу, що не розповсюджує полум'я, і бути прокладені так, щоб не погіршувалися їх первісні властивості щодо нерозповсюдження.

Кабелі та електропроводка, що живлять відповідальні або аварійні силові ланцюги, а також висвітлення і внутрішню суднову зв'язку або сигналізацію, повинні прокладатися в обхід камбузів, пралень, машинних приміщень. пожежоопасности.

Кабелі повинні бути встановлені і закріплені таким чином, щоб уникнути перетинання або іншого ушкодження.

Підключення та з'єднання всіх проводників повинні бути виконані таким чином, щоб зберігалися перші електричні та механічні властивості кабелю, а також його властивості щодо нерозповсюдження полум'я і якщо буде потрібна вогне.

## РОЗДІЛ 5

### ОХОРОНА ЗАКОЛИШНЬОЇ СЕРЕДИ

Україні притаманні такі екологічні проблеми, як кислотні дощі, транскордонне загрязнення, руйнування озонової кулі, потепління клімату, накопичення відходів, особливо токсичних та радіаційних, зниження біологічного. Аварія на ЧАЕС з її величезними медико-біологічними наслідками спричинила в Україні ситуацію, що наближається до рівня глобальної екологічної катастрофи. В Україні відсутній природний приріст населення, а тривалість життя на шість років нижча, ніж у розвинених країнах. Негативні зміни у здоров'я сталися, головним чином, за рахунок підвищення рівня злоякісних новостворень, серцево-судинних хвороб, бронхіальної астми і т.д. Велику гостроту набула проблема радіоактивних відходів. На атомних електростанціях накопичено тисячі тонн відпрацьованого ядерного палива, десятки тисяч кубометрів твердих і десятки мільйонів літрів рідких радіоактивних відходів.

Стан навколишнього природного середовища значною мірою визначається рівнем лісистості та якісним станом лісів. Україна малолісна країна. Ліси переважно виконують захисні водоохоронні та санітарно-гігієнічні функції. Однак вони інтенсивно експлуатуються, гинуть від промислових викидів та пожеж, через недбале відведення земель під вирубку для різноманітного будівництва. Протягом останніх років в Україні погинуло близько 2,5 тис. га лісових насаджень. Вирубкування лісового фонду перевищує його відновлення. Викликає стурбованість інтенсивна експлуатація лісів, особливо в Карпатському та Поліському регіонах, де засереджено відповідно 29 та 33 % запасів деревини. Значних збитків наносять пожежі. Необгрунтованість при визначенні шляхів розвитку агропромислового та лісохімічного комплексів, не регульований стік забруднень біля річки, осушення боліт та стихійний розвиток колективного садівництва призвели до зниження природних природних комплексів і ландшафтів України.

### 5.1 Забруднення морської середовища внаслідок викиду суднових відходів діяльності

Відходи суднові - не потрібні і не придатні для обслуговування судна відпрацьовані види нафти і матеріалів, невживані їх залишки або речовини, що утворюються в процесі експлуатації судна (тверді і рідкі), які не підпадають під утилізацію на самому судні. вилученню із судна.

Всі відходи, що утворюються на судні, можна розбити на дві групи:

- залишки перевезених вантажів, що утворюються внаслідок неповного їх вивантаження, обмивання палуби, трюмів, танків і т.д.;
- загрязнення, що утворюються в результаті життєдіяльності екіпажу та пасажирів, а також внаслідок експлуатації суднових механізмів.

Крім того, дотепер, на жаль, досить часто випадки аварійних розливів нафтопродуктів при бункеруванні судів і в результаті різних аварійних ситуацій.

У процесі експлуатації суднових механізмів утворюється особливий вид відходів - нафто місткі води (НВ), які скопюються в машинному відділенні. Основні причини утворення НВ – це протікання води з трубопроводів, арматури, насосів, дейдвудних пристроїв, донні арматури, а також протікання нафтопродуктів із трубопроводів та арматур при ремонті механізмів.

Такий стан промов став можливим за рахунок розвитку підводної техніки, яка дозволяє вести інтенсивний пошук та дослідження флорі і фауні не тільки на малих глибинах, але і на середніх і великих глибинах, закріплюватися на місцях видобутку. комунікації.

Розглянемо деякі негативні впливи від використання підводних апаратів на екологічний стан Світового океану та істот, що його населяють.

Для проведення комунікацій зв'язку зі стаціонарними нафтовими буровими платформами та між островами і материками, а також для прокладання трубопроводів для транспортування видобутих нафти і газу в товщі ґрунту використовують самохідні робочі апарати. виконана своїх функцій знищують

живі організми на дні океану, порушують звичні місця їхнього перебування, змінюють рельєф дна.

При використанні прив'язних підводних систем намагаються досягти максимального економічного ефекту від їх використання так як по закінченню терміну їх експлуатації вони залишаються на дні Світового океану, якщо не передбачена утилізація іншим шляхом. Знаходячись на дні прив'язна підводна система піддається агресивному впливу однієї середовища, отруюючи простор навкруги собі різними хімічними речовинами.

У складі рушіїв є наявність рідкого діелектрика, в основному це гас, який призначений для компенсації гідростатичного тиску на конструктивні елементи.

Для запобігання наведеним негативним факторам світовою спільнотою приймаються заходи, що до зниження забруднення та зміни одного простору, де інтенсивно використовують підводні апарати.

## 5.2 Заходи боротьби із забрудненням

У 1954 році в Лондоні пройшла міжнародна конференція, що ставила за мету виробити погоджені дії по охороні морського середовища від забруднень нафтою. На конференції була прийнята конвенція, що визначає обов'язки держав у цій галузі. Пізніше у 1958 році в Женеві були прийняті ще чотири документи: про відкрите море, про територіальне море та прилеглу зону, про континентальний шельф, про рибальство і охорону живих ресурсів моря. Ці конвенції юридично закріпили принципи і норми морського права. Вони ставили за обов'язок кожній країні розробити і ввести в дію закони, що забороняють забруднювати морську среду нафтою, радіо відходами та іншими шкідливими речовинами. У 1973 році в Лондоні конференція ухвалила документи щодо запобігання забруднення з суден.

Заборонено злив нафтомістких вод з танкерів, всі скидання повинні з них викачувати тільки на берегові приймальні пункти.

З метою запобігання виток нафти досконалюються конструкції нефтеналивних суден. Багато сучасних танкерів мають подвійне днище. При ушкодженні одного з них нафта не виливається, її затримає друга оболонка.

Для систематичного очищення акваторій від випадкових розливів застосовуються плавучі нафтозбирачі та бічні загородження.

У Японії створена і апробована унікальна технологія, за допомогою якої можна в короткий термін ліквідувати гігантське пятно. Було випущено реактив, основним компонентом якого є оброблене рисове лушпиння.

З 1993 року було заборонено скидання рідких радіоактивних відходів, але їх число неухильно зростало. Тому з метою захисту навколишнього середовища в 90-ті роки стали розроблятися проекти очищення рідких радіоактивних відходів.

Однак незважаючи на деякі успіхи в пошуку ефективних засобів, які ліквідують забруднення, про вирішення проблеми говорити заздалегідь. Тільки впровадженням нових методів очищення акваторій неможливо забезпечити чистоту морів і океанів. Центральне завдання, яке необхідно вирішувати всім країнам спільно – запобігання забрудненню.

## ВИСНОВКИ

Відповідно до технічного завдання у кваліфікаційній роботі магістра розроблено електропривод змінного струму ліфтової лебідки пасажирського ліфта.

Вибрано асинхронний двигун моделі RA132MB6 для спільної роботи з перетворювачем частоти фірми Danfoss серії VLT Lift Drive моделі LD-302P5K5 з реалізацією принципів частотно-струмового векторного управління. Виконано ретельний аналіз математичної моделі асинхронного двигуна не тільки у обертовій, але й у нерухомій системі координат. Далі була проведена оптимізація кожного контуру регулювання та ретельний аналіз показань якості кожного з них. Було зроблено порівняння перехідних процесів контуру потокозчеплення та швидкості при використанні аперіодичного ланки 1го порядку та при використанні повноцінного оптимізованого контуру струму. Після того, як була проведена перевірка системи керування в кожній системі координат, була отримана імітаційна модель лінеаризованої системи автоматичного керування електроприводу нерухомої системи координат. Наступним кроком стало запровадження обмежень в імітаційну модель електроприводу, що дозволяє отримувати перехідні процеси максимально близькі до реальних. Для вирішення проблем, пов'язаних з позиціонуванням кабіни в ліфтовій шахті та точності зупинки, був розроблений налаштований контур положення для отримання електроприводу, що стежить. Потім, для поліпшення якості переміщення та зручності пасажирів у ліфтовій кабіні було додано задатчик інтенсивності з S-подібною характеристикою. В результаті було отримано реалістичну імітаційну модель нелінійної системи автоматичного управління регульованого електроприводу ліфтової лебідки, що відповідає вимогам, пред'явленим у технічному завданні.



## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Е.Л. Греков, А.А. Кувшинов, А.А. Гусарів. Автоматизований електропривід пасажирського ліфта: методичні вказівки до курсової роботи - Оренбург: ОГУ, 2012, - 82 с.
2. Ю. Н. Калачов. Векторне регулювання/нотатки, практика - 72 с.
3. Є.В. Горьомикін. Електроустаткування промисловості: У 3-х частинах. Ч. Промисловий електропривод: Навчальний посібник / Таганрог: Вид-во ТРТУ, 2005. - 288с.
4. ПБ 10 -06 -92 Правила влаштування та експлуатації ліфтів.
5. Л.К. Бурулько, Ю.М. Дементьєв. Електроустаткування промисловості. Електроприводи промислових механізмів та пристроїв: навчальний посібник / Томськ: Вид-во ТПУ, 2012р. - 180 стор.
6. Л.С. Удут, О.П. Мальцева, Н.В. Кояїн. Проектування та дослідження автоматизованих електроприводів: навчальний посібник. Ч.8. асинхронний частотно - регульований електропривод / ТПУ-2-е вид., перероб. в. доп - Томськ: Вид-во ТПУ, 2014р. - 648 стор.
7. [Електронний ресурс]<http://ls-general.ru/model/1597-danfoss-ld-302p5k5>.
8. С.В. Ланграф. Векторне керування в електроприводі змінного струму / лекційний матеріал
9. Санітарно-епідеміологічні правила та нормативи 2.2.2/2.4.1340-03 "Гігієнічні вимоги до персональних електронно-обчислювальних машин та організації роботи"
10. Правильна утилізація електронних компонентів та батарей [Електронний ресурс] URL:<https://energoboard.ru/post/2350/>.